
Verfahren für die Engpass- und Mängelanalyse im städtischen Hauptverkehrsstraßennetz

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 398

Verfahren für die Engpass- und Mängelanalyse im städtischen Hauptverkehrsstraßennetz

von

Peter Vortisch, Sebastian Buck, Lea Fuchs, Josephine Grau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Verkehrswesen

Bernhard Friedrich, Stephan Hoffmann, Torben Lelke
Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig mbH

Michael Baier
BSV Büro für Stadt- und Verkehrsplanung Dr.-Ing. Reinhold Baier GmbH, Aachen

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 398

bast 
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 77.0516
Verfahren für die Engpass- und Mängelanalyse
im städtischen Hauptverkehrsstraßennetz

Fachbetreuung:
Matthäus Zelazny

Referat:
Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-855-3 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v398>

Bergisch Gladbach, Mai 2025

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministers für Digitales und Verkehr im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS; www.fops.de) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich beim Autor.

FoPS | Verbesserung der
Verkehrsverhältnisse
der Gemeinden
FORSCHUNGSPROGRAMM STADTVERKEHR

Kurzfassung

Verfahren für die Engpass- und Mängelanalyse im städtischen Hauptverkehrsstraßennetz

Die zentrale Frage des vorgestellten Projekts war, ob kommerziell verfügbare Floating-Car-Daten (FCD) bei der Bestimmung der Angebotsqualität von Netzabschnitten eingesetzt werden können. Es konnte gezeigt werden, dass FCD sehr gut geeignet sind, Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten und damit die Angebotsqualität zu bestimmen. Kontrollmessungen durch Kennzeichenerfassung haben bestätigt, dass selbst bei geringen Durchdringungsraten die durch Floating-Car-Daten bestimmten Fahrzeiten das Verkehrsgeschehen gut wiedergeben.

Floating-Car-Daten sind bei mehreren Anbietern in verschiedenen Aufbereitungsstufen erhältlich. Für verkehrstechnische Analysen sind FC-Rohdaten, also die Einzelmeldungen der Fahrzeuge mit Zeitstempel, Position und Geschwindigkeit, am flexibelsten einsetzbar. Wenn es um die Bestimmung der Angebotsqualität einzelner Netzabschnitte geht, sind auch aggregierte FCD gut geeignet, auch wenn die Art der Vorverarbeitung je nach Anbieter nicht vollständig transparent ist.

Es wird empfohlen, die Nutzung von FCD im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) als alternative Methode zur Bestimmung der mittleren Fahrzeit aufzunehmen. Dafür sollten FCD für bestimmte Wochentage und Zeitintervalle aggregiert und in 15-Minuten-Intervalle gruppiert werden, wobei der Median als repräsentative Fahrzeit festgelegt wird. So können die Spitzenzeiten identifiziert und die bemessungsrelevante Fahrzeit durch den Median ermittelt werden, um Verzerrungen durch Ausreißer zu vermeiden. Für die Bemessung geplanter Anlagen können FCD zur Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen verwendet werden, um Verkehrsprognosen zu unterstützen.

Das im Projekt für städtische Netzabschnitte erprobte Verfahren zur Bestimmung der Angebotsqualität kann ohne Änderungen auf jede andere Bewertungssituation übertragen werden, bei der die mittlere Fahrtgeschwindigkeit die maßgebende verkehrstechnische Kenngröße ist. Insbesondere kann auch die Angebotsqualität von Netzabschnitten auf Landstraßen damit bestimmt werden.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den Radverkehr kann zunächst festgestellt werden, dass durch Smartphone-Apps aufgenommene GPS-Tracks von Fahrrädern eine gute technische Basis bieten, die Verkehrsqualität für den Radverkehr zu bestimmen. Für die praktische Anwendbarkeit besteht gegenüber dem Kfz-Verkehr aber noch der bedeutende Nachteil, dass es derzeit keine kommerziellen Anbieter von flächendeckenden Floating-Bike-Daten gibt.

Auch zur netzweiten Mängelanalyse sind Floating-Car-Daten gut geeignet. Es wurde ein Verfahren entwickelt, um ein städtisches Straßennetz automatisch in Netzabschnitte zu unterteilen, für die verschiedene Performance-Indikatoren bestimmt werden, die sich an Perzentilen der Fahrzeitverteilungen orientieren. Die dazu notwendigen Fahrzeitverteilungen können aus FCD bestimmt werden, wobei nur Fahrzeuge berücksichtigt werden dürfen, die den Netzabschnitt komplett durchfahren haben.

Abstract

Procedure for bottleneck and deficiency analysis in urban major road networks

The central question of the presented project was whether commercially available Floating Car Data (FCD) can be used to determine the level of service of network sections. It was shown that FCD are highly suitable for determining travel speeds on network sections and thus the service quality. Control measurements using license plate recognition have confirmed that even at low penetration rates, the travel times derived from Floating Car Data reflect traffic conditions well.

Floating Car Data are available from several providers in various processing stages. For traffic engineering analyses, FC raw data—individual vehicle reports with timestamps, position, and speed—are the most flexible. For determining the service quality of individual network sections, aggregated FCD are also suitable, although the preprocessing method is not fully transparent and varies by provider.

It is recommended to incorporate the use of FCD in the German Highway Capacity Manual (HBS) as an alternative method for determining average travel time. FCD should be aggregated for specific weekdays and time intervals, then grouped into 15-minute intervals, using the median as the representative travel time. This allows for the identification of peak times, and the design-relevant travel time can be determined via the median to avoid distortions from outliers. For the assessment of planned facilities, FCD can be used to calibrate microscopic traffic flow simulations to support traffic forecasts.

The procedure tested in the project for determining the level of service in urban network sections can be applied to any other assessment context where average travel speed is the key indicator. This approach can also be used to determine the level of service of network sections on rural roads.

Regarding applicability to bicycle traffic, it has been found that GPS tracks from bicycles, recorded via smartphone apps, provide a good technical basis for assessing service quality for cycling traffic. However, compared to motor vehicle traffic, there is a significant practical disadvantage: currently, there are no commercial providers of comprehensive Floating Bike Data.

Floating Car Data are also well-suited for network-wide deficiency analysis. A method was developed to automatically subdivide an urban road network into network sections, for which various performance indicators can be determined based on the percentiles of travel time distributions. The required travel time distributions can be derived from FCD, considering only vehicles that have traveled the entire network section.

Summary

Procedure for bottleneck and deficiency analysis in urban major road networks

1 Motivation and Objective

Floating-Car Data (FCD) has become a well-established source of information about current traffic conditions in recent years. They have largely displaced other sources in commercial services and have led to a level of understanding of traffic flow on the roads that is better than ever before. Therefore, it is obvious to utilize Floating-Car Data in the planning and design of transportation facilities. In the presented research project, the focus was on investigating how FCD can be used to determine travel speeds in motor vehicle traffic over network segments in urban arterial networks and how these travel speeds can be utilized in the context of the German Highway Capacity Manual HBS (Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen) and the German guideline for integrated network design RIN (Richtlinien für Integrierte Netzgestaltung) for assessing the quality of service. Specifically, two procedures were developed in the project:

1. An alternative method (in accordance with HBS) for determining average travel speeds as a starting point for evaluating the quality of service of network segments on main roads.
2. A procedure for identifying stretch- or junction-related bottlenecks as a basis for bottleneck and deficiency analysis in urban main road networks.

2 Sources and Types of Floating-Car Data (FCD)

Floating-Car Data (FCD) is generated when vehicles transmit their positions to a central system while driving. By analyzing a sequence of such messages from a vehicle, the vehicle's travel path can be reconstructed, allowing determination of the time spent between reported positions. Typically, along with the position and vehicle identification, additional data is transmitted, such as the current speed at the reported location or the direction of travel. FCD relies on location and communication technologies, primarily found in smartphones but also in built-in navigation devices. In many cases, the information is sent not by the vehicle itself, but by a smartphone carried inside the vehicle.

The positioning is based on GPS or comparable systems and is sufficient, with algorithmic post-processing, to provide reliable information about the vehicle's location. For the quality and usability of FCD, two other aspects are crucial: the penetration rate, i.e., the proportion of all vehicles sending information, and the transmission frequency, i.e., how often the vehicles send data. Typical transmission frequencies in commercial FCD systems range from 5 to 20 seconds. The penetration rates vary significantly depending on the operator, ranging from approximately 1% to 20%.

For application in planning and design, FC data must be publicly or commercially accessible. While in the past, operators of navigation and traffic services mostly used FC data exclusively for their system operations, today there are several commercial offerings that provide FC data for past periods to end-users such as municipalities or engineering firms.

FC data can be delivered by providers either as raw data or as aggregated data. Raw data essentially consist of individual position reports of vehicles, usually including vehicle identification, timestamp, geographical coordinates of the position, and the speed at that reported position. Some providers offer an option to include a reference to the road network. This process is called "Map Matching," which supplements the pure geographic position with information about the specific road segment in the road network to which this position belongs. This requires a reference to a digital road map, which can be either a provider-specific map or the freely available map from OpenStreetMap.

Aggregated data, on the other hand, involve the provider having already calculated the travel times of vehicles on the road segments of a fundamental network model based on the raw data. The delivered result includes at least the average travel times per road segment, and possibly also the distribution of travel

times, such as in 5% percentile increments. Since aggregation occurs spatially on road segments, it requires a reference to a network model to which the raw data is matched during processing. Aggregation also has a temporal dimension, and users can typically specify the time period for which the FC data should be aggregated. Depending on the application, time intervals ranging from a few minutes to several months can be meaningful. Providers usually indicate the number of vehicles that contributed to the average or the distribution of travel times in the reference period. From this information, the penetration rate can be estimated if the total traffic volume is at least partially known.

The representativeness of information derived from FC data depends not only on the penetration rate but also on the type of vehicle fleet from which the provider obtains its raw data. For simple congestion detection, it is insignificant which vehicles send their positions, as all vehicles are equally affected in a traffic jam. Therefore, knowing the trajectories of fewer vehicles is sufficient for this purpose. However, for reliable determination of travel time distributions, e.g., for design purposes, it is essential whether the reporting vehicles represent a representative subset of the entire fleet. Users should, especially with providers with low penetration rates, inquire about the type of vehicles included in the data. With providers having high penetration rates (>10%), it can be assumed that the representativeness issue is less significant.

Although the number of FCD providers has increased in recent years, there is also a trend towards business models shifting away from selling raw or aggregated data towards providing standardized analyses of this data as a service. Currently, some providers offer raw FC data for purchase, where one can buy all the contained messages for a specific spatial area (either freely definable polygons or predefined regions, e.g., administrative boundaries) for a certain period, and the price typically depends on the amount of data included. Providers of aggregated data allow defining the spatial and temporal scope in a similar way, except that the information is related to segments of a digital road network model. Another way of spatial delimitation can be specifying a route instead of an area. Some providers still handle data sales traditionally, i.e., through inquiry-offer-order-invoice processes, while others rely on self-service portals on the web. This trend could extend to the point where complete analyses of traffic conditions in a city or a district can be purchased through self-service portals. Such complete analyses surely have value but appear to have no direct connection to the key performance indicators mentioned in the regulations; the worlds are still separated.

Within the framework of the project, the available FCD providers in Germany for the year 2022 were identified. A distinction was made between providers of aggregated data and providers of raw data, as not every provider offers both types of FCD. Data from seven providers were acquired and incorporated into the investigation.

3 Calculation of Travel Times from FCD

For assessing the traffic service quality, the HBS in Chapter S5 provides a method that uses the average travel time along a network segment as a service quality indicator. For further evaluations of service quality, the shape of the travel time distribution can be considered. Therefore, determining the travel time distribution along a network segment is a fundamental task when utilizing FCD.

FC data offers a straightforward way to calculate the average travel time along a network segment. If working with raw data with map matching, an entry cross-section and an exit cross-section can be defined, and all vehicles passing through these two cross-sections can be identified. If only raw data without map matching is available, a similar approach with slight inaccuracies is possible: Catch radii must be placed around the reference cross-sections and all vehicles that have reported within the catch radii must be recorded. The time difference is determined for the vehicles that have been in both catch radii, which can be interpreted as travel time after plausibility filtering.

When working with aggregated FC data, the provider already provides average travel times for road segments in the network model or even the average travel time for the specific network segment being considered. Depending on how the provider's network model is constructed, there may be issues when combining average travel times of individual road segments into the overall average travel time for the network segment. This can happen when travel times of vehicles that do not traverse the entire network segment but turn off and experience significant waiting times during the turn are included in the calculation. This issue can be avoided if the provider offers an option to include only vehicles that have traversed the entire network segment.

4 Verification of FCD through Measurements

To verify the quality of travel times derived from FCD, travel time measurements with automatic number plate recognition (ANPR) were conducted in both directions at four real road sections, and these measurements were compared with the FC travel times. During the evaluation, the travel times from the ANPR survey and the FCD were grouped by hour, and a median was calculated from the hourly distributions. This hourly median serves as the representative value for the travel time within each hour in the analyses. The median was chosen instead of the arithmetic mean as the comparison value because the distribution of travel times within an hour is very sensitive to outliers, which could be caused by potential survey errors or errors in processing the FCD. Especially in hours with a low number of recorded FCD trajectories, a single outlier could lead to a significant distortion of the arithmetic mean. The median is more robust in this regard and is therefore better suited for the present evaluation.

The correlation analysis of the median travel times from both distributions shows that, in general, there is good agreement between the travel times from both sources for identical time intervals. It becomes apparent that the hours with larger deviations between the travel times are usually characterized by a low penetration rate. In summary, it can be concluded that the travel times determined from FCD have generally proven to be very reliable when a sufficiently high penetration rate was achieved. A detailed statistical analysis has shown that the FCD travel times can be considered reliable when at least three travel time reports are available within an hour.

However, the real strength of FC data does not lie in replacing short-term measurements with, for example, number plate recognition devices. Due to the much higher capture rate of number plate recognition, the traffic conditions on a measurement day can be much more accurately depicted than what FC data with low penetration rates can achieve. But for design purposes, the travel time on a specific measurement day is not the ideal information because that day is subject to chance variations. Here, FC data has a significant advantage: with very little effort, longer periods, up to several months, can be considered. Even with low penetration rates, reliable average travel times can be obtained, which are more representative than those measured on one or a few stationary days.

5 Evaluation of Network Segments

In the HBS, the service quality on network segments is determined based on the average car travel speeds. The method presented in the HBS to determine this travel speed without extensive travel time measurements has some limitations and is only applicable to specific configurations. Therefore, there is significant potential to conduct an evaluation using FCD with much less effort.

For existing facilities, the question arises of how to determine the relevant travel speeds from FCD. The focus is not so much on how to determine a travel speed during a specific period (as the travel time is practically directly available from the FC data), but rather on identifying the relevant traffic situation for design purposes. According to the HBS, the travel time in the 50th most heavily loaded hour is considered relevant for design purposes. However, it is challenging to reliably identify congested conditions from FC data, so an alternative approach is needed to determine the relevant travel time.

Initially, the project investigated the straightforward approach of considering the travel times for all hours of a year and selecting the 50th highest travel time. However, this led to very high travel times and, accordingly, very poor traffic qualities, as the highest travel times of the year typically occur during incidents such as construction sites or accidents. Such situations are not part of the concept of the 50th hour in the HBS, as it focuses on travel times resulting from the interaction of traffic demand with an unaffected road infrastructure. Thus, this simple transfer of the concept of the 50th hour to measured travel times was discarded.

The second developed approach is based on the methodology proposed in HBS Chapter S 2.3 for determining a design traffic volume based on short-term counts. According to the HBS, short-term counts should be conducted between the end of March and the end of October on weekdays (Tuesday, Wednesday, or Thursday) outside school holidays. On these days, four hours of continuous counts should be conducted in the morning (06:00 to 10:00) and in the afternoon (15:00 to 19:00). Subsequently, the four highest-loaded 15-minute intervals are selected as the peak hour, and the traffic volume counted during these intervals is used as the design traffic volume.

This approach can also be transferred to the FCD dataset to determine the design-relevant travel time. First, all trajectories within the possible counting periods defined in the HBS are identified from the annual dataset. Then, the information about the specific day of the week when these trajectories were recorded is removed. This aggregates all travel times recorded on the allowed counting days into two datasets for morning and afternoon counting times. The trajectories in both datasets are then grouped into 15-minute intervals, and the mean travel speed is computed. Next, the four adjacent 15-minute intervals with the lowest sum travel speeds are determined in both datasets. These four intervals represent the average peak hour for the morning respectively afternoon on the counting days. From all trajectories within the respective peak hours, the design-relevant travel speed for the morning and afternoon is determined.

One advantage of this methodology is that the aggregated trajectories within the average peak hours can be used to determine the design-relevant travel speed. This approach avoids the aforementioned issues related to periods of congestion. Additionally, the requirement for temporal coverage of the necessary FCD (Floating Car Data) is lower, as only travel times within the counting period from the end of March to the end of October are used.

FC data can only provide travel time information from the past, meaning their direct use for evaluating traffic quality is limited to the analysis of existing facilities. However, even for forecasting purposes, FCD can be valuable by using them to calibrate and validate a microscopic traffic flow simulation model in the current state, which can then be further developed for travel time determination in forecasting scenarios. The essential calibration parameter is the travel speed since it is the traffic performance indicator prescribed by the HBS evaluation method. The project conducted the calibration of a microscopic simulation model for one of the studied road sections.

The method tested in the project for urban network sections to determine service quality can be transferred without modifications to any other evaluation situation where the average travel speed is the decisive traffic indicator. In the HBS, this is particularly the case when assessing the service quality of network sections on rural roads according to HBS Chapter L7 and on highways according to HBS Chapter A5.

6 Recommendations for Supplementing the HBS

Based on the work described above, the following recommendation has been derived to supplement the HBS in Chapter S6 as follows:

"The average travel speed in the existing state can also be determined using Floating Car Data (FCD). To do this, FCD must be procured for the weekdays Tuesday, Wednesday, and Thursday for at least one of the months from April to October. From the FCD, the two time blocks from 6:00 a.m. - 10:00 a.m. (morning) and 3:00 p.m. - 5:00 p.m. (afternoon) are extracted from all days and combined into two datasets without considering the specific day. For both datasets, the mean FC travel speeds are determined in 15-minute intervals. In both time blocks (morning and afternoon), the peak hour is determined as the sequence of the four consecutive 15-minute intervals that have the lowest sum of mean travel speeds. For each of the two identified peak hours, the design-relevant travel speed is then determined from all FC travel speeds falling within that peak hour.

The FCD must cover at least enough days to ensure that in each aggregated 15-minute interval, there are at least 5 measured travel speeds.

For the planned state, FCD cannot be directly used to derive the design-relevant travel speed. If microsimulation is used to assess the planned state, FCD can be used for calibrating and validating the simulation model in the existing state."

7 Network-Wide Deficiency Analysis

So far, the focus was on the assessment of the traffic quality of one given network segment using Floating-Car Data. The next step is to extend the assessment to the entire road network of a city. The objective is to automatically identify network segments where the traffic flow is not satisfactory.

Both the HBS and RIN refer to the average car travel time when evaluating a network segment. As explained in the previous chapters, this indicator can be reliably determined from Floating-Car Data with a sufficient penetration rate. However, additional indicators are also useful in network-wide deficiency analysis. For example, incorporating travel time variations can provide insights into the reliability of each network segment.

Compared to using FC data for individual network segments according to the HBS, conducting a network-wide deficiency analysis involves two additional technical aspects: first, all network segments of a city's road network must be automatically identified based on digital road maps, and second, conducting an efficient network-wide analysis imposes specific requirements on the FC data to be obtained.

The proposed workflow is as follows:

1. Obtaining a network model for the city under investigation; in most cases, a network can be imported free of charge from OpenStreetMap.
2. Automatically identifying network segments in this network model using an algorithm based on route attributes that allow categorization. Such an algorithm was developed and implemented in the project.
3. Calculating the travel time distributions for the network segments using FC data.
4. Calculating a disruption indicator for each network segment from the travel time distribution and possibly other attributes of the contained routes.

By following this workflow, it becomes possible to efficiently assess the traffic quality of the entire road network, automatically identifying segments with unsatisfactory traffic flow and potential areas for improvement.

8 FCD in Bicycle Traffic

Floating-Bike Data and bicycle traffic were not the main focus of this study, but the topic was addressed through a literature analysis and a feasibility study using data from a research project in Berlin.

GPS tracks recorded by smartphones through cycling apps provide a solid technical basis for determining the traffic quality in bicycle traffic. The heterogeneous speed levels can be compensated for by scaling the speeds within continuous rides. Waiting times at intersections can be directly derived from the course of the ride. Intentional interruptions in the ride must be identified and filtered out, which is likely achievable with sufficient coverage by comparing them with other parallel ride data.

However, compared to motorized traffic, there is a significant drawback in the practical applicability of Floating-Bike Data: there are hardly any commercial providers of Floating-Bike Data available. This limitation hinders the widespread use of this data source for assessing bicycle traffic conditions. Nevertheless, as the interest and demand for bicycle traffic data grow, there may be future developments and initiatives to improve the availability and accessibility of Floating-Bike Data.

Inhalt

1	Motivation und Projektüberblick	13
1.1	Ziel des Projekts	13
1.2	Projektüberblick	13
2	Grundlagen und Verfügbarkeit von Floating-Car-Daten	15
2.1	Technische Grundlagen	15
2.2	Verfügbarkeit und Anbieter	17
2.2.1	Anbieter von aggregierten FCD	18
2.2.2	Anbieter von FCD-Rohdaten	19
2.3	Verarbeitung von FC-Daten	20
2.3.1	Zeitliches und räumliches Filtern der Rohdaten	20
2.3.2	Map-Matching	21
2.3.3	Berechnung von Fahrtzeiten mit Map-Matching	22
2.3.4	Berechnung von Fahrtzeiten ohne Map-Matching	23
2.3.5	Berechnung von mittleren Fahrtgeschwindigkeiten	23
2.4	Visualisierungen	24
2.4.1	Scatter-Plot auf einer Karte	24
2.4.2	Scatter-Plot im Weg-Zeit-Diagramm	25
2.4.3	Kontur-Plot („Heat-Map“)	25
2.4.4	Violinplots	26
2.5	Generierung synthetischer FCD aus Verkehrsflusssimulationen	27
2.5.1	Verkehrssimulation mit Vissim	28
2.5.2	Analyse der realen FC-Daten	28
2.5.3	Generierung künstlicher FC-Daten	29
3	Literaturanalyse zur Nutzung von FCD zur Analyse des Verkehrsablaufs	32

4	Überprüfung von FCD durch Messungen	37
4.1	Auswahl von Netzabschnitten	37
4.1.1	Kriegsstraße (Karlsruhe)	38
4.1.2	Fiduciastraße, Killisfeldstraße und Ernst-Friedrich-Straße (Karlsruhe)	38
4.1.3	Vahrenwalder Straße, Arndtstraße und Schloßwender Straße (Hannover)	40
4.1.4	Celler Straße, Lange Straße, Küchenstraße, Hagenbrücke und Hagenmarkt (Braunschweig)	41
4.1.5	Frankenforster Straße und Kölner Straße (Bergisch Gladbach)	42
4.1.6	Indestraße (Eschweiler)	43
4.1.7	Verler Straße (Gütersloh)	44
4.1.8	Elberfelder Straße, Wansbeckstraße und Nordstraße (Remscheid)	45
4.2	Messung der Fahrtzeiten	46
4.2.1	Aufbau und Konfiguration der Messtechnik	46
4.2.2	Erhebungsergebnisse	54
4.3	Vergleich von FCD und Messung	62
5	Bewertung von Netzabschnitten	67
5.1	Das bestehende Bewertungsverfahren im HBS-Kapitel S6	67
5.1.1	Bewertung des Verkehrsablaufs auf Strecken	68
5.1.2	Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten	70
5.1.3	Verfahren zur übergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten im HBS	71
5.1.4	Aktuelle Weiterentwicklungen der Verfahren für das HBS	73
5.2	Ermittlung der bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit durch FCD	74
5.2.1	Bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit aus der n-ten Stunde	74
5.2.2	Bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit aus durchschnittlichen Spitzenstunden innerhalb der Zählzeiten	75
5.3	Vergleich von FCD und Berechnung nach HBS-Kapitel S6	76
5.4	Fahrtzeiten aus Verkehrsflusssimulation und FCD	79
5.4.1	Verkehrsflusssimulation als alternatives Verfahren im HBS	79
5.5	Kalibrierung von Verkehrsflusssimulation mit FCD für die Prognose	81
5.5.1	Datenaufbereitung	81
5.5.2	Aufbau des Simulationsmodells	81
5.5.3	Kalibrierung	82
5.6	Empfehlungen zur Ergänzung des HBS	88

6	Simulationsstudie zur Erkennung von Störungen aus FCD	89
6.1.1	Laborbeispiele zur Beurteilung der Störungserkennung	89
6.1.2	Visuelle Störfallerkennung in den Laborbeispielen	91
6.1.3	Quantitative Störungserkennung in den Laborbeispielen	95
7	Netzweite Mängelanalyse	98
7.1	Bewertung von Netzabschnitten in den RIN	98
7.2	Indikatoren für Störungen im Verkehrsablauf	100
7.3	Automatische Identifikation von Netzabschnitten in einer Stadt	102
7.4	Berechnung der Fahrzeitverteilung und von Störungsindikatoren aus FCD	105
7.4.1	Fahrtzeiten aus aggregierten Daten (FCD-Anbieter 4)	105
7.4.2	Fahrtzeiten aus FC-Rohdaten (FCD-Anbieter 3 und 6)	108
8	FCD für Fahrradverkehr (Floating-Bike-Daten)	112
8.1	Radverkehr im HBS	112
8.2	Ansätze zur Nutzung von FC-Daten aus dem Radverkehr	112
8.3	Erkennung von Störungen im Radverkehr	114
9	Zusammenfassung und Fazit	117
	Literatur	119
	Bilder	127
	Tabellen	131

1 Motivation und Projektüberblick

1.1 Ziel des Projekts

Kommerzielle Dienste wie Google Traffic informieren inzwischen über die Verkehrslage im Straßennetz in einer Qualität, die vor zehn Jahren noch kaum vorstellbar war. Die entscheidende Grundlage dieser Dienste sind Floating-Car-Daten (FCD), d.h. von im Strom mitfahrenden Fahrzeugen aufgezeichnete und an eine Zentrale übermittelte Bewegungsdaten. Die durch stationäre Messeinrichtungen erreichbare Aussagequalität fällt gegenüber FCD immer weiter zurück.

Nachdem anfangs die Betreiber solcher FCD-Systeme die erhobenen Daten nur für eigene Angebote wie Karten- und Navigationsdienste verwendet hatten, bieten sie jetzt auch historische Daten in unterschiedlicher Aufbereitung zum Kauf an. Es bietet sich also an, diese neue Datenquelle auch für die Analyse und Bemessung der Straßeninfrastruktur zu erschließen.

Im hier vorgestellten Projekt wird untersucht, wie FCD genutzt werden können, um in innerörtlichen Hauptverkehrsstraßennetzen die Fahrtgeschwindigkeiten im Kfz-Verkehr über Netzabschnitte zu ermitteln. Diese Ermittlung von mittleren Fahrtgeschwindigkeiten könnte dann als alternatives Verfahren im Sinn des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, FGSV 2015) zur Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten eingesetzt werden. Auch wenn die Nutzung von FCD auf die Bewertung bestehender Infrastruktur begrenzt ist, wäre das für die Bemessungspraxis ein großer Fortschritt, weil das im HBS enthaltene Berechnungsverfahren erhebliche Einschränkungen seiner Anwendbarkeit aufweist, insbesondere im Hinblick auf die Anwendung für hochbelastete Hauptverkehrsstraßen in Städten innerhalb von Ballungsräumen.

Auch unabhängig vom HBS-Kontext ist eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste historische Analyse der Verkehrsabläufe in einem Straßennetz, wie sie durch FCD möglich wird, in der kommunalen Planungspraxis von großem Nutzen. So können regelmäßige Störstellen lokalisiert und deren Ursachen identifiziert werden, was eine Engpass- und Mängelanalyse innerörtlicher Hauptverkehrsstraßennetze ermöglicht.

Ziel des Projekts ist es, zwei FCD-basierte Verfahren zu entwickeln:

1. Ein alternatives Verfahren (im Sinn des HBS) zur Bestimmung der mittleren Fahrtgeschwindigkeiten als Ausgangspunkt für die Beurteilung der Angebotsqualität von Netzabschnitten auf Hauptverkehrsstraßen.
2. Ein Verfahren zur Identifikation von strecken- oder knotenpunktbezogenen Engpässen als Grundlage für eine Engpass- und Mängelanalyse in innerörtlicher Hauptverkehrsstraßennetzen.

1.2 Projektüberblick

Die beschriebenen Arbeiten sind in mehreren Phasen entstanden: In der ersten Projektphase wurde die Ausgangslage analysiert und dargestellt. Dazu gehört der Stand der Technik bei der Erstellung und Nutzung von Floating-Car-Daten, eine Sammlung und vergleichende Analyse von Anbietern von FC-Daten und eine Beschreibung der bestehenden Methoden zur Bestimmung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Netzabschnitten, insbesondere der Berechnungsverfahren im HBS und deren wissenschaftlichen Hintergrunds.

In der zweiten Projektphase wurden an einer Menge von repräsentativ ausgewählten Netzabschnitten erprobt, wie gut sich Fahrtzeiten aus den verschiedenen FCD-Angeboten ermitteln lassen. Zum Vergleich wurden parallel Fahrtzeiten mit Geräten zur automatischen Kennzeichenerfassung als Referenzgrößen erfasst. Der Vergleich wurde dann noch ausgeweitet auf Fahrtzeiten, die nach dem im HBS beschriebenen Berechnungsverfahren berechnet wurden und auf Fahrtzeiten aus mikroskopischer Verkehrsflusssimulation, die im HBS als alternatives Verfahren aufgeführt werden. Um die Aussagekraft von FCD bei der Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf unter verschiedenen Randbedingungen (z.B. Durchdringungsgraden) systematisch untersuchen zu können, wurden auch künstliche FCD aus Verkehrssimulationen generiert.

In der dritten Projektphase wurden die nach der zweiten Phase zur Verfügung stehenden Kenngrößen aus FCD weiter aufbereitet und daraus Verfahren entwickelt, die eine an das HBS angelehnte Bewertung der Angebotsqualität erlauben. Dabei wurde insbesondere untersucht, wie eine Bemessungsstunde definiert werden kann, wenn statt Verkehrsbelastungen Fahrzeiten bzw. Fahrtgeschwindigkeiten betrachtet werden. Begleitend wurden in dieser Phase Visualisierungen betrachtet, die die Bewertung unterstützen können. Für den Prognosefall wurde untersucht, wie FC-Daten eingesetzt werden können, um mikroskopische Verkehrssimulationsmodelle zu kalibrieren, mit denen dann die Fahrtgeschwindigkeiten in der Prognose bestimmt werden können.

Als zweiter Schwerpunkt neben der Bewertung eines Netzabschnitts nach dem HBS wurde untersucht, wie auf Basis von FCD ganze Stadtstraßennetze automatisch nach kritischen Netzabschnitten durchsucht werden können. Dabei wurde ein Verfahren zur automatischen Erkennung und Bewertung von Netzabschnitten auf Basis eines OSM-Netzmodells entwickelt. Außerdem wurde untersucht, ob solche Verfahren auch bereits auf den Radverkehr ausgeweitet werden können.

Die Ergebnisse der vorherigen Projektphasen wurden abschließend in der vierten Projektphase bewertet und dokumentiert. Dazu wurden die Ergebnisse der verschiedenen Fahrtzeitbestimmungen vergleichend dargestellt und analysiert. Aus der Analyse wurden dann Empfehlungen für die Nutzung von FCD als alternatives Verfahren im HBS formuliert.

2 Grundlagen und Verfügbarkeit von Floating-Car-Daten

2.1 Technische Grundlagen

Floating Car Data (FCD) ist eine gängige Bezeichnung für anonymisierte, zeitgestempelte Positionsdaten von Fahrzeugen. Andere Bezeichnungen, die je nach Kontext und Land in der Literatur zu finden sind, sind *Probe Vehicle Data*, *Sampled Trajectories*, *Crowdsourced Trajectories* oder *Connected Vehicle Data*. Grundsätzlich beschreiben diese Begriffe Daten, die mit Hilfe von Positionserfassungstechnik an Bord von einzelnen Fahrzeugen in wiederkehrenden zeitlichen Intervallen oder bei bemerkenswerten Bewegungsereignissen generiert werden. Für die dabei notwendige Ortung der Fahrzeuge werden primär satellitengestützte Systeme wie das Global Positioning System (GPS) genutzt. Die Empfangsgeräte bestimmen die Position durch geometrische Berechnungen auf der Grundlage der Entfernungen zwischen dem Empfangsgerät und einer GPS-Satellitenkonstellation. Solche GPS-Empfangsgeräte können z.B. Flottenmanagement-Systeme, eingebaute oder nachgerüstete Autonavigationsgeräte und – zunehmend und fast schon dominierend – auch Smartphones sein. Zusätzlich zur reinen Positionserfassung können weitere Informationen wie die aktuelle Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Fahrtrichtung mit den Datenpunkten verknüpft werden. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit wird dabei der Dopplereffekt auf dem Satellitensignal oder behelfsweise die Zeit zur Durchquerung der Strecke zwischen zwei Positionsangaben genutzt. Die gesammelten Daten werden anschließend über das Mobilfunknetz an einen Zentralrechner geleitet und dort gesammelt. Die auf GPS oder vergleichbaren Systemen beruhende Positionsbestimmung ist in der Regel ausreichend, um in Verbindung mit algorithmischer Nachbearbeitung eine zuverlässige Aussage zum Ort des Fahrzeugs zu machen. Für die Qualität bzw. das Nutzungspotential der Floating-Car-Daten sind zwei andere Aspekte entscheidend: Der *Durchdringungsgrad*, d.h. welcher Anteil aller Fahrzeuge Informationen sendet, und die *Sendefrequenz*, d.h. wie oft die Fahrzeuge senden (auch *Abtastrate* genannt). Typische Sendefrequenzen in kommerziellen FCD-Systemen liegen bei 5 – 20 Sekunden. Die Durchdringungsgrade variieren stark je nach Betreiber und zwischen ca. 1 % und ca. 20 %.

Der gesamte Ablauf der Datenerfassung mit FCD wird in Bild 2-1 schematisch dargestellt.

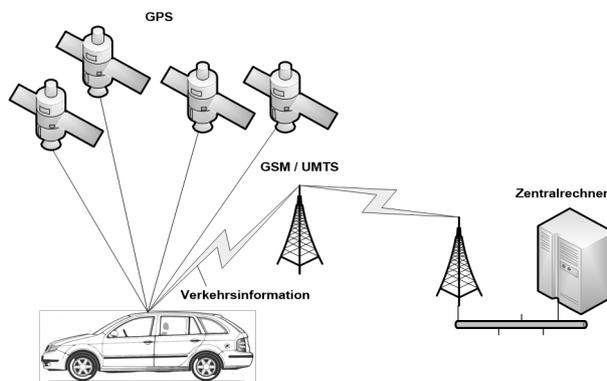


Bild 2-1: Funktionsweise der Datenerfassung mit FCD (Eigene Darstellung)

Geografische Koordinaten mit Zeitstempeln allein sind als Rohinformation für die Analyse des Verkehrsablaufes allerdings zunächst bedingt geeignet, weil sie noch keinen Bezug zum Straßennetz haben. Eine Abfolge solcher Punkte muss dafür noch in eine Trajektorie umgewandelt werden, die einem Weg auf dem Straßennetz zugeordnet werden kann. Dafür werden zunächst die GPS-Datenpunkte der nächstliegenden Kante in dem das Straßennetz darstellenden Graphen zugeordnet und anschließend alle Punkte eines Fahrzeuges zu einer Trajektorie verbunden. So kann in anschließenden Analysen festgestellt werden, ob das betreffende Fahrzeug einen bestimmten Straßenabschnitt oder -querschnitt (z.B. Haltlinie an einem zu bewertenden Knotenpunkt) überfahren hat, oder die Gesamtstrecke eines Fahrzeuges ermittelt werden. Die Informationen der einzelnen Datenpunkte werden dabei allerdings nicht aggregiert, sondern bleiben differenziert verfügbar, so dass auch die Betrachtung von Ausschnitten der Trajektorien weiterhin möglich

ist. Je geringer die Abtastrate der Trajektorien ist, also je weiter die einzelnen erfassten Positionen auseinanderliegen, desto anspruchsvoller ist dieser als *Map-Matching* bezeichnete Prozess der Trajektorienrekonstruktion. Die Aufgabe des Map-Matching ist nicht trivial, weil die gemeldeten Positionen je nach Empfangssituation der Ortung mit Ungenauigkeiten behaftet sind und im Bereich einiger Meter neben der Fahrbahn liegen können. Für eine zuverlässige Zuordnung der Position zu einer Strecke genügt in der Regel nicht, einfach die nächstliegende Strecke zu suchen, sondern die Map-Matching-Verfahren betrachten eine ganze Abfolge von Positionsmeldungen und berechnen dann die wahrscheinlichste gefahrene Route durch das Streckennetz. Für niederfrequente FCD sind Techniken, die Hidden-Markov-Modelle (NEWSON & KRUMM, 2009) verwenden, am weitesten verbreitet.

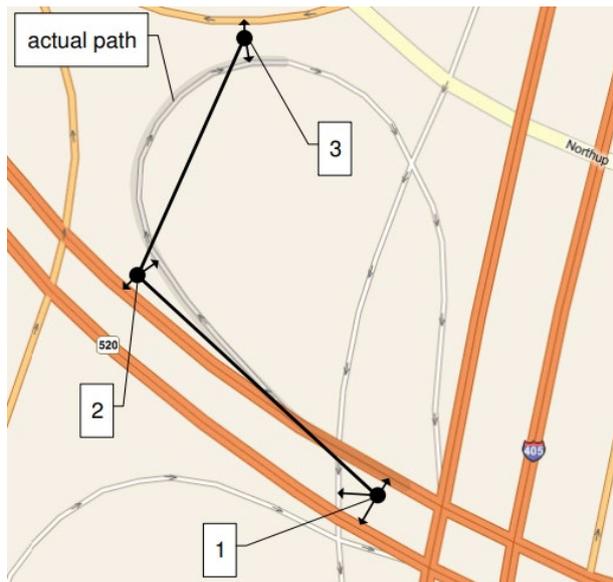


Bild 2-2: Darstellung eines Map-Matching-Prozesses von GPS-Positionen (schwarz) um einen Fahrtverlauf (grau) zu replizieren (NEWSON & KRUMM, 2009)

Neben den FCD, die ausschließlich aus Ortungs- und Kommunikationsgeräten innerhalb von Kraftfahrzeugen generiert werden, können Bewegungsdaten auch über Apps auf Smartphones gesammelt werden. Hierbei wird das jeweilige Smartphone entweder aktiv beim Verwenden der entsprechenden App oder passiv im Hintergrund per GPS geortet und die Position gemeinsam mit einer Identifikationsnummer und einem Zeitstempel gespeichert. Die aus diesen sogenannten *Location-Based-Services* (LBS) generierten Daten ermöglichen genau wie klassische FCD eine Betrachtung von Ortsveränderungen in Form von Trajektorien. Dabei enthalten sie aber auch Wege, die mit Verkehrsmitteln wie dem ÖPNV, dem Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegt wurden sowie intermodale Wege.

Vom Begriff der Floating-Car-Daten abgegrenzt werden muss eine andere Art der mobilen Datenerfassung, die sogenannten *Mobilfunkdaten* (siehe z.B. SCHLAICH et al., 2011). Auch hier stammen die Daten aus Mobiltelefonen, aber die Positionsbestimmung funktioniert über die Zellenstruktur des Mobilfunknetzes, durch die der Betreiber alle Geräte orten kann, die sich zu einem Zeitpunkt in einer Zelle befinden. Zur Verbesserung der Positionsbestimmung werden zusätzlich Informationen über die Signalstärke herangezogen. Aus diesen einzelnen Positionen kann nachfolgend, ähnlich wie bei FCD, die Trajektorie eines Smartphones rekonstruiert werden. Da die Genauigkeit der Positionsbestimmung in der Regel deutlich schlechter ist als bei GPS, sind diese Daten für eine kleinräumige Bestimmung der Verkehrslage allerdings weniger gut geeignet als FCD. Um Quelle-Ziel-Relationen für die Verkehrsplanung zu bestimmen, sind diese Daten jedoch ausreichend und somit gut geeignet. Die Bezeichnungen der Datenquellen FCD und Mobilfunkdaten haben sich insofern unglücklich entwickelt, als dass inzwischen auch ein Großteil der FCD aus Mobiltelefonen stammt. Ein formaler Unterschied zwischen den beiden Datenquellen ist, dass bei FCD das Gerät im Fahrzeug aktiv und bewusst Informationen an eine Zentrale sendet, wohingegen bei Mobilfunkdaten der Betreiber die Geräte orten kann, ohne dass diese an der Ortung aktiv (über die Anmeldung

an einer Funkzelle hinaus) teilnehmen. Der größte praktische Unterschied ist die sehr unterschiedliche Genauigkeit der Positionsbestimmung durch GPS und durch Funkzellen.

Anders als bei FCD, die gemäß Definition ausschließlich aus Kraftfahrzeugen stammen, muss bei LBS- und Mobilfunkdaten noch das Verkehrsmittel rekonstruiert werden. Diese nachträgliche Erkennung des Verkehrsmittels geschieht auf Grundlage der Eigenschaften der Trajektorien. Zu diesen Eigenschaften zählen Informationen wie die Gesamtdistanz der Bewegung oder die durchschnittliche Geschwindigkeit (YANG et al., 2018). Je länger eine Trajektorie zwischen zwei Aktivitäten ist und je schneller diese Strecke zurückgelegt wurde, desto wahrscheinlicher ist die Nutzung eines motorisierten Verkehrsmittels. Laut der Untersuchung von YANG et al. (2018) kann zusätzlich die Geometrie der Trajektorien zur Bestimmung des Verkehrsmittels herangezogen werden. Dabei wird angenommen, dass die Trajektorien von Fußgängern eine komplexere Geometrie aufweisen können, da sie sich im Gegensatz zu motorisierten Verkehrsmitteln nicht an Straßen- oder Schieneninfrastruktur halten müssen. Falls das Smartphone der LBS-Anwendung eine lokale Vorverarbeitung zulässt, kann auch ein Beschleunigungsverlauf direkt aus den Beschleunigungssensoren beobachtet werden, aus dem wiederum Hinweise über das verwendete Verkehrsmittel gewonnen werden können.

2.2 Verfügbarkeit und Anbieter

Für eine Anwendung in Planung und Bemessung müssen FC-Daten öffentlich oder kommerziell zugänglich sein. Ungefähr seit 2010 hat sich eine Wertschöpfungskette für die kommerzielle Nutzung von Floating-Car-Daten entwickelt. Während die datenerzeugenden Parteien die Daten meist eher als Nebenprodukt produzieren, begannen neue Akteure, die Beschaffung von Rohdaten verschiedener Anbieter zu übernehmen und einheitliche Daten-Pools zu bilden, aus denen dann dem Markt mehr oder weniger frei definierbare geografische Ausschnitte und Zeitfenster zur Verfügung gestellt werden können.

FC-Daten werden von den Anbietern entweder als Rohdaten oder als aggregierte Daten geliefert. *Rohdaten* bestehen im Wesentlichen aus den einzelnen Positionsmeldungen der Fahrzeuge und enthalten meistens eine Fahrzeugidentifikation, einen Zeitstempel, die Position in geografischen Koordinaten und die an der gemeldeten Position gefahrene Geschwindigkeit. Bei einigen Anbietern kann optional gewählt werden, ob auch ein Bezug zum Straßennetz hergestellt werden soll (*Map-Matching*). Dazu ist ein Bezug auf eine digitale Straßenkarte notwendig, für den entweder eine anbieterspezifische Karte oder häufig auch die frei verfügbare Karte von OpenStreetMap verwendet wird.

Bei *aggregierten Daten* hat der Anbieter aus den Rohdaten bereits die Fahrzeiten der Fahrzeuge auf den Streckenabschnitten eines zu Grunde gelegten Netzmodells errechnet. Als Ergebnis geliefert wird mindestens der Mittelwert der Fahrzeiten pro Streckenabschnitt, eventuell auch die Verteilung der Fahrzeiten, zum Beispiel in Schritten von 5 %-Perzentilen. Da die Aggregation räumlich auf Streckenabschnitten geschieht, setzen aggregierte Daten den Bezug zu einem Netzmodell voraus, auf das die Rohdaten bei der Verarbeitung gemacht werden. Die Aggregation hat auch immer eine zeitliche Dimension; die Anwender können in der Regel angeben, für welchen Zeitraum die FC-Daten aggregiert werden sollen. Je nach Anwendung können Zeitintervalle von wenigen Minuten bis zu mehreren Monaten sinnvoll sein. In der Regel geben die Anbieter auch an, wie viele Fahrzeuge in den Mittelwert oder die Verteilung der Fahrzeiten im Bezugszeitraum eingegangen sind. Aus dieser Angabe kann der Durchdringungsgrad abgeschätzt werden, wenn die Gesamtverkehrsmenge zumindest stellenweise bekannt ist.

Wie repräsentativ die aus den FC-Daten abgeleiteten Informationen sind, hängt neben dem Durchdringungsgrad wesentlich davon ab, aus welcher Fahrzeugflotte der Anbieter seine Rohdaten erhält. Für eine einfache Störungserkennung ist es relativ unbedeutend, welche Fahrzeuge ihre Positionen senden, da bei einem Stau alle Fahrzeuge gleichermaßen betroffen sind. Deshalb reicht es dafür auch aus, die Trajektorien weniger Fahrzeuge zu kennen. Für eine zuverlässige Ermittlung der Fahrzeitverteilung z.B. für Bemessungszwecke ist dagegen relevant, ob die meldenden Fahrzeuge eine repräsentative Teilmenge der Gesamtflotte darstellen. Bezieht ein Anbieter seine Rohdaten zum Beispiel aus einer Flotte kommerzieller Lieferfahrzeuge oder aus den Neuwagen eines Fahrzeugherstellers, ist mit Verzerrungen zu rechnen. Die Anbieter sind bei Auskünften über ihre Datenlieferanten meistens sehr zurückhaltend. In der Analyse von Rohdaten ist auch erkennbar, dass in den Daten verschiedener Anbieter zum Teil die gleichen Fahrzeuge identifizierbar sind, was darauf hindeutet, dass es im Hintergrund einen regen Handel mit den FC-Rohdaten

einzelner Flotten gibt. Anwender sollten sich zumindest bei Anbietern mit niedrigen Durchdringungsgraden darüber informieren, welche Art von Fahrzeugen in den Daten enthalten ist. Bei Anbietern mit hohen Durchdringungsgraden (> 10 %) kann davon ausgegangen werden, dass das Problem der Repräsentativität gering ist.

Auch wenn die Anzahl von Anbietern für FC-Daten in den letzten Jahren eher zunimmt, ist gleichzeitig eine Tendenz zu erkennen, dass die Geschäftsmodelle der Anbieter sich vom Verkauf von rohen oder aggregierten Daten wegbewegen hin zu standardisierten Auswertungen dieser Daten als Dienstleistung. Aktuell existieren noch einige Anbieter von Roh-FC-Daten. Dort lassen sich für einen räumlichen Ausschnitt (je nach Anbieter frei definierbares Polygon oder vorgegebene Regionen, z.B. administrative Gebietsgrenzen) für einen bestimmten Zeitraum alle enthaltenen Meldungen käuflich erwerben; der Preis orientiert sich in der Regel an der Menge der enthaltenen Daten. Bei Anbietern aggregierter Daten kann der räumliche und zeitliche Umgriff im Prinzip genauso definiert werden, nur werden hier die Informationen auf Abschnitte eines zu Grunde gelegten digitalen Straßennetzes bezogen. Als weitere Möglichkeit der räumlichen Abgrenzung kann statt eines Gebiets auch ein Streckenzug angegeben werden. Einige Anbieter wickeln den Verkauf der Daten noch traditionell ab, d.h. Anfrage – Angebot – Bestellung – Rechnung, während andere Anbieter auf Self-Service-Portale im Web setzen. Diese Entwicklung kann so weit gehen, dass im Self-Service-Portal komplette Analysen des Verkehrszustands in einer Stadt oder einem Stadtteil gekauft werden können. Solche Komplett-Analysen scheinen allerdings bisher keinen Bezug zu den im technischen Regelwerk der Bemessung genannten Kenngrößen zu haben.

Im Rahmen des Projekts wurden die in Deutschland verfügbaren Anbieter für FCD ermittelt. Dabei wird zwischen Anbietern für aggregierte Daten und für Rohdaten unterschieden, da nicht jeder Anbieter beide Arten von FCD anbietet. Die Entwicklung des Markts für FCD ist ziemlich dynamisch, d.h. es kommen laufend neue Anbieter hinzu oder Anbieter verändern ihre Produkte. Die folgende Darstellung beschreibt die Situation im Jahr 2022. In Folgenden werden die Anbieter nicht namentlich genannt, einerseits wegen eben der veränderlichen Situation im Markt und andererseits, weil eine bewertende Gegenüberstellung explizit vermieden werden soll. Trotzdem gibt die Aufzählung einen Eindruck von der Breite und Vielfalt des Angebots.

2.2.1 Anbieter von aggregierten FCD

Für aggregierte Daten konnten in Deutschland vier Anbieter identifiziert werden. Zur Abfrage von regions- und zeitspezifischen Daten stellen diese Anbieter entweder Programmierschnittstellen (API) oder eigens entwickelte Auswertewerkzeuge zur Verfügung. Da für die Aggregation der Daten ein Bezug auf das Straßennetz notwendig ist, bieten alle Anbieter jeweils ein eigenes Netzmodell an, auf das die Daten referenziert sind. Alle vier Anbieter aggregierter FCD waren ursprünglich Anbieter von digitalen Karten und Navigationdiensten. Falls ein Anwender der FCD ein eigenes Netzmodell verwendet, ist eine Abbildung zwischen den zwei Netzmodellen notwendig, was eine algorithmisch anspruchsvolle Aufgabe sein kann.

Der Zugang zu den Daten wird von den Anbietern unterschiedlich gestaltet. Erkennbar ist, dass alle Anbieter wenig Aufwand in die Bedienung von Anfragen von Endkunden aus Verkehrsplanung und Verkehrstechnik für kleine Mengen an Daten investieren wollen. Gezielt wird vor allem auf Geschäftskunden, die in großem Umfang Daten abnehmen und in eigenen Anwendungen weiterverwerten. Entsprechend werden eher Plattformen und Schnittstellen für Entwickler angeboten. **Anbieter 1** ermöglicht beispielsweise mit einer web-basierten Programmierschnittstelle die Ermittlung von Fahrzeiten zwischen zwei definierten Punkten in Form einer URL-Abfrage. Die Ergebnisse basieren dabei auf aktuellen und historischen FCD sowie darauf aufbauenden Prognosemodellen. **Anbieter 2** bietet auf seiner „Plattform“ verschiedene Dienste für verschiedene Branchen an; hier werden als Anwendungsgebiete „Urban Mobility“ und „Infrastrukturplanung“ genannt, aber in beiden Fällen ist damit nicht gemeint, dass Daten für ein einzelnes Bemessungsprojekt angeboten werden. Auch **Anbieter 3** bietet eine Analyseplattform an, mit der Verkehrsdaten aus einer Datenbank abgerufen werden können, um damit Analysen der Geschwindigkeiten in einem definierten Bereich durchzuführen. Dabei können z.B. historische Durchschnittsgeschwindigkeiten oder Perzentile der aufgezeichneten Geschwindigkeiten extrahiert und direkt innerhalb der Plattform visualisiert werden. Mit einer speziellen Funktion ermöglicht der Anbieter die Erstellung von Raum-Zeit-Grafiken zur Analyse von Problemstellen entlang einer Straße.

Anbieter 4 bietet in einem Selbstbedienungsportal an, sich historische Fahrtzeitverteilungen für eine Route im Straßennetz oder für alle Straßensegmente in einem Gebiet in einem definierbaren Zeitraum ausgeben zu lassen. Dazu ist ein Bezahlssystem implementiert, in dem Nutzer Guthaben einzahlen können, von denen dann je nach für die Auswertung notwendiger Datenmenge abgebucht wird.

Die **Anbieter 3 und 4** bieten für Nutzer aus Verkehrsplanung und Verkehrstechnik auch einen klassischen Vertrieb (mit Angebotserstellung und einmaliger Bereitstellung von auch kleineren Mengen von Daten) über Vertriebspartner aus der Verkehrsplanungsbranche an, wobei ein Vertriebspartner als zusätzliche Dienstleistung die Daten in einer Form bereitstellt, die direkt in marktgängige Softwarewerkzeuge für Verkehrsplaner übernommen werden kann.

2.2.2 Anbieter von FCD-Rohdaten

Aggregierte Floating-Car-Daten sind zwar vergleichsweise einfach in der Handhabung, sind aber aufgrund der fehlenden Möglichkeit der Analyse des Fahrtverlaufes von Einzelfahrzeugen nicht für alle Anwendungsfälle nutzbar. Zusätzlich sind die Methoden, die die Anbieter zur Datenaufbereitung nutzen (z.B. Map-Matching, Bildung von Mittelwerten, Behandlung von Ausreißern), nicht immer transparent. Daher ist es in manchen Fällen vorteilhaft, auf FCD-Rohdaten zurückzugreifen, auch wenn dann beim Nutzer noch eine zusätzliche Aufbereitung notwendig ist, die gewisses Maß an technischer Datenkompetenz erfordert. Auch für FCD-Rohdaten existieren in Deutschland einige Anbieter:

Anbieter 3, der in der Regel aggregierte FCD vertreibt, bietet auf Anfrage auch Rohdaten an. Über die hinter den Daten liegende Fahrzeugflotte gibt es keine Informationen, es ist aber erkennbar, dass in den Daten Fahrzeuge enthalten sind, die auch in den Daten von Anbieter 6 enthalten sind. Dies ist ein Beleg dafür, dass sich inzwischen ein Markt für Zwischenhandel mit FCD gebildet hat, also die Daten nicht mehr nur von ihren Herstellern vermarktet werden. Der Durchdringungsgrad bei Anbieter 3 variierte bei den im Projekt beschafften Daten regional zwischen 2 % und 4 %. Der beim Kauf der Daten zu wählende räumliche Ausschnitt folgt in der Regel administrativen Grenzen. Im Datensatz sind dann alle Trajektorien enthalten, die im ausgewählten Zeitraum den ausgewählten räumlichen Ausschnitt berührt haben, d.h. es werden auch Daten außerhalb des gewählten Raums mitgeliefert.

Anbieter 5 sammelt FCD in Deutschland und stellt diese zum Kauf zur Verfügung. Dabei bezieht er seine Daten von einem Flottenbetreiber sowie dem Anbieter einer Smartphone-App und fügt diese zu einem konsolidierten Datensatz zusammen. Die Daten des Flottenbetreibers stammen dabei laut eigenen Angaben vermutlich zu einem Großteil aus Lastkraftwagen von Speditionen. Die Daten im zusammengefassten Datensatz setzen sich in etwa jeweils zur Hälfte aus den beiden Quellen zusammen. Genauere Informationen über die Flotten und den Durchdringungsgrad stellt der Anbieter nicht bereit. Die einzelnen Datenpunkte enthalten auch eine Fahrzeug-Identifikationsnummer (Track-ID). Die im Datensatz enthaltene Track-ID ist dabei jeweils für einen Tag konstant. Aus den einzelnen Datenpunkten lassen sich entsprechend alle vom Fahrzeug absolvierten Wege eines Tages in Form von Trajektorien abbilden. In der Nacht wechselt die Track-ID des jeweiligen Gerätes dann, wodurch tagesübergreifende Analyse nicht direkt möglich sind. Außerdem ist im Datenpunkt ersichtlich, ob die Quelle der Flottenbetreiber oder die Smartphone-App ist. Die Daten werden in vom Anbieter definierten räumlichen Kacheln (Diagonale ca. 140 km) bereitgestellt.

Anbieter 6 bezieht seine Ausgangsdaten aus einer einzigen Quelle, bei dem es sich um den Anbieter einer Smartphone-App handelt. Bei den gelieferten Daten handelt es sich um eine Zusammenfassung von Daten aus zwei verschiedenen Applikationen. So erklärt sich auch, dass die Sendefrequenz zwei klare Peaks bei 3 und 15 Sekunden Abstand zwischen zwei Erfassungen hat. Anbieter 6 hat nach eigenen Angaben einen Gesamtdurchdringungsgrad von ungefähr 3 %, der aber je nach Straßentyp sehr unterschiedlich ausfallen kann. Da es sich beim Datenursprung vermutlich um eine Navigations-App handelt, sinkt dieser Durchdringungsgrad in Bereichen, in denen Navigation weniger genutzt wird. Die einzelnen datenliefernden Geräte erhalten jeweils eine Track-ID, die bei jedem Neustart der App und spätestens einmal in der Nacht zurückgesetzt wird.

Anbieter 6 ermöglicht den Export von Daten anhand einer vom Nutzer definierten sogenannten Bounding-Box. Der Nutzer definiert hierzu ein Raumpolygon, anhand dessen ein räumlicher Filter über den gesamten Datensatz ausgeführt wird. Das bedeutet, dass nur die Datenpunkte innerhalb des definierten Gebietes

extrahiert und somit Trajektorien an den Rändern des Gebietes abgeschnitten werden. Auch den Zeitraum den benötigten Daten kann der Nutzer frei wählen. Die Preise für FCD-Rohdaten sind direkt abhängig von der Anzahl an verzeichneten Datenpunkten im vom Nutzer gewählten Gebiet. Gegen einen Aufpreis werden die Daten auf das OSM-Netz referenziert geliefert, d.h. der Anbieter übernimmt das Map-Matching.

Auch bei Anbieter 6 ist erkennbar, dass er das Geschäftsmodell weg vom Verkauf von Rohdaten hin Auswertungen als standardisierten Dienstleistungen entwickeln will. So bietet er eine Online-Plattform an, in der Analysen zu Verlustzeiten, Engpässen oder Parkraum sowie die Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen angeboten werden.

Anbieter 7 ist ein Anbieter für FCD und andere fahrzeugbezogene Daten, der relativ neu auf dem Markt ist und international sein Geschäft ausbaut. Er bezieht seine Ausgangsdaten direkt von verschiedenen Fahrzeugherstellern und Flottenbetreibern, die ihm Daten aus den Fahrassistenzsystemen ihrer Fahrzeuge zur Verfügung stellen. Neben der reinen Positionsangabe mit Zeitstempel kann der Anbieter dadurch nach eigenen Angaben auch den Fahrzeugtyp sowie zusätzliche Informationen über die aktuellen Gegebenheiten im und um das Fahrzeug abrufen. Dies beinhaltet beispielsweise die Temperatur außerhalb des Fahrzeuges, den Status der Regensensoren oder die Entfernung zum nächsten vorausfahrenden Fahrzeug. Zusätzlich bezieht der Anbieter Daten zu Verkehrszeichen von öffentlichen Stellen sowie Betreibern von Telematiksystemen.

Der Anbieter sammelt diese Daten, bringt sie in ein einheitliches Format und stellt sie auf seiner Online-Plattform über eine standardisierte Programmierschnittstelle zur Verfügung. Hier kann der Nutzer die benötigten Daten anhand eines Polygons ausschneiden und dann für einen Zeitraum exportieren. Dabei kann genau festgelegt werden, welche Informationen aus der Datenbank exportiert werden. Die Preise sind abhängig von der Anzahl an exportierten Datenpunkten, wobei die Anzahl an ausgewählten Attributen anscheinend keinen Einfluss auf den Preis hat.

2.3 Verarbeitung von FC-Daten

Wie bereits oben beschrieben, sind einige vorbereitende Arbeitsschritte notwendig, um aus den FCD-Rohdaten Informationen zur Bestimmung der Verkehrsqualität ableiten zu können. Diese Arbeitsschritte gliedern sich grob in drei Arbeitsbereiche und werden im Folgenden erläutert, um darauf aufbauend anhand eines Beispiels mit Daten eines Anbieters zu demonstrieren, wie Fahrtzeiten aus Roh-FCD bestimmt werden. Der Ablauf ist auf Daten von anderen Anbietern übertragbar. Ebenso sind die beschriebenen Softwarewerkzeuge beispielhaft zu verstehen. Sie beschreiben die Werkzeuge, die bei der Projektbearbeitung verwendet wurden. Es gibt viele freie verfügbare Werkzeuge zur Verarbeitung und Analyse von Daten, wie sie bei FCD typischerweise vorliegen, z.B. der freie Programmiersprache Python und die ebenfalls freien Bibliotheken Pandas und GeoPandas zur effizienten Handhabung großer tabellarischer oder raumbezogener Datenmengen. Auch für den Prozess des Map-Matching gibt es mehrere freie Bibliotheken, die u.a. von Python aus genutzt werden können.

2.3.1 Zeitliches und räumliches Filtern der Rohdaten

Im ersten Arbeitsschritt werden die vom Datenanbieter gelieferten Daten sortiert und gefiltert. Besonders das Filtern der Daten für den jeweiligen Anwendungsfall (z.B. ein Streckenabschnitt innerhalb einer Woche) ist bei der Arbeit mit FCD aufgrund der oft großen Datenmengen wichtig. Um die Rechenzeiten der späteren Arbeitsschritte, insbesondere des Map-Matching, möglichst gering zu halten, sollte die Anzahl der zu verarbeitenden Datenpunkte nicht größer sein als nötig.

Die FC-Rohdaten wurden im Rahmen des hier berichteten Projekts zunächst in ein einheitliches Format gebracht, das eine weitere Datenverarbeitung unabhängig vom jeweiligen Format des Anbieters ermöglicht. Die Daten werden eingelesen und in das in Tabelle 2.1 beispielhaft dargestellte Format überführt. Der resultierende Datensatz enthält für jeden erfassten GPS-Punkt einen Zeitstempel in Unixzeit, den Breiten- und Längengrad, die Geschwindigkeit in km/h sowie die Fahrtrichtung als Abweichung vom geographischen Nordpol in Grad im Uhrzeigersinn. Um eine spätere Auswahl von Datenpunkten einzelner Tage zu ermöglichen, werden die Datenpunkte dann nach dem jeweiligen Aufzeichnungstag gruppiert und in einzelne CSV-Dateien geschrieben, die in einem gemeinsamen Verzeichnis abgelegt werden. Innerhalb des

Tages werden die Daten nach Fahrzeug-ID und Zeitstempel sortiert. (Diese Sortierungen sind nicht unbedingt notwendig, wenn die Gesamtmenge an FD-Daten nicht groß ist, z.B. wenn nur eine geringe räumliche Ausdehnung vorliegt.)

Fahrzeug-ID	Zeitstempel	Breitengrad	Längengrad	Geschwindigkeit	Fahrtrichtung
427df84682e8	1530444155	52.12225	8.70574	52	172
427df84682e8	1530444164	52.12131	8.705722	22	191
427df84682e8	1530444170	52.12118	8.705668	18	204
427df84682e8	1530444179	52.120937	8.706206	32	94
427df84682e8	1530444185	52.120983	8.706963	38	75
427df84682e8	1530444195	52.12181	8.70886	62	43

Tabelle 2.1: Vereinheitlichtes Format der FCD vor der Weiterverarbeitung

Im Anschluss wurden die Daten in das am Institut für Verkehr und Stadtbauwesen der TU Braunschweig entwickelte „fcd analytics simplified tool“ (fansi-tool) importiert (s. Bild 2-3). Dazu wird in der Anwendung zunächst ein räumlicher Bereich in Form eines Raumpolygons ausgewählt, für den die Daten importiert werden sollen. Für das Projekt werden dann nur die Datenpunkte aus dem Gesamtdatensatz herausgefiltert, die an den ausgewählten Tagen aufgezeichnet wurden und deren GPS-Koordinaten innerhalb des festgelegten Bereiches liegen. Somit liegen in der weiteren Arbeit nur die Trajektorien vor, die innerhalb des definierten Raumes liegen. Abschnitte der aufgezeichneten Fahrten, die vor oder hinter dem Auswertebereich liegen, werden nicht verarbeitet.

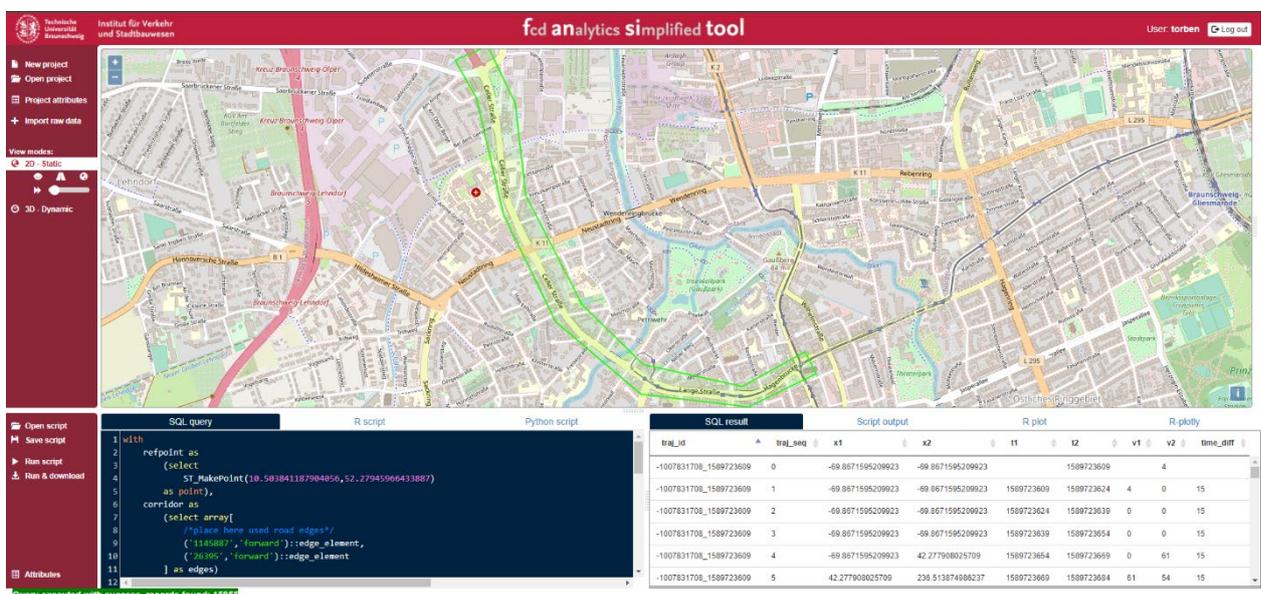


Bild 2-3: Räumliche Definition der Untersuchungsstrecke (grün umrandet) im fansi-tool am Beispiel Braunschweig

2.3.2 Map-Matching

Nach Formatierung und Filterung der Daten erfolgt das Map-Matching der Daten. Wie in Kapitel 2.3.4 dargestellt wird, können aus Roh-FCD auch ohne Map-Matching Fahrtzeiten und andere planerisch nutzbare Kenngrößen ermittelt werden. Durch Map-Matching wird die Fahrtzeitbestimmung aber genauer; außerdem werden die FCD dahingehend besser ausgenutzt, dass ein größerer Anteil der aufgezeichneten Fahrten in

die Auswertungen eingehen kann. Map-Matching ist mit erheblichem Rechenaufwand verbunden, deshalb ist die Abwägung, ob dieser zusätzliche Aufwand investiert wird, vom Anwendungsfall abhängig.

Beim Map-Matching werden die Datenpunkte, die in Form von GPS-Koordinaten (Längen- und Breitengrad) vorliegen, auf die Kanten des Straßennetzes projiziert. Hierbei muss beachtet werden, dass mittels GPS aufgezeichnete Positionen einem räumlichen Fehler unterliegen können. Dieser Positionsfehler kann während des Map-Matchings besonders im innerstädtischen Bereich dazu führen, dass ein Datenpunkt auf eine falsche Kante im Straßennetz projiziert wird. So kann im Map-Matching beispielsweise statt eines Halts an einer Lichtsignalanlage eine Kehrtwende in die Gegenrichtung eingefügt werden. Um derartige Fehler während des Map-Matchings zu vermeiden, wird vor Beginn des Prozesses ein Clustering aller Datenpunkte durchgeführt, die höchstens 30 m voneinander entfernt liegen und in einem Abstand von weniger als 60 s aufgezeichnet wurden.

Für den Map-Matching-Prozess wird die Open-Source Bibliothek „Barefoot“¹ genutzt, die von BMW Car IT entwickelt wurde. Die Bibliothek bietet die Möglichkeit, basierend auf dem freien digitalen Straßennetz von Open Street Map (OSM) einen lokalen Map-Matching-Server zu installieren, die mit Hilfe eines Hidden-Markov-Modells (NEWSON & KRUMM, 2009) die Wege der Fahrzeuge entlang der Kanten rekonstruiert. Bevor der Map-Matching-Prozess gestartet wird, werden die Datenpunkte mit einer gleichen Fahrzeug-ID zu einer Sequenz an Aufzeichnungen zusammengesetzt. Dabei wird jeweils der zeitliche Abstand zwischen den Datenpunkten berücksichtigt. Liegt der Zeitstempel zwischen zwei Aufzeichnungen über einem Schwellenwert (in diesem Fall 60 Sekunden), wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug in der Zwischenzeit für eine Aktivität gehalten hat und die Sequenz wird an diesem Punkt geteilt. Für jede der identifizierten Sequenzen wird anschließend mit Hilfe der Map-Matching-Engine bestimmt, welche die wahrscheinlichste Route ist, die das Fahrzeug zur Durchquerung der erfassten Punkte genommen haben könnte. Das verwendete Hidden-Markov-Modell erster Ordnung bestimmt dabei die wahrscheinlichste Position jedes erfassten Datenpunktes auf einer der umliegenden Kanten in einem rekursiven Prozess auf Grundlage des vorangegangenen Punktes. Dabei werden für jeden Datenpunkt zunächst die Kanten ermittelt, auf der das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Erfassung gefahren sein könnte. Dies geschieht unter der Annahme, dass die wahrscheinlichste Kante die Kante ist, die am nächsten am erfassten Punkt liegt. Im zweiten Schritt wird dann eine Wahrscheinlichkeit für jede mögliche Route zwischen dem vorangegangenen Datenpunkt und den identifizierten möglichen Kanten für den aktuellen Punkt bestimmt. Durch die Multiplikation der beiden Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Kombinationen aus Kante und Route kann dann die wahrscheinlichste Kombination ermittelt werden.

Im Datensatz, der nach dem Map-Matching vorliegt, sind nicht mehr einzelne Datenpunkte enthalten, sondern die einzelnen Segmente der Trajektorien, die zwei Datenpunkte miteinander verbinden. Jede dieser Verbindungen enthält die Information über die Trajektorie, der diese Verbindung zugeordnet wird und an welcher Stelle dieser Trajektorie die Verbindung liegt. Die Verbindung wird dann zum einen über die Abfolge der befahrenen Kanten im Netz und zum anderen durch eine Geometrie in Form einer Linie charakterisiert. Zusätzlich sind die Zeitstempel und die Geschwindigkeiten der beiden Punkte hinterlegt.

2.3.3 Berechnung von Fahrtzeiten mit Map-Matching

Nachdem die Daten innerhalb des Untersuchungsbereiches auf das vorliegende Straßennetz projiziert wurden, muss das Format der Daten angepasst werden, um daraus Fahrtzeiten entlang des definierten Abschnittes ableiten zu können. Die Daten werden hierzu mit Hilfe von SQL-Abfragen formatiert. Zunächst wird ein Referenzpunkt für Abstände entlang des jeweiligen Streckenzuges definiert. Für die Bestimmung der Fahrtzeiten entlang einer Untersuchungsstrecke wird für diesen Referenzpunkt ein Punkt ausgewählt, der am Beginn der Strecke liegt. Anschließend wird der Verlauf der Untersuchungsstrecke als eine Abfolge von Kanten im Netzwerk definiert. Dazu werden die jeweiligen Kanten im Netzmodell ausgewählt und deren ID in die Abfrage übertragen. Je nach dem Ziel der Untersuchung können so die Trajektorien herausgefiltert werden, die eine gewählte Untersuchungsstrecke oder einzelne darin liegende Netzabschnitte vollständig durchfahren haben.

¹ Verfügbar unter: github.com/bmwcarit/barefoot

Nach Ausführen der SQL-Abfrage liegen die FCD dann in einem Format vor, das für jedes Segment zwischen zwei Datenpunkten aus den Rohdaten sowohl die Zeitstempel der beiden Punkte als auch die jeweilige räumliche Entfernung der GPS-Punkte enthält. Diese Entfernung wird über die Addition der Länge der Kanten zwischen dem GPS-Punkt und dem definierten Startpunkt der Untersuchungsstrecke ermittelt und ist demnach nicht die direkte Luftlinie, sondern die Fahrstrecke zwischen den Punkten. Aus diesen Informationen wird nachfolgend die genaue Fahrstrecke sowie Fahrzeit zwischen zwei Punkten entlang der Untersuchungsstrecke bestimmt.

Um die Fahrzeit zwischen mehreren Punkten entlang der Untersuchungsstrecke zu bestimmen, werden diese Punkte durch ihre Distanz zum vorher festgelegten Referenzpunkt definiert. Anschließend wird dann für jede erfasste Trajektorie die Fahrzeit zwischen den jeweils ausgewählten Punkten berechnet. Dazu wird für die angegebenen Punkte ein Zeitstempel aus den vorliegenden Datenpunkten interpoliert und anschließend die Differenz dieser Punkte gebildet.

Das Ergebnis ist eine Fahrzeitverteilung aus den vorliegenden FCD. Diese Verteilung ermöglicht die Auswertung beliebiger Perzentil-Werte. Zusätzlich ist jede Fahrzeit im resultierenden Datensatz mit dem Zeitpunkt verknüpft, an dem sie aufgezeichnet wurde. Durch diese Verknüpfung wird es möglich, Fahrzeiten innerhalb definierter Zeitbereiche, wie z.B. die Zeit einer Maßnahme, zu extrahieren und separat auszuwerten. Diese Möglichkeit der flexiblen Auswertung von Fahrzeitverteilungen unterhalb der Zeitspanne des Gesamtdatensatzes stellt einen großen Vorteil bei der Nutzung von FCD-Rohdaten dar.

2.3.4 Berechnung von Fahrzeiten ohne Map-Matching

Aus Roh-FCD können auch ohne Map-Matching Fahrzeiten bestimmt werden. Dazu werden um den Start- und den Endquerschnitt Fangradien von 10 - 50 m gelegt. Alle Fahrzeuge, die sowohl im Start- als auch im Ziel-Fangradius mindestens eine Positionsmeldung geliefert haben, gehen in die Fahrzeitbestimmung ein. Sind in einem Fangradius mehrere Meldungen eines Fahrzeugs enthalten, wird die dem ausgewählten Messquerschnitt am nächsten gelegene Meldung ausgewählt. Die Fahrzeit ist dann die Zeit zwischen den Meldungen im Start- und im Ziel-Fangradius. Vom Prinzip her ist dieses Vorgehen vergleichbar mit einer Fahrzeitmessung durch Bluetooth-Detektion. Sie ist insbesondere mit den gleichen Problemen behaftet, z.B. dass die Messung nicht genau an den definierten Querschnitten beginnt und endet, und dass nicht sichergestellt ist, dass nur Fahrzeuge in der beabsichtigten Fahrtrichtung erfasst werden. Mit Hilfe einer einfachen Filterung von Ausreißern ist aber eine unkomplizierte Schätzung der Fahrzeiten möglich, ohne dass dazu ein digitales Straßennetzmodell herangezogen werden muss. Eine solche Auswertung kann mit wenigen (< 40) Zeilen Python-Code realisiert werden. In Bild 2-4 sind für eine Messung auf einem Netzabschnitt erfassten Meldungen im Start- und im Ziel-Fangradius auf einer Karte dargestellt.



Bild 2-4: Fahrzeitmessung ohne Map-Matching: Erfasste Fahrzeugmeldungen in den Start- und Ziel-Fangradien (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

2.3.5 Berechnung von mittleren Fahrtgeschwindigkeiten

Das HBS-Verfahren zur Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten fußt auf einer Analyse der mittleren Fahrgeschwindigkeiten auf dem betrachteten Netzabschnitt. Mit Hilfe der aus FCD ermittelten Fahrzeiten kann eine solche mittlere Fahrgeschwindigkeit für ein beliebiges Zeitintervall berechnet werden.

Definiert wird diese mittlere Fahrgeschwindigkeit v_m als der Quotient der Gesamtstrecke d , die von Fahrzeugen innerhalb des Zeitraumes zurückgelegt wird, und ihrer Gesamtfahrzeit t (MORI et al., 2015). Dies kann in dem folgenden Term formuliert werden:

$$v_m = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

2.4 Visualisierungen

Für die Analyse von raum-zeitlichen Zusammenhängen des Verkehrsablaufs eignen sich sogenannte Raum-Zeit-Plots, die ausgewählte Kenngrößen in Form einer visuellen Darstellung in einen räumlichen und zeitlichen Bezug setzen. Dadurch ist es intuitiv möglich, Orte entlang der Strecke sowie Zeiträume in Tagesverlauf zu identifizieren, an denen es zu Problemen im Verkehrsablauf kommt. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Visualisierung von Floating-Car-Daten vorgestellt.

2.4.1 Scatter-Plot auf einer Karte

Die einfachste Darstellung roher FC-Daten besteht darin, für jede einzelne Meldung einen Punkt an der gemeldeten Position in einem Koordinatensystem mit oder ohne Kartenhintergrund zu zeichnen und diesen Punkt nach der gemeldeten Geschwindigkeit einzufärben. Je nach Durchdringungsgrad und Beobachtungsdauer ergibt sich eine unterschiedliche Punktedichte. Ein solches Diagramm ist z.B. in der Programmiersprache Python mit Hilfe von freien Bibliotheken mit wenigen Zeilen Code realisierbar. In Bild 2-5 sind zwei solcher Bilder dargestellt, einmal für einen einzelnen Dienstag im September 2021 und einmal für alle Werktage im September. Der Netzausschnitt entspricht dem aus Bild 2-4. Die Punkte, die abseits der gut erkennbaren Straßen gezeigt werden, entstehen durch parkende Fahrzeuge am Straßenrand oder auf Grundstücken.

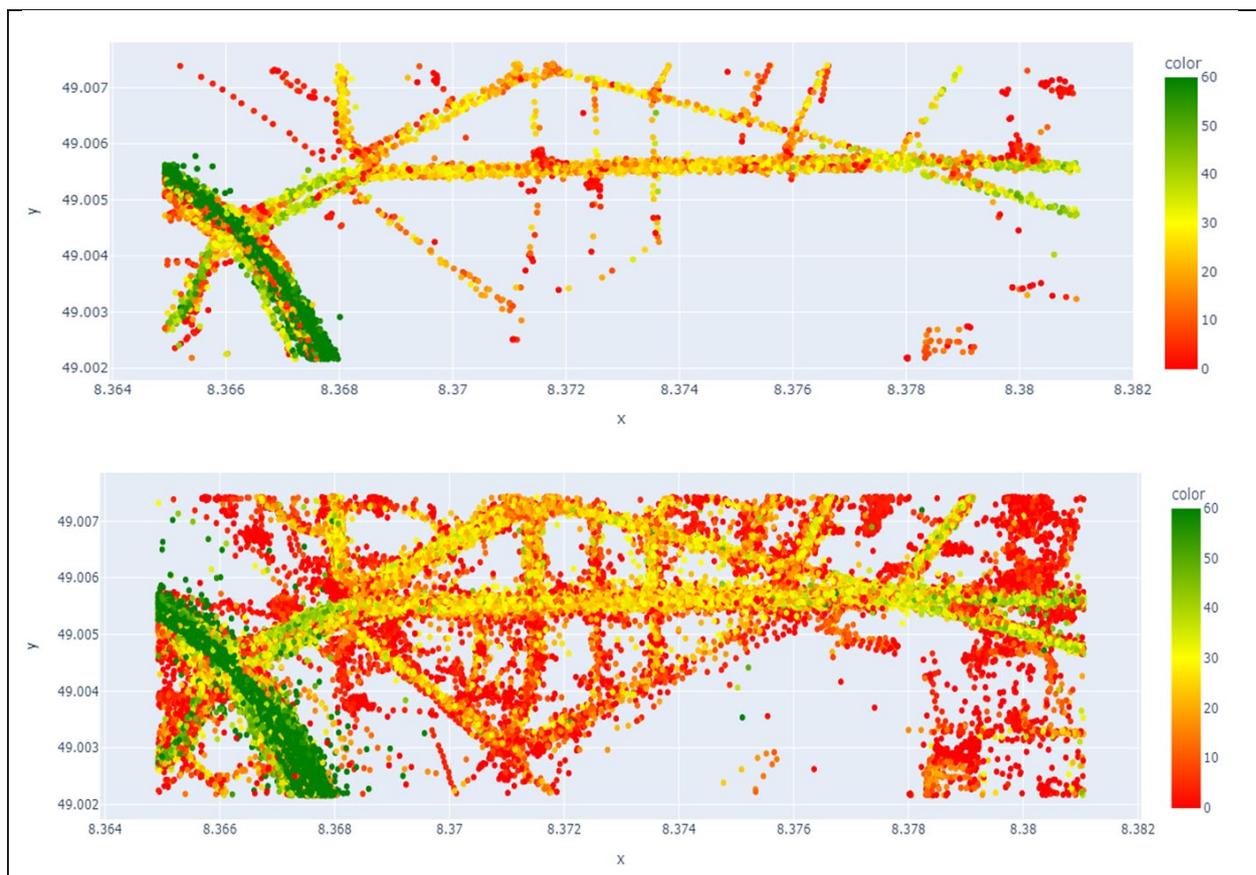


Bild 2-5: FC-Meldungen aus Rohdaten mit farbcodierter Geschwindigkeit im Koordinatensystem. Oben ein Dienstag im September 2021, unten alle Werktage im September 2021

2.4.2 Scatter-Plot im Weg-Zeit-Diagramm

Eine naheliegende Darstellungsmöglichkeit für Floating-Car-Daten ist die räumlich-zeitliche Darstellung der einzelnen Datenpunkte entlang des jeweiligen Netzabschnittes (Scatter-Plot). Hierbei werden die Dimensionen Raum und Zeit durch die Achsen eines Diagramms dargestellt, wobei die Dimension des Raumes die Distanz entlang des Streckenzuges abbildet. Innerhalb dieser Dimensionen kann dann jeder Punkt verortet und anhand der angegebenen Geschwindigkeit aus den Rohdaten eingefärbt werden. Ein Beispiel für solch einen Scatter-Plot ist in Bild 2-6 für den Streckenzug in Hannover in Fahrtrichtung Nord-Süd abgebildet.

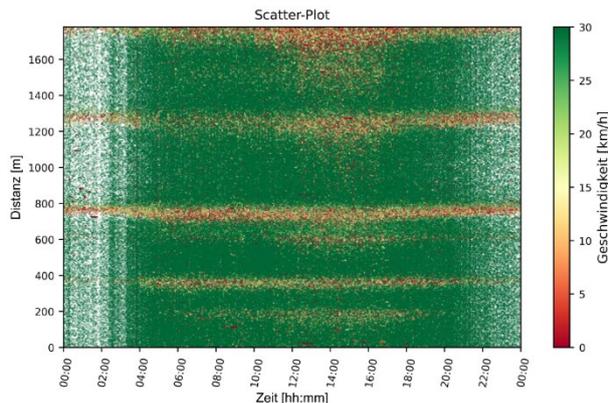


Bild 2-6: Scatter-Plot für die Untersuchungsstrecke Hannover In Fahrtrichtung Nord-Süd mit FCD aus 2021

Für die Farbskala zur Einfärbung der Datenpunkte anhand der hinterlegten Geschwindigkeit müssen Grenzwerte festgelegt werden. Als minimale Geschwindigkeit dieser Skala wurden 0 km/h angesetzt, um Halte an Knotenpunkten bzw. Stauzustände abzubilden. Im gezeigten Beispiel wurde als oberer Grenzwert 30 km/h angesetzt, da dies im Bereich der angestrebten mittleren Fahrtgeschwindigkeit für innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen der Kategorie HS III gemäß den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN, FGSV 2008) liegt. Alle Geschwindigkeiten oberhalb dieses Grenzwertes werden dadurch in der gleichen Farbe dargestellt wie Datenpunkte mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h.

2.4.3 Kontur-Plot („Heat-Map“)

Möchte man den diskreten Charakter der einzelnen Datenpunkte und ihre eventuell unterschiedliche räumliche und zeitliche Dichte überwinden, bietet sich als quasi räumlich-zeitliche Interpolation die Anwendung von sogenannten *Kontur-Plots* an, die oft auch *Heat-Maps* genannt werden. In diesen Abbildungen werden nicht die einzelnen Datenpunkte dargestellt, sondern es wird für einzelne Raum-Zeit-Bereiche eine mittlere Geschwindigkeit gebildet. Die einfachste Art der Bildung von Kontur-Plots legt über Raum und Zeit ein Raster, zählt die Datenpunkte in das Raster ein und berechnet in jeder Rasterzelle die gewünschten Mittelwerte. Bei FCD und besonders bei geringen Durchdringungsgraden muss man aber davon ausgehen, dass nicht in jedem Raum-Zeit-Bereich ausreichend plausible Geschwindigkeitsinformationen vorhanden sind. Daher bietet sich statt einer einfachen Mittelwertbildung die Nutzung eines isotropen Interpolations- und Glättungsverfahrens an.

Bei diesem Verfahren wird auf Basis der vorliegenden, diskreten Geschwindigkeitsdaten aus den Roh-FCD eine kontinuierliche Geschwindigkeitsfunktion $v_i = v(x_i, t_i)$ auf Basis von raumzeitlichen Parametern geschätzt (KESTING & TREIBER, 2010). Das Ziel ist es, zur Schätzung einer Durchschnittsgeschwindigkeit für einen gegebenen Ort und eine gegebene Zeit die vorliegenden Geschwindigkeitsdaten zu gewichten. Durch diese Gewichtung sollen Beobachtungen, die zeitlich und räumlich eine geringe Distanz aufweisen, stärker einbezogen werden als Beobachtungen, die von einem weiter entfernten Streckenabschnitt stammen oder zeitlich eine größere Differenz aufweisen.

Als Glättungskern wird hierbei die symmetrische Exponentialfunktion genutzt (TREIBER et al., 2010):

$$\phi(x - x_i, t - t_i) = \exp \left[- \left(\frac{|x - x_i|}{\sigma} + \frac{|t - t_i|}{\tau} \right) \right]$$

Mit der Wahl von σ und τ wird festgelegt, wie stark die Glättung räumlich und zeitlich vorgenommen wird. Schließlich werden die vorliegenden Geschwindigkeitsdaten gewichtet aufsummiert:

$$V(x, t) = \frac{1}{\sum_i \phi(x - x_i, t - t_i)} \sum_i \phi(x - x_i, t - t_i) v_i$$

Bei der Implementierung der isotropen Glättung kann zunächst über zwei Parameter festgelegt werden, wie viele Werte pro Achse berechnet werden sollen. Hieraus resultiert die Auflösung der entstehenden Grafik. Über weitere Parameter können ein Zeitfenster und ein Streckenabschnitt definiert werden, sodass anschließend alle Daten außerhalb des Zeitfensters und des Streckenabschnitts von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Um bei der Berechnung nur relevante Geschwindigkeitsdaten aus der räumlichen und zeitlichen Nähe einfließen zu lassen und dadurch Rechenzeit zu sparen, wird ein weiterer Parameter a eingeführt (SCHREITER et al., 2010). In der Glättung werden nur Beobachtungen $v(x_i, t_i)$ berücksichtigt, für welche die folgenden beiden Bedingungen erfüllt sind:

$$x - x_i \leq a * \sigma$$

$$t - t_i \leq a * \tau$$

Dies hat bei angemessener Wahl von a keine Auswirkungen auf die Grafik, da die ausgeschlossenen Beobachtungen so gering gewichtet würden, dass ihr Einfluss nicht sichtbar wäre.

In Bild 2-7 ist der Kontur-Plot wieder für den Streckenzug in Hannover in Fahrtrichtung Nord-Süd beispielhaft abgebildet. Als oberer Grenzwert in der Darstellung wurde auch hier eine Geschwindigkeit von 30 km/h gewählt. Aus der Abbildung geht hervor, in welchen räumlichen Bereichen und zu welchen Zeiten diese angestrebte mittlere Geschwindigkeit nicht erreicht wird. Aus der Abbildung können, wie schon im Scatter-Plot, die im Streckenzug liegenden Knotenpunkte deutlich identifiziert werden. Allerdings wird im Kontur-Plot aufgrund der Aggregation der einzelnen Datenpunkte pro Bereich zu einem Mittelwert deutlicher, wie häufig welche Geschwindigkeiten auftreten. Daher kann hier noch besser abgelesen werden, dass es vor allem am Nachmittag häufig zu Einschränkungen im Verkehrsablauf kommt, die sich durch die verringerte Geschwindigkeit vor dem Knotenpunkt am Ende der Strecke ablesen lässt.

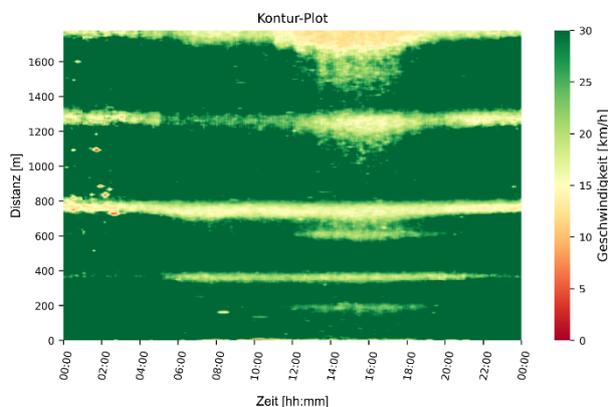


Bild 2-7: Kontur-Plot für die Untersuchungsstrecke Hannover in Fahrtrichtung Nord-Süd mit FCD aus 2021

2.4.4 Violinplots

Mithilfe eines *Violinplots* kann allgemein die statistische Verteilung quantitativer Daten visualisiert werden. Violinplots können bei der Visualisierung von FC-Daten dazu verwendet werden, den Verlauf der Verteilungen der Geschwindigkeiten entlang einer Strecke zusammenfassend für einen Betrachtungszeitraum darzustellen. Der Verlauf über der Zeit ist im Diagramm nicht mehr erkennbar. Die Wegkoordinate wird in kleine Segmente diskretisiert, in denen die Geschwindigkeiten aggregiert werden. Die Beispiele unten sind mit 10 m-Segmenten erzeugt worden. Violinplots ähneln den in der Statistik oft verwendeten Boxplots, enthalten aber mehr Informationen: Während Boxplots lediglich zusammenfassende Statistiken wie Mittelwert, Median und die Interquartilsbereiche anzeigen, stellen Violinplots die vollständige Verteilung der Daten als Dicke dar. So kann die Anzahl der Punkte in einem Violinplot direkt verdeutlicht werden, wohingegen

diese in einem Boxplot zusätzlich abgebildet werden müssten. Bild 2-8 zeigt diesen Umstand. Bei den Boxplots werden die Ausreißer dabei als einzelne Punkte angezeigt.

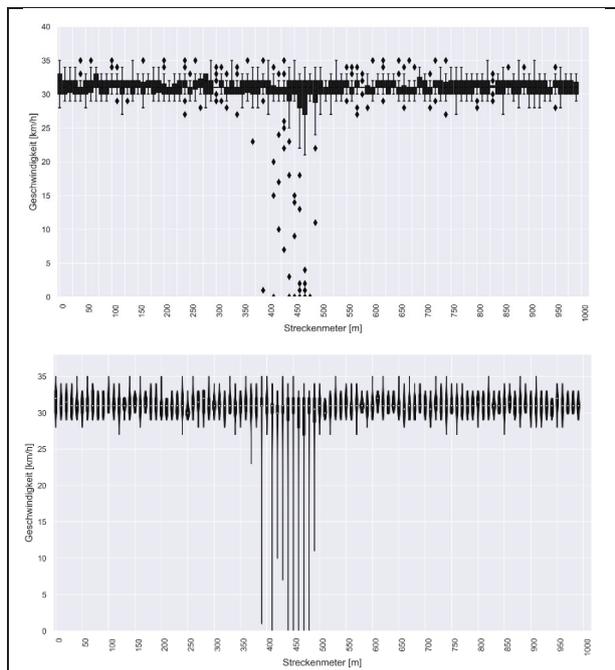


Bild 2-8: Boxplot und Violinplot der Geschwindigkeitsverteilungen entlang einer Strecke

Im Gegensatz zu (im mathematischen Sinn nicht stetigen) Histogrammen wird in Violinplots eine Kerndichteschätzung angewandt. Das ist ein statistisches Verfahren, bei dem kein regelmäßiges Raster zur Aggregation der Daten angewandt wird; stattdessen wird die Verteilung jedes Punktes an der genauen Stelle dargestellt und zu einer Gesamtverteilung aller Punkte zusammengefasst. Dadurch ergibt sich eine stetige Schätzung der Verteilung. Violinplots eignen sich vor allem dann, wenn mehrere Peaks in den Daten vorhanden sind. Aufgrund der Kerndichteschätzung werden die Ausläufer der einzelnen Darstellungen oftmals auch über die Grenzen der Punkte hinaus angezeigt. Da dies zu falschen Annahmen der niedrigsten und höchsten Geschwindigkeit im Datensatz verleitet, werden die Violinplots an den jeweils letzten Datenpunkten abgeschnitten.

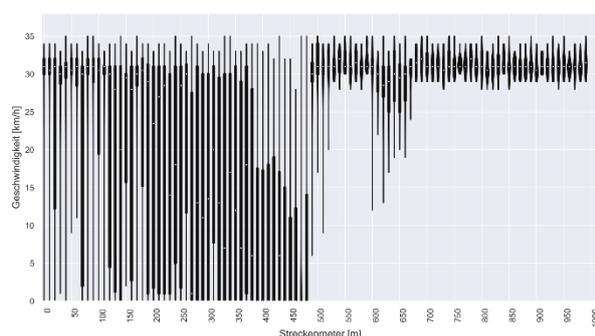


Bild 2-9: Beispiel eines Violinplots einer Strecke mit einer großen und einer kleineren Störungsstelle

2.5 Generierung synthetischer FCD aus Verkehrsflusssimulationen

Aufgrund des zum Teil zufälligen Charakters von Verkehrsstörungen und der unterschiedlichen Durchdringungsgrade der verfügbaren FC-Daten ist es schwierig, systematisch zu untersuchen, welche Verkehrsstörungen bei welchen FC-Abdeckungen in welchem Umfang erkannt werden können. Deshalb wurden

parallel zu den Arbeiten mit echten FC-Daten künstliche FC-Daten aus Verkehrssimulationen erzeugt, mit denen Parameter wie Meldefrequenzen, Anteil ausgerüsteter Fahrzeuge etc. kontrolliert variiert werden können.

Für die Untersuchung wurden sowohl mehrere der ausgewählten Untersuchungsstrecken modelliert als auch einfache, idealisierte Strecken, sogenannte Laborbeispiele, um daran einzelne Effekte isoliert betrachten zu können.

2.5.1 Verkehrssimulation mit Vissim

Das für die Simulationen eingesetzte Werkzeug war PTV Vissim (im Nachfolgenden lediglich Vissim genannt), ein kommerzielles, mikroskopisches, diskretes Simulationsprogramm für die Verkehrsflusssimulation, das von der PTV AG in Karlsruhe seit 1993 vertrieben und weiterentwickelt wurde und eines der beiden weltweit am häufigsten eingesetzten Simulationswerkzeuge in der verkehrstechnischen Praxis ist.

Die Abbildung des Verkehrsablaufs beruht in Vissim auf einem von Wiedemann 1974 entwickelten Fahrzeugfolgemodell, das 1999 nochmals weiterentwickelt wurde. Mit diesem Modell wird die Annäherung zweier Fahrzeuge basierend auf dem Verhalten bezüglich der gewünschten Geschwindigkeit und der persönlichen Akzeptanz des Abstands zum Vorderfahrzeug beschrieben. Das Modell basiert auf der Annahme, dass es vier verschiedene Verkehrszustände gibt. Im Zustand des freien Fahrens wird das Fahrverhalten nicht durch andere Fahrzeuge beeinflusst und die Fahrenden versuchen, die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und beizubehalten. Bei Erreichen einer individuellen Reaktionsschwelle wird vom freien Fahren in eine Annäherungsbremmung übergegangen. Diese beschreibt den Prozess der Anpassung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs an die niedrigere Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Da die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs nicht genau abschätzbar ist, besteht das eigentliche Folgen aus einer Oszillation aus Beschleunigen und Bremsen. Bremst ein Fahrzeug abrupt ab oder drängt sich ein drittes Fahrzeug zwischen die beiden Fahrzeuge kann es vorkommen, dass der Abstand zum Vorderfahrzeug den gewünschten Sicherheitsabstand unterschreitet. Ist dies der Fall erfolgt ein mittelstarkes bis starkes Bremsen, um eine Kollision zu vermeiden. Da bei diesem Modell psychologische sowie physiologische Restriktionen der Fahrenden zusammenwirken, wird es als psycho-physisches Folgemodell bezeichnet.

Das Verhalten der Fahrzeuge wird in diskreten Zeitschritten betrachtet, die bei Vissim zwischen 0,05 s und 1,0 s eingestellt werden können. Die übliche Einstellung, die auch bei der vorliegenden Untersuchung gewählt wurde, ist 0,1 s.

Für das hier vorgestellte Projekt ist vor allem relevant, dass die hohe zeitliche Auflösung der Simulation und das detaillierte Verhaltensmodell sicherstellen, dass die Abbildung des Verkehrsablaufs (mehr als) hinreichend genau ist, um die künstlichen FC-Daten mit einer Genauigkeit zu erzeugen, die der realen FC-Daten entspricht.

2.5.2 Analyse der realen FC-Daten

Die künstlich erzeugten FC-Daten sollen in ihren statistischen Eigenschaften den realen FC-Daten möglichst genau entsprechen. Wesentliche Einschränkungen bei der Nutzung von FC-Daten sind, dass die Position der Fahrzeuge nicht kontinuierlich, sondern nur zu bestimmten Zeitpunkten vorliegt (Meldefrequenz), dass nur ein Teil der Fahrzeuge überhaupt Daten sendet (Durchdringungsgrad) und dass die gemeldeten Werte wie Position und Geschwindigkeit mit Fehlern behaftet sind. Alle diese drei Aspekte sollen bei der Herstellung der künstlichen Daten berücksichtigt werden und müssen deshalb zunächst in den realen Daten analysiert werden. Die folgenden Untersuchungen wurden mit Daten der Anbieter 3 und 6 durchgeführt.

In Bild 2-10 sind Häufigkeiten der Zeitabstände zwischen zwei Meldungen eines Fahrzeugs dargestellt. Man erkennt zwei ausgeprägte Spitzen bei 5 s und 15 s. Das ist ein Indiz, dass sich die meldenden Fahrzeuge aus mehreren Teilflotten zusammensetzen, die mit unterschiedlichen Endgeräten ausgestattet sind. Allerdings zeigt eine detailliertere Betrachtung auch, dass die zeitlichen Abstände zwischen den Meldungen des gleichen Fahrzeugs auch nicht immer gleich sind, sondern erheblich schwanken können. Im rechten Teil der Abbildung ist das für drei ausgewählte Fahrzeuge (hellblau, dunkelblau, oliv) dargestellt.

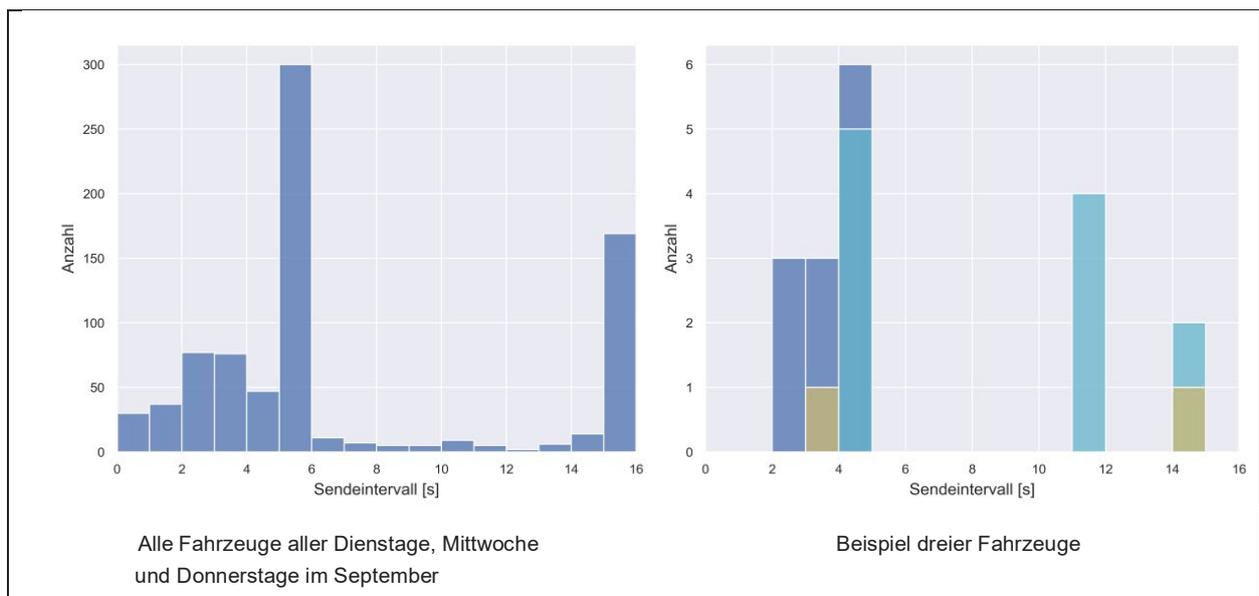


Bild 2-10: Meldefrequenzen in den Rohdaten eines Anbieters

Die Genauigkeit der gemeldeten Position kann nicht aus den realen FC-Daten bestimmt werden, weil die wahre Position der sendenden Fahrzeuge nicht bekannt ist. Um trotzdem einen Anhaltspunkt für die räumliche Unschärfe zu haben, wird auf bestehende Untersuchungen der Genauigkeit von GPS-basierten Positionsmeldungen von Fahrzeugen zurückgegriffen. In Bild 2-11 ist links ein Histogramm des Positionsfehlers aus einer Untersuchung der US FEDERAL AVIATION AGENCY (2021).



Bild 2-11: Häufigkeitsverteilung des Positionsfehlers (US FEDERAL AVIATION AGENCY, 2021, links) und Fehler durch Offset (rechts)
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Hinsichtlich der Positionsungenauigkeit fällt noch auf, dass bei einzelnen Fahrzeugen ein systematischer Versatz vom der in der digitalen Karte erfassten Streckenverlauf vorliegt. Das kann daran liegen, dass die GPS-Genauigkeit in städtischen Gebieten geringer als auf offenen Flächen ist, da die GPS-Signale aufgrund der Bebauung reflektiert und damit nicht auf direktem Weg zum Empfänger gelangen. Ein Beispiel für diesen Versatz ist in Bild 2-11 rechts dargestellt.

2.5.3 Generierung künstlicher FC-Daten

Die Simulation bietet als Ausgangspunkt die vollständige Information über den Verkehrsfluss, d.h. alle Fahrzeugpositionen sind zu jedem Zeitpunkt genau bekannt. Bei der Generierung muss also die Information aus der Simulation kontrolliert verschlechtert werden.

Um synthetische FCD aus dem Simulationsmodell zu erhalten, wird das sogenannte Fahrzeugprotokoll als Textdatei aus Vissim ausgelesen. Dieses enthält die Informationen Simulationssekunde, Fahrzeugnummer, Geschwindigkeit, Ausrichtungswinkel und Koordinaten in Breiten- und Längengrad. Das Fahrzeugprotokoll wird für alle Fahrzeuge der Fahrzeugklassen Pkw und Lkw pro Sekunde geschrieben. Die Einträge des Fahrzeugprotokolls (Textdateien mit mehreren hunderttausend Zeilen) werden deshalb mithilfe eines Python-Skripts so aufbereitet, dass sie bestmöglich den realen FCD entsprechen und im Optimalfall nicht mehr von ihnen unterscheidbar sind.

Vissim arbeitet mit einem lokalen kartesischen Koordinatensystem, bei dem mit der Erstellung des ersten Netzobjektes ein Referenzpunkt in der Hintergrundkarte als Nullpunkt gesetzt wird. Um die FCD aus der Simulation universell verarbeiten zu können, werden die Vissim-Koordinaten in das World Geodetic System 1984 (WGS 84) konvertiert.

Um den gewünschten Durchsetzungsgrad zu erhalten, wird der gewählt Anteil an Fahrzeugen zufällig ausgewählt. Alle anderen Fahrzeuge und ihre Informationen werden gelöscht.

Auch die Meldefrequenz soll variabel gehalten werden, um den Einfluss verschiedener Frequenzen untersuchen zu können. In den Einstellungen der Auswertung in Vissim kann die zeitliche Auflösung des Fahrzeugprotokolls eingestellt werden. Sie wird in Zeitschritten angegeben und hängt somit von der in den Simulationsparametern gewählten Berechnungsfrequenz ab. Beträgt diese beispielsweise zehn Zeitschritte pro Sekunde und wird die Auflösung des Fahrzeugprotokolls auf hundert Zeitschritte gesetzt, wird jede zehn Sekunden ein Eintrag für jedes ausgewählte Fahrzeug in das Fahrzeugprotokoll geschrieben. Hierbei treten jedoch zwei Probleme auf: Zum einen kann die Sendefrequenz im Nachhinein lediglich weiter vergrößert aber nicht verkleinert, also nicht mehr frei verändert werden. Zum anderen sendet jedes Fahrzeug zur gleichen Zeit, was nicht realistisch ist. Aufgrund dessen wird Vissim so eingestellt, dass für jedes Fahrzeug jede Sekunde ein Eintrag in das Fahrzeugprotokoll geschrieben wird, und die gewünschte Meldefrequenz wird erst in der nachfolgenden Auswertung im Python-Skript hergestellt. Dabei werden alle Einträge, die zwischen der gewählten Frequenz liegen, gelöscht. Zusätzlich dazu wird pro Fahrzeug zufällig eine Startsekunde gezogen, die zwischen 0 s und der Dauer des Sendeintervalls liegt, damit nicht jedes Fahrzeug immer bei derselben Sekunde nach Betreten des Streckenabschnitts sendet. Bei der zuvor beschriebenen Betrachtung der realen FCD fällt allerdings auf, dass sich die Sendefrequenzen von einem zum anderen Fahrzeug unterscheiden können und auch innerhalb eines Fahrzeugs nicht gleichmäßig sind. Um dies in den synthetischen FCD abbilden zu können, wird die ermittelte Verteilung der realen FCD aus Bild 2-10 auf sie angewandt.

Reale FCD sind mit einem Positionsfehler aufgrund der Ungenauigkeit des GPS behaftet. Mit diesem müssen auch die synthetischen FCD, die bisher alle exakt auf der Strecke liegen, ausgestattet bzw. „verwaschen“ werden. Hierzu wird der in einer Untersuchung der US FEDERAL AVIATION AGENCY (2021) ermittelte Positionsfehler nachgebaut. Dessen Mittelwert liegt bei ca. 0,75 m (siehe Bild 2-11). Beim Vergleich der synthetischen FCD, die mit einem Positionsfehler behaftet sind, und den realen FCD fällt auf, dass der angenommene Positionsfehler nicht ausreicht, um die realen FCD nachzubilden. Dies kann daran liegen, dass die GPS-Genauigkeit in städtischen Gebieten geringer als auf offenen Flächen ist, da die GPS-Signale aufgrund der Bebauung reflektiert und damit nicht auf direktem Weg zum Empfänger gelangen. Aufgrund dessen wird der bisherige Positionsfehler verdoppelt. Damit lassen sich die meisten Positionsmeldungen der Fahrzeuge nachbilden. Allerdings kommen in den realen FCD auch Fahrzeuge vor, die konstant in jeder Positionsmeldung große Fehler in immer dieselbe Richtung beinhalten (siehe Bild 2-11). Dieser Positionsfehler ist nicht der generellen Ungenauigkeit des GPS-Signals geschuldet und wird mit dem Einbau eines Offsets mancher Fahrzeuge in den synthetischen FCD berücksichtigt. Die Nachbildung des Positionsfehlers erfolgt mit der zufälligen Wahl des Fehlers aus der Verteilung und eines Winkels zwischen 0° und 360° , der die Richtung angibt, in die der Punkt verschoben werden soll.

Die mit der Sendefrequenz, dem Durchsetzungsgrad und dem Positionsfehler behafteten synthetischen FCD haben bereits eine hohe Ähnlichkeit mit den realen FCD. Damit sich die Daten auch optisch ähneln und bei Verarbeitung Datensätzen möglichst gar keine Unterschiede mehr erkennbar sind, erfolgen weitere Anpassungen der synthetisch erzeugten FCD. Die realen FCD, die vom Anbieter 6 gekauft wurden, bilden dabei die Vorlage. Zunächst werden die Ausrichtungswinkel und Geschwindigkeiten auf ganze Zahlen gerundet. Außerdem wird der Ausrichtungswinkel um 90° gedreht, da 0° bei den synthetischen FCD Osten

entspricht, aber bei den realen FCD Norden. Die Koordinatenangaben werden auf sechs Nachkommastellen gerundet. Unterschiede bestehen auch in den Fahrzeugnummern. Diese sind aus der Simulation heraus nur vierstellig, während die realen FCD neun- oder zehnstellig und teilweise negativ sind (vorzeichenbehaftete 32-bit-Integer). Um die synthetischen FCD anzupassen, werden diesen neue zufällige Nummern zugewiesen. Zum Schluss wird der gesamte Datensatz nach der Uhrzeit sortiert.

Die so erzeugten künstlichen FC-Daten sind nur noch schwer von realen Daten des Anbieters A zu unterscheiden, wie im Bild 2-12 zu sehen ist, in der für die Untersuchungsstrecke Kriegsstraße beide Arten FC-Daten gegenübergestellt sind.

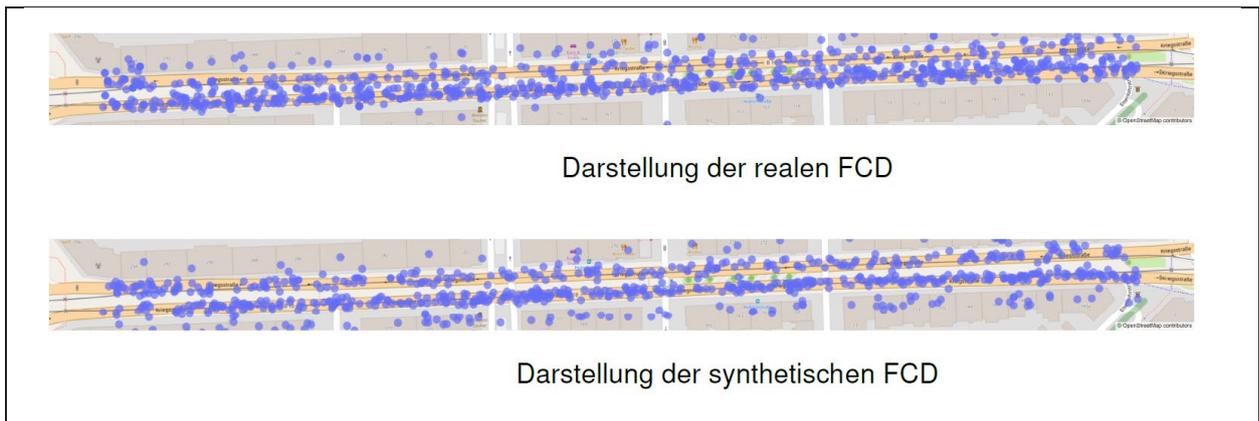


Bild 2-12: Gegenüberstellung realer und synthetischer FCD
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

3 Literaturanalyse zur Nutzung von FCD zur Analyse des Verkehrsablaufs

Floating-Car-Daten ergänzen die von klassischen stationären Detektoren aufgenommenen Verkehrsdaten, indem sie Informationen über Fahrtverläufe und Fahrtzeiten liefern (SCHÄFER et al., 2003). Etwa seit Beginn der 2000er Jahre werden in der Verkehrsforschung zunehmend die Potenziale von FCD für die Analyse und Bewertung des Verkehrsablaufes analysiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Methoden vorgestellt, die für diese Analysen genutzt werden. Dabei werden die drei Einsatzbereiche Knotenpunkte, Strecken und Netzabschnitte betrachtet.

In vielen der älteren Veröffentlichungen wird für die *Fahrtzeit* noch der Begriff *Reisezeit* verwendet, was nach den aktuellen Definitionen im Kontext des HBS (FGSV 2015) nicht mehr korrekt ist. In der folgenden Darstellung der Literaturanalyse wird in Einzelfällen dieser in den Originalarbeiten verwendete Begriff weiter verwendet.

Über die Nutzung von FCD zur Verkehrslageanalyse gibt es in Deutschland relativ wenige Berichte. In einer Arbeit von KRAMPE et al. (2014) wurden die Potenziale von FCD zur Nutzung durch die Öffentliche Hand analysiert. Zunächst wurden dabei Interviews mit Trägern der Öffentlichen Hand sowie kommerziellen FCD-Daten-Anbietern geführt. Die Ergebnisse dieser Befragungen zeigten, dass vor allem in den Kommunen und Straßenbauverwaltungen der Nutzen von FCD zur Verbesserung der Detektion erkannt wird, es jedoch noch Bedenken bezüglich der Verlässlichkeit und Transparenz der Daten gibt. Dies gilt laut KRAMPE et al. besonders für aggregierte Daten der kommerziellen FCD-Anbieter, da hier die Qualität der Daten weniger gut erkannt werden kann als bei FCD-Rohdaten. Im Anschluss an die Befragung stellen die Autoren anhand eines Pilotversuches mit FCD-Rohdaten von mehreren Bundesautobahnen in Niedersachsen ihre Methoden zur Bewertung der Datenqualität, zur Identifikation von Störungen sowie zur allgemeinen Bewertung von FCD im Rahmen der Störungserkennung vor.

In einem ähnlichen Bericht zur Nutzung von FCD in Bayern (HASPEL et al., 2015) beschreiben die Autoren ihre Methodik zur Beurteilung der Datenqualität von FCD. Dabei wurden sowohl vergleichende Auswertungen mit stationären Detektoren und streckenbezogenen Datenquellen (Bluetooth, Kennzeichenerfassung) als auch deskriptive Analysen zu Häufigkeit, Verlauf und Ausprägung übermittelter FCD durchgeführt. Als zentralen Kennwert zur Bewertung der Datenqualität wird ein sogenannter „SCORE“-Wert genutzt, der angibt, ob ein FCD-Wert auf reinen Echtzeitdaten, auf mit historischen Daten angereicherten Echtzeitdaten oder auf ausschließlich historischen Werten beruht. Für Echtzeitdaten wird zusätzlich ein Konfidenzwert für die ermittelten Geschwindigkeiten auf Grundlage historischer Geschwindigkeitsverteilungen angegeben.

In einigen Ländern werden FCD bereits von öffentlicher Seite zur Analyse des Verkehrsablaufes genutzt. Laut einem Bericht des US-amerikanischen „National cooperative highway research program“ (NCHRP) nutzt ein Großteil der bundesstaatlichen Verkehrsministerien („State Department of Transportation“ (DOT)) FCD oder aus FCD generierte Daten zur Planung und Überwachung von Strecken (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2021). Die meisten der DOTs (88 %) nutzen dabei aggregierte Geschwindigkeitsdaten zur Bewertung der Angebotsqualität von Streckenabschnitten. Neben diesen aggregierten Geschwindigkeitsinformationen nutzen einige DOTs noch aggregierte Quelle-Ziel-Daten (53 %), Fahrzeugtrajektorien (20 %) oder LBS-Daten (31 %). Laut den befragten Ministerien waren die Einstiegshürden zur Nutzung der Daten gering, bei einigen Anwendungen bestanden jedoch Bedenken bezüglich der Datenqualität bzw. -genauigkeit.

Die bisher genannten Berichte bezogen sich alle auf die Nutzung von FCD auf Autobahnen bzw. vergleichbaren Fernstraßen. Über die praktische Nutzung von FCD zur Analyse von innerörtlichen Straßen durch die Öffentliche Hand gibt es zum aktuellen Stand kaum Berichte. In den folgenden Abschnitten soll daher der aktuelle Stand der Forschung zur Nutzung von FCD in innerstädtischen Netzen dargestellt werden.

Für alle der folgenden Ansätze spielt der *Durchdringungsgrad*, der den Anteil der mit FCD-Geräten ausgestatteten Fahrzeuge am Gesamtverkehr angibt, eine entscheidende Rolle. Der genaue Durchdringungsgrad in einer gegebenen Situation ist in der Regel unbekannt. Da seine Kenntnis aber für die Abschätzung der Zuverlässigkeit der aus FCD abgeleiteten verkehrlichen Kennwerte erforderlich ist, zeigt sich in der Literatur ein besonderes Interesse an Methoden, diesen zu bestimmen. Seit Beginn der Ausrüstung von

Fahrzeugen mit GPS-Geräten untersuchten Arbeiten wie VAN AERDE et al. (1993) und SEN et al. (1997) den Einfluss des Anteils und der Verteilung ausgerüsteter Fahrzeuge auf die Genauigkeit der Schätzung. HELLINGA & FU (1999) verdeutlichten, dass Fahrzeugankunftsverteilung sowie die Über- und Unterrepräsentanz von Abbiegebeziehungen zwei Faktoren darstellen, die die geschätzte Fahrtzeit einer Verbindung beeinflussen. Dieselben Autoren schlugen in HELLINGA & FU (2002) eine Methode vor, mit der diese Verzerrung um bis zu 50 % reduziert werden kann. ARGOTE-CABAÑERO et al. (2015) führten eine Analyse mehrerer realer Datensätze durch, um den Mindestdurchdringungsgrad für zuverlässige Schätzungen von Geschwindigkeit und Verlustzeiten zu bestimmen, wobei zwischen über- und untersättigten Bedingungen der Knotenpunkte im Zuge eines Netzabschnitts unterschieden wurde. FOURATI et al. (2021) präsentieren eine Methode zur Schätzung des Durchdringungsgrads, die nicht auf einem simplen Vergleich mit Verkehrszählungen beruht, sondern sich auf Stauzustände an signalisierten Knotenpunkten konzentriert. Hierbei wird der Durchdringungsgrad durch einen Vergleich der aus FCD über einen längeren Zeitraum bestimmten maximalen Verkehrsdichte und einer bekannten Verkehrsdichte im Stauzustand bestimmt. Eine Validierung der Methodik zeigte, dass Durchdringungsgrade von mehr als 5 % bei einer Abtastrate von bis zu 1/15 Hz (eine Erfassung alle 15 Sekunden) mit einem Fehler von weniger als 10 % bestimmt werden konnten. Dass die Zuverlässigkeit bei der Bestimmung der Fahrtgeschwindigkeiten von der Anzahl an FCD-Informationen abhängt, bestätigt auch eine Untersuchung von ZHENG & VAN ZUYLEN (2013). Dabei wurden Verkehrsdaten von Messfahrzeugen mit einer geringen Abfragefrequenz von ca. ein bzw. fünf Minuten erhoben, wodurch die ermittelten Fahrtzeiten nur teilweise die tatsächlichen Fahrtzeiten auf den Strecken bzw. Routen abbildeten.

Die wesentliche Größe bei der **Bewertung des Verkehrsablaufs auf Strecken** im Kontext der Bemessung ist die Fahrtzeit. Diese wird bei Verwendung von FCD meist kanten- oder routenbasiert ausgewertet und kann so Aufschluss über Stausituationen oder sonstige Störungen geben. In JENELIUS & KOUTSOPOULOS (2013) wird die Fahrtzeit eines Netzabschnittes als Summe der Kantenfahrtzeit und der Knotenverlustzeit betrachtet. Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Fahrtzeitverteilung und äußeren Begebenheiten fließen als unabhängige Variablen einerseits verkehrsbezogene Größen wie Geschwindigkeitsbeschränkungen oder Straßenkategorien, andererseits aber auch Umgebungseinflüsse, wie z. B. Wochentag, Wetter oder Jahreszeit mit ein. Ziel ist es, durch die Analyse raumzeitlicher Änderungen der Fahrtzeiten in einem Verkehrsnetz Aussagen über die Verkehrslage abzuleiten. Mit deren Hilfe soll es möglich sein, Maßnahmen für das Verkehrsmanagement oder die Verkehrsplanung abzuleiten.

Zur weiteren Analyse der Fahrtzeit sowie insbesondere deren Zuverlässigkeit hat sich die Anwendung eines Reisezeitindex in diversen wissenschaftlichen Arbeiten etabliert (BENNECKE et al., 2011; ESTEL, 2009; LOHMILLER, 2014; SPANGLER, 2009). Der Reisezeitindex beschreibt das Verhältnis der gemessenen Reisezeit zu einem angenommenen Bezugswert. Aufgrund der verhältnismäßig einfachen Berechnung dieser Kenngröße und ihrer hohen Aussagekraft findet das Prinzip auch bei großen Verkehrsinformationsdienstleistern, wie z. B. INRIX (SCHRANK et al., 2015) oder TomTom (COHN et al., 2012) im Kontext der FCD-Auswertung Anwendung. COHN et al. (2012) ermittelt dazu den Quotienten aus gemessener Reisezeit auf einem Straßensegment und der Freiflussreisezeit, die auf Basis historischer FCD bestimmt wurde. Durch eine Gewichtung einzelner Indizes kann für ein Teilnetz ein Gesamtindex berechnet werden. Ein im Ansatz ähnliches Verfahren wird von SCHRANK et al. (2015) beschrieben: Der Reisezeitindex bestimmt sich hier aus der Reisezeit auf einem Straßensegment bei einer berechneten Geschwindigkeit und der Reisezeit bei Referenzgeschwindigkeit. Diese wird ebenfalls anhand historischer FCD ermittelt. Bei der berechneten Geschwindigkeit handelt es sich um einen zeitlich aggregierten Wert, der pro Segment, Wochentag und Monat in 15-Minuten-Intervallen bestimmt wird. Durch die Gewichtung mit den Segmentlängen kann anschließend ein Gesamtindex für das betrachtete Netz gebildet werden, der z. B. einen Vergleich der Verkehrslage einer Stadt während der Hauptverkehrszeit für verschiedene Wochentage oder Monate ermöglicht.

Eine Kenngröße, die sich nicht nur an lokalen Messeinrichtungen, sondern auch durch FCD erheben lässt, ist die lokale Geschwindigkeit. Sie erlaubt in der Regel einen genauen Rückschluss auf die aktuelle Verkehrslage in einem kleinräumigen Abschnitt. Eine von NEUHOLD et al. (2014) durchgeführte Untersuchung zeigt, dass eine Betrachtung der Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Ort und Zeit sehr genaue Aussagen über Lage, Länge und Dauer einer Störung liefern kann. Das Verfahren von DINH et al. (2014) nutzt die Lokalgeschwindigkeitsinformationen aus FCD dazu, das Stauende in Echtzeit zu lokalisieren. Die

Grundannahme des Verfahrens beruht auf der Eigenschaft, dass am Stauende Fahrzeuge mit hohen Geschwindigkeiten (fließender Verkehr) auf Fahrzeuge mit niedrigen Geschwindigkeiten (gestauter Verkehr) treffen. Während die Methoden zur Stauerfassung bzw. -lokalisierung häufig nur zwischen den beiden Verkehrszuständen „Stau“ und „kein Stau“ unterscheiden, versuchen andere Verfahren, differenziertere Verkehrslageinformationen aus den FCD-Geschwindigkeiten abzuleiten. In einer weiteren Arbeit von AXER & FRIEDRICH (2014) werden lokale Geschwindigkeiten aus FCD mit einer Referenzgeschwindigkeit verglichen, um mit dem resultierenden Geschwindigkeitsindex eine Aussage über die Qualität des Verkehrsablaufes zu erlangen. Die Referenzgeschwindigkeit, welche die Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss abbilden soll, wird dabei durch das gewichtete 95 %-Quantil der Geschwindigkeitsverteilung auf dem jeweiligen Straßensegment definiert.

Zur **Bewertung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten** verwendet das HBS als verkehrstechnische Kenngröße die *Wartezeit*. Die Wartezeit ist eine Komponente der Verlustzeit. Die Verlustzeit setzt sich neben der Wartezeit noch aus Zeitverlusten beim Annähern und Durchfahren eines Knotenpunktes zusammen. Die Verlustzeit subsumiert alle Zeitverluste, die ein Fahrzeug beim Überfahren eines Knotenpunktes gegenüber einer ungehinderten störungsfreien Durchfahrt erfährt. Die meisten Ansätze zur Bestimmung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten aus FCD gehen den Weg über die Ermittlung der Verlustzeit.

Die Forschungsarbeiten von QUIROGA & BULLOCK (1999), MOUSA (2002), KO et al. (2008) sowie LIU et al. (2006) nutzen dazu hochfrequente FCD (1 Hz). Aus der räumlich-zeitlich hochaufgelösten Trajektorie eines Fahrzeugs werden der Verzögerungsbeginn und das Beschleunigungsende beim Passieren eines Knotenpunktes erkannt. Die zwischen diesen Zeitpunkten ermittelte Fahrzeit kann einer idealen Fahrzeit gegenübergestellt werden und ermöglicht die Abschätzung des Gesamtzeitverlustes. Die ideale Fahrgeschwindigkeit entspricht bei diesen Ansätzen üblicherweise der gültigen Höchstgeschwindigkeit. Das von LIU et al. (2006) vorgestellte Verfahren ermöglicht die Verlustzeitbestimmung bis zu einer Sendefrequenz von 1/5 Hz. Unterhalb dieser Frequenz können Verzögerungsbeginn und Beschleunigungsende nicht mehr fehlerfrei erkannt werden. Dieses Verfahren funktioniert nur gut im Geradeausstrom des Knotenpunktes, da für abbiegende Ströme die Annahme der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu einer Überschätzung der Verlustzeit führen würde. Um dem zu begegnen, haben WOLFERMANN et al. (2011) auf Basis empirischer Geschwindigkeitsprofile ein Modell zur Schätzung von Abbiegegeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Knotenpunktsgometrie entwickelt.

Im Gegensatz zur feinteiligen Analyse raumzeitlich hochaufgelöster und sehr dichter Fahrzeugtrajektorien haben NEUMANN et al. (2010) ein Regressionsmodell zur Verlustzeitschätzung auf Basis niederfrequenter und sehr weniger FCD entwickelt. Das Modell schätzt die Verlustzeit aus der Regressionsanalyse individuell zurückgelegter Streckendistanzen und der dafür benötigten Fahrzeiten einzelner FCD-Trajektorien. Vorteil des Verfahrens ist die Schätzung der Verlustzeit ohne die Annahme idealisierter, nicht-beeinträchtigter Fahrgeschwindigkeiten. In Anlehnung an die genannten Arbeiten haben AXER et al. (2015) ein Verfahren zur Verlustzeitschätzung ebenfalls auf Basis weniger niederfrequenter FCD entwickelt und an einem realen Knotenpunkt plausibilisiert. Gegenüber dem Verfahren von NEUMANN et al. (2010) ermöglicht die Methodik eine differenzierte Aussage über die zeitliche Verteilung der Verlustzeit im Tagesgang sowie über die Streuung der Verlustzeiten. Die Geschwindigkeit der ungehinderten Durchfahrt schätzt das Verfahren dabei aus der Interpolation aggregierter Momentangeschwindigkeiten vor und hinter dem Knotenpunkt.

Für den Anwendungsfall der FCD-basierten Qualitätsbewertung von signalisierten Knotenpunkten und der Identifizierung von Schwachstellen wurde von WÜNSCH et al. (2015) ein mehrstufiger Prozess zur Datenaufbereitung und -auswertung vorgestellt, der auf alle 2.300 signalisierten Knotenpunkte im Zuständigkeitsbereich der bayerischen Straßenbauverwaltung angewendet wurde. Der Prozess beinhaltet das Geofencing von Trajektorien im Knotenpunktbereich, der Kartenabgleich (Map-Matching) und die Bestimmung von Referenzfahrzeiten.

Über die einfache Messung von Verlustzeiten hinaus stellen VAN ZUYLEN et al. (2010) eine detaillierte probabilistische Analyse von Wartezeiten und Staulängen an signalisierten Knotenpunkten auf der Grundlage von FCD-Trajektorien vor und verbinden sie mit einer Verkehrszustandsschätzung und -vorhersage mittels Fuzzy-Logik. Das Verfahren wurde an einem signalisierten Knotenpunkt in China eingesetzt und getestet.

Neben den Verlustzeiten ist für die Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten auch die Rückstaulänge von Bedeutung. Eine der ersten Studien über die Verwendung von FCD zur Ermittlung von Rückstaulängen an signalisierten Knotenpunkten wurde von COMERT & CETIN (2009) vorgestellt. Sie beinhaltet eine analytische Formulierung des Problems und zeigt die Auswirkungen der Stichprobengrößen auf. NEUMANN (2011) hat ebenfalls ein FCD-gestütztes Verfahren zur Rückstauschätzung entwickelt, simulativ getestet und gegenüber Realdaten plausibilisiert. Das Verfahren basiert auf der Bestimmung von Dichteprofilen erfasster FCD-Meldungen. Ein Dichteprofil beschreibt die Anzahl abgegebener FCD-Meldungen über die Knotenpunktzufahrt, wobei die Meldungsdichte bei konstanter Sendefrequenz in der Nähe der Haltlinie ein Maximum erreicht. Mit Hilfe eines mikroskopischen Simulationsmodells schätzt er die notwendige Verkehrsstärke zur Rekonstruktion des erfassten Dichteprofils. Während die Methode in der Simulation gute Ergebnisse erzielt, mangelt es dem Verfahren in der Praxis an notwendigen Signalprogrammformationen, die für die Erstellung einer kalibrierten Simulationsumgebung notwendig sind.

Ein ebenfalls auf FCD-Dichte basierendes Verfahren zur Erkennung von Störungsstellen stellen GRASER et al. (2012) vor. Die entwickelte Methode ermöglicht einen Vorher-Nachher-Vergleich von Netzelementen insbesondere im knotenpunktnahen Umfeld anhand der mittleren Geschwindigkeit. Ein anderer Ansatz, der auf dem Konzept der kritischen Punkte im räumlich-zeitlichen Verlauf der Trajektorien basiert, wurde von CHENG et al. (2011) vorgestellt. Die kritischen Punkte der Trajektorien wurden zusammen mit Stoßwellengleichungen verwendet, um die Signalzeiten zu rekonstruieren und die Länge der Warteschlangen abzuleiten. Die Methode wurde an dem bekannten NGSIM-Datensatz validiert. Eine simulative Bewertung mit einem ähnlichen Ansatz auf der Grundlage kinematischer Wellen von CETIN (2012) ermöglichte die Untersuchung der Auswirkungen des Durchdringungsgrads. In einer neuen Arbeit präsentieren FOURATI & FRIEDRICH (2021) einen Ansatz zur automatisierten Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke an signalisierten Knotenpunkten. Grundlage der hierin entwickelten Methodik ist die Annahme, dass durch eine Betrachtung von homogenen Bereichen von Trajektorien theoretisch aus jedem Umlauf ein gesamtes Fundamentaldiagramm gebildet werden kann, aus dem die Sättigungsverkehrsstärke abgeleitet werden kann.

Ein aktueller Bericht zu einer Studie in den USA (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, 2020) zur Qualitätsbeurteilung von Lichtsignalsteuerungen nennt als mögliche Datenquelle auf Segmente aggregierte FC-Daten (im Englischen „probe vehicle data“) und die Positionsmeldungen von automatisierten oder vernetzten Fahrzeugen, was im Prinzip FC-Rohdaten sind, da sie Zeitstempel, Position und lokale Geschwindigkeit beinhalten.

Eine Methode zur **Bewertung der Verkehrsqualität in städtischen Netzen** bietet das sogenannte Makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD). Diese Herangehensweise basiert auf der Betrachtung eines globalen Zusammenhangs zwischen der Produktion (Fahrzeugkilometer im gesamten Netz) und der Akkumulation (Fahrzeuge im gesamten Netz) (LODER et al., 2020). Dieser Zusammenhang erlaubt, ähnlich dem Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und -dichte im klassischen Fundamentaldiagramm, die Bestimmung einer Kapazität. Diese Kapazität bezeichnet die Anzahl von Fahrzeugen in einem Netz, bei der sich ein optimaler Fluss einstellt. Die Theorie eines solchen Zusammenhangs in städtischen Netzen besteht bereits seit den 1960er Jahren, konnte aber erst durch eine Studie von GEROLIMINIS & DAGANZO (2008) nachgewiesen werden. Um eine genauere Aussage über die Qualität des Verkehrsflusses zu bekommen, bietet der Einsatz eines MFD die Möglichkeit, kleinere Subnetzwerke zu betrachten, die eine möglichst homogene Netzstruktur aufweisen (TSUBOTA et al., 2014). Durch eine solche Unterteilung lässt sich im MFD erkennen, welche Teile des Netzwerks besonders anfällig für die Bildung von Engpässen sind.

Die Nutzung von FCD zur Ermittlung des Makroskopischen Fundamentaldiagramms eines Netzes wurde bereits in verschiedenen Forschungsarbeiten behandelt (NAGLE & GAYAH, 2014; LECLERCQ et al., 2014; DU et al., 2016; AMBÜHL & MENENDEZ, 2016; KNOOP et al., 2020). In diesen Arbeiten wird aus den FCD mit Hilfe der durchschnittlich gefahrenen Strecke im Netz die Verkehrsstärke (Produktion) und mit der durchschnittlichen Fahrzeit die Verkehrsdichte (Akkumulation) im Netz berechnet. Einen wichtigen Faktor bei diesen Berechnungen stellt der Durchdringungsgrad der FCD dar. Ist der Durchdringungsgrad der FCD im Netz bekannt oder für alle Quelle-Ziel-Beziehungen gleich groß, stellen die bestimmten Kennzahlen der nachverfolgten Fahrzeuge die gleichen durchschnittlichen Werte dar, die auch bei einer Betrachtung aller Fahrzeuge ermittelt werden würden (NAGLE & GAYAH, 2014). Ist der Wert für die Durchdringungsarte allerdings unbekannt und ungleich im Netz verteilt, was in den meisten praktischen Anwendungen der Fall

ist, muss der Anteil der mit FCD-Empfangsgeräten ausgestatteten Fahrzeuge noch bestimmt werden. Einen Ansatz hierzu bieten DU et al. (2016) durch einen Vergleich von Detektorzählungen mit der Verkehrsstärke aus FCD.

Eine Methode zur **Bewertung des Verkehrszustandes auf Netzabschnitten** wird für US-amerikanische Straßennetze von DAY & EMTENAN (2019) vorgeschlagen. Sie stellen neben der Verlustzeit an Knotenpunkten eines Netzabschnittes, die nach dem amerikanischen Highway Capacity Manual (HCM) als Standardwert für die Bewertung des Verkehrsablaufes genutzt wird, auch weitere Kennwerte vor, die aus FCD-Trajektorien einzelner Fahrzeuge extrahiert werden können. Der Fokus dabei lag besonders auf der Anzahl an Halten, die ein Fahrzeug bei der Durchfahrt eines Netzabschnittes mit mehreren signalisierten Knotenpunkten aufweist. Um die Qualität der Koordinierung entlang des Netzabschnittes zu bewerten, nutzen DAY & EMTENAN (2019) die Arbeit, die verrichtet werden muss, um das jeweilige Fahrzeug durch den Abschnitt zu bewegen. Je öfter das Fahrzeug dabei anhalten muss, desto mehr Arbeit muss verrichtet werden. Zusätzlich definieren sie mit dem „Perception Index“ ein Maß dafür, wie die Qualität der Fahrt durch den einzelnen Fahrer bewertet wird. Hierbei wird angenommen, dass eine steigende Anzahl an Halten durch den Fahrer zunehmend negativ bewertet wird und somit ein langer Halt einen besseren „Perception Index“ aufweist als viele kurze Halte.

Auch BRENNAN et al. (2015) schlugen ausgehend von der reinen Betrachtung der Fahrzeit auf einem Netzabschnitt ein neues Maß mit dem Namen „travel time inflation“ vor, das auf dem Vergleich zwischen tatsächlicher Reisezeit und einer Basisreisezeit basiert, die ihrerseits variabel ist und in jedem Intervall aus den FCD als das 70. Perzentil der räumlichen Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Kanten bestimmt wird.

In einer aktuell 2022 veröffentlichten Studie lässt das Schweizer Bundesamt für Strassen untersuchen, ob und wie eine Norm für die Bewertung der Verkehrsqualität auf Hauptverkehrsstraßen innerorts entwickelt werden muss (BUNDESAMT FÜR STRASSEN, 2022). In dieser Studie werden ganz ähnlich wie in der hier beschriebenen Arbeit auch FC-Daten und Verkehrsflusssimulationen untersucht. Hinsichtlich der FCD kommt die Studie zu dem Schluss, dass die Daten von drei Anbietern aus jeweils verschiedenen Gründen nicht verwendet werden können. Bei einem Anbieter ist die Abdeckung der Schweiz viel zu gering. Bei einem anderen Anbieter werden die FC-Positionsdaten nur im Minutentakt gesendet, was die Autoren als zu grob ansehen, um damit Störungen lokalisieren zu können. Beim dritten Anbieter sind die FC-Daten nur über einen längeren historischen Zeitraum aggregiert und vorverarbeitet erhältlich, was die Autoren dazu bringt, auch diese Daten wegen mangelnder Transparenz als nicht geeignet einzustufen. Daten eines dieser drei Anbieter wurden auch in der hier beschriebenen Arbeit eingesetzt; allerdings waren statt Minutenintervallen Rohdaten im 5-Sekunden-Takt verfügbar. Ein von FCD unabhängiges beachtenswertes Ergebnis dieser Schweizer Studie, das auch von der hier vorgelegten Arbeit gestützt wird, ist, dass der Einfluss von Störungen durch Fußgängerüberwege, ÖV-Haltestellen und Parken am Straßenrand gegenüber den Einflüssen durch Kapazitätsengpässen an den Knotenpunkten der Netzabschnitte quasi verschwindet.

4 Überprüfung von FCD durch Messungen

4.1 Auswahl von Netzabschnitten

Ziel der in diesem Projekt zu entwickelnden Verfahren ist es, dass aus Floating Car Data gewonnene Fahrtzeiten als Eingangsdaten für das Verfahren nach Kapitel S6 des HBS (FGSV 2015) und für eine Methodik zur netzweiten Störungsanalyse genutzt werden können. Dazu muss gewährleistet sein, dass die Fahrtzeiten der in den FCD aufgezeichneten Fahrzeuge auch die Fahrtzeiten der Grundgesamtheit für ein jeweiliges Zeitintervall wiedergeben. Da die Durchdringungsgrade der FCD oft im niedrigen einstelligen Prozentbereich liegen und die Auswahl der sendenden Fahrzeuge nicht bekannt ist, kann die Übereinstimmung von FCD-Fahrtzeiten und den Fahrtzeiten der Grundgesamtheit nicht ohne weiteres angenommen werden.

Im nächsten Schritt soll deshalb die Qualität der Fahrtzeiten aus FCD beurteilt werden durch den Vergleich mit Fahrtzeiten, die aus Messungen mit automatischer Kennzeichenerfassung gewonnen wurden. Dafür wurden vier reale Straßenzüge ausgewählt, an denen solche Messungen durchgeführt wurden. Die einzelnen Straßenzüge enthalten teilweise mehrere Netzabschnitte mit jeweils zwei Richtungen (nach dem HBS ist ein Netzabschnitt immer richtungsbezogen, sodass die Anzahl der tatsächlichen betrachteten Netzabschnitte somit doppelt so groß ist). In späteren Schritten der Untersuchung wurden zudem Vergleiche zwischen Fahrtzeiten aus FCD und Fahrtzeiten nach HBS-Berechnung sowie aus mikroskopischer Verkehrssimulation angestellt. Für diese Vergleiche wurden weitere reale Netzabschnitte herangezogen, für die aber keine Messung mit Kennzeichenerfassung durchgeführt wurden. Trotzdem werden auch diese Netzabschnitte hier in diesem Unterkapitel vorgestellt.

Die Auswahl der Netzabschnitte erfolgte unter verschiedenen Gesichtspunkten: Zunächst sollen Straßenzüge in Kommunen unterschiedlicher Größenordnung betrachtet werden. Innerhalb dieser sollen die Straßenzüge bzw. die darin enthaltenen Netzabschnitte verschiedene Netzfunktionen aufweisen. Deshalb sind neben angebauten Hauptverkehrsstraßen der Kategoriengruppen HS auch anbaufreie Hauptverkehrsstraßen entsprechend der Kategoriengruppen VS gemäß den RIN (FGSV 2008) enthalten. Die angebauten Hauptverkehrsstraßen weisen oft auch unterschiedliche städtebauliche Randnutzungen auf (überwiegende Wohnnutzung, Mischnutzung mit überwiegend Einzelhandel u. ä. in den Erdgeschossen, überwiegend gewerbliche Nutzungen, aber auch besondere Nutzungen), teilweise auch innerhalb eines Straßenzugs oder Netzabschnitts. Hieraus ergeben sich unterschiedlichen Erschließungsintensitäten (z. B. Parkvorgänge), mit Auswirkungen auf den Verkehrsablauf.

Zudem weisen die Straßenzüge unterschiedliche infrastrukturelle und verkehrliche Merkmale auf. Hinsichtlich der infrastrukturellen Merkmale sind deshalb Straßenzüge mit zwei- und vierstreifigen Fahrbahnquerschnitten, ohne und mit Mittelstreifen, sowie mit unterschiedlichen Führungen des ÖPNV wie auch des Radverkehrs auf der Strecke enthalten. In Bezug auf den ÖPNV sind auch unterschiedliche Arten von Haltestellen (u. a. Busbuchten und Fahrbahnhaltestellen) berücksichtigt. Die Knotenpunkte sind überwiegend signalisiert oder beim Anschluss von nachgeordneten Erschließungsstraßen auch nur mit Verkehrszeichen vorfahrtgeregelt. Ebenso ist ein Straßenzug mit zwei Kreisverkehren enthalten.

Im Hinblick auf die Kfz-Verkehrsstärken weisen die Straßenzüge aufgrund ihrer unterschiedlichen Netzfunktionen aber auch bei den Fahrbahnquerschnitten (Fahrstreifenanzahl) ein breites Spektrum auf. Auch die Belastungen im ÖPNV (Linienanzahl und Bedienungshäufigkeit) und im Radverkehr decken ein breites Spektrum ab.

Ein weiteres Auswahlkriterium bestand in der Verfügbarkeit von FCD. Da für Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen bereits Daten vorlagen, wurden zwei Straßenzüge aus Niedersachsen (Braunschweig und Hannover) und vier Straßenzüge aus Nordrhein-Westfalen (Bergisch Gladbach, Eschweiler, Gütersloh und Remscheid) ausgewählt. Zwei weitere Straßenzüge liegen in Baden-Württemberg (beide in Karlsruhe); hierfür wurden FCD gesondert beschafft.

Zudem wurden auch Straßenzüge ausgewählt, zu denen bereits Verkehrszählungen und weitergehende Untersuchungen – Verkehrsqualitätsnachweise gemäß dem HBS und mikroskopische Verkehrssimulationen – vorlagen. Dies sind drei Straßenzüge (in Eschweiler, Gütersloh und Remscheid).

Nachfolgend sind die acht Straßenzüge beschrieben.

4.1.1 Kriegsstraße (Karlsruhe)

Die Kriegsstraße befindet sich im Westen von Karlsruhe und verbindet die Südtangente (Abschnitt K9657) mit der westlichen Innenstadt und der Südweststadt. Der betrachtete Netzabschnitt im westlichen Bereich der Kriegsstraße zwischen der Südtangente und dem Weinbrennerplatz (konkret: Knotenpunkte mit der Körnerstraße und der Schillerstraße) hat eine Länge von etwa 500 m und gehört zur Bundesstraße 10.

Der Netzabschnitt ist eine angebaute Hauptverkehrsstraße (Kategoriengruppe HS). Der Abschnitt ist durch Wohnnutzungen und teilweise Geschäftsnutzungen in den Erdgeschossen geprägt.

Die Kriegsstraße ist im betrachteten Abschnitt zweistreifig mit einem baulichen Mittelstreifen mit Schrägparkständen, die durch Baumplantungen gegliedert sind. Im gesamten Abschnitt sind zudem auf beiden Seiten durchgängig Längsparkstände vorhanden.

Der Radverkehr wird mit dem Kfz-Verkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn geführt. Ebenso werden die beiden Straßenbahnlinien im Mischverkehr auf der Fahrbahn geführt (straßenbündige Gleiskörper). In dem Abschnitt befindet sich in beiden Fahrtrichtungen jeweils eine Haltestelle, die als Fahrbahnhaltestelle ausgebildet ist.

In dem Abschnitt befinden sich drei mit Verkehrszeichen geregelte Kreuzungen, wobei an einer dieser Kreuzungen eine bedarfsgeregelte Fußgänger-LSA vorhanden ist. In Fahrtrichtung Osten (in Richtung Innenstadt) sind zudem zwei mit Verkehrszeichen geregelte Einmündungen vorhanden.

Im gesamten betrachteten Abschnitt ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h beschränkt.



Bild 4-1: Übersichtskarte zum Straßenzug Kriegsstraße in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.1.2 Fiduciastraße, Killisfeldstraße und Ernst-Friedrich-Straße (Karlsruhe)

Die Fiduciastraße, die im weiteren Verlauf in die Killisfeldstraße und dann weiter in die Ernst-Friedrich-Straße übergeht, liegt im Karlsruher Stadtteil Durlach. Sie stellt die Verbindung zwischen dem Zentrum von Durlach bzw. der Karlsruher Innenstadt und der Autobahn, die über die Südtangente erreicht wird, dar. Insgesamt hat der betrachtete Straßenzug von der Südtangente (Abschnitt B3) bis zur Durlacher Allee eine Länge von rund 2,2 km.

Der Straßenzug besteht aus drei Netzabschnitten: Der Fiduciastraße zwischen Südtangente und Ottostraße mit einer Länge von 1.050 m, der Killisfeldstraße zwischen Ottostraße und Auer Straße mit einer

Länge von 840 m und der Ernst-Friedrich-Straße zwischen Auer Straße und Durlacher Allee mit einer Länge von 350 m.

Der Netzabschnitt der Fiduciastraße besteht aus zwei Strecken, die durch einen Kreisverkehr getrennt sind. Die erste Strecke zwischen Südtangente und Ostmarkstraße/Wachhausstraße ist eine anbaufreie Hauptverkehrsstraße im Vorfeld bebauter Gebiete (Kategoriengruppe VS) mit einer Länge von 670 m. Die zweite Strecke zwischen Ostmarkstraße/Wachhausstraße und Ottostraße mit einer Länge von 380 m liegt innerhalb bebauter Gebiete und ist in Fahrtrichtung Durlacher Zentrum anbaufrei (Kategoriengruppe VS) und in der Gegenrichtung angebaut (Kategoriengruppe HS); hier sind überwiegend gewerbliche und Büronutzungen vorhanden.

Der Netzabschnitt der Killisfeldstraße besteht ebenfalls aus zwei Strecken, die durch eine Kreuzung mit Lichtsignalanlage getrennt sind. Die erste Strecke zwischen Ottostraße und Hildebrandstraße ist 640 m lang, die zweite Strecke zwischen Hildebrandstraße und Auer Straße 200 m. Der gesamte Netzabschnitt ist eine angebaute Hauptverkehrsstraße (Kategoriengruppe HS) und durch Wohn-, Geschäfts- und Gewerbenutzungen geprägt.

Der 350 m lange Netzabschnitt der Ernst-Friedrich-Straße ist ebenfalls eine angebaute Hauptverkehrsstraße (Kategoriengruppe HS) und durch Wohn-, Geschäfts- und Gewerbenutzungen geprägt.

Der gesamte betrachtete Straßenzug ist zweistreifig. Auf der Fiduciastraße sind zwischen Ostmarkstraße/Wachhausstraße und Ottostraße auf der angebauten Seite teilweise Längs- bzw. Senkrechtparkstände vorhanden. Auf der Killisfeldstraße sind zwischen der Lissenstraße und Hildebrandstraße auf der südlichen Seite durchgängig Längsparkstände vorhanden. Zwischen der Hildebrandstraße und der Durlacher Allee ist ein baulicher Mittelstreifen mit Schrägparkständen, die durch Baumplantungen gegliedert sind, vorhanden. Zwischen der Hildebrandstraße und der Auer Straße sind zusätzlich zu den Schrägparkständen im Mittelstreifen auf der nördlichen Seite Schrägparkstände und auf der südlichen Seite Längsparkstände vorhanden. Auf der Ernst-Friedrich-Straße sind zwischen Auer Straße und Durlacher Allee zusätzlich zu den Schrägparkständen im Mittelstreifen auf beiden Seiten Längsparkstände vorhanden.

Auf dem Straßenzug verkehren zwei Buslinien, die diesen aber beide nicht vollständig durchfahren. Je Richtung sind drei Haltestellen vorhanden, von denen eine als Busbucht ausgebildet ist; die übrigen sind Fahrbahnhaltestellen. Des Weiteren verkehren zwischen der Auer Straße und der Durlacher Allee zwei Straßenbahnlinien, die allerdings durch die Führung als besonderer Bahnkörper in Seitenlage den Kfz-Verkehr lediglich an den Knotenpunkten beeinflussen. Eine Straßenbahnhaltestelle ist in diesem Abschnitt nicht vorhanden.

Der Radverkehr wird im anbaufreien Bereich zwischen Südtangente und Ostmarkstraße/Wachhausstraße auf einem parallelen gesonderten Weg geführt. Zwischen der Ostmarkstraße/Wachhausstraße und der Lissenstraße wird er in beide Richtungen im Seitenraum geführt (gemeinsamer Geh-/Radweg). Zwischen der Lissenstraße und Durlacher Allee wird der Radverkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn geführt, wobei der Gehweg zwischen Lissenstraße und Hildebrandstraße auf beiden Seiten für Radfahrer freigegeben ist.

Insgesamt befinden sich ein lichtsignalgeregelter und zwei mit Verkehrszeichen geregelte Hauptknotenpunkte sowie zwei Kreisverkehre auf der Strecke. Zusätzlich dazu sind in beiden Richtungen je drei mit Verkehrszeichen geregelte Einmündungen und diverse Einfahrten zu Geschäften oder Gewerbeflächen vorhanden. Außerdem befinden sich zwei Fußgänger-LSA auf dem Straßenzug.

Auf der Fiduciastraße zwischen Südtangente und Ostmarkstraße/Wachhausstraße beträgt die zulässige Höchstgeschwindigkeit 60 km/h. Zwischen dem Kreisverkehr an der Ostmarkstraße/Wachhausstraße und der Lissenstraße gilt die innerhalb bebauter Gebiete nach StVO grundsätzlich gültige zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Zwischen der Lissenstraße und der Durlacher Allee ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h beschränkt.



Bild 4-2: Übersichtskarte zum Straßenzug Fiduciastraße in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.1.3 Vahrenwalder Straße, Arndtstraße und Schloßwender Straße (Hannover)

Der Straßenzug über die Vahrenwalder Straße, Arndtstraße und Schloßwender Straße bildet die Verbindung zwischen der Anschlussstelle Hannover/Langenhagen an der A 2 und der Hannoveraner Innenstadt. Die Arndtstraße und die Schloßwender Straße sind Teil des nord-östlichen Cityrings und führen tangentielle Verkehre um das Stadtzentrum von Hannover. Der betrachtete Straßenzug zwischen der Dragoner Straße und dem Königsworther Platz (Bremer Damm/Nienburger Straße/Brühlstraße) ist etwa 2,3 km lang.

Bei dem Straßenzug handelt es sich fast über die gesamte Länge um eine angebaute Hauptverkehrsstraße (Kategoriengruppe HS), die durch Wohn- und teilweise Geschäftsnutzungen, teilweise aber auch durch Gewerbenutzungen geprägt ist. Der betrachtete Straßenzug besteht aus drei Netzabschnitten und einem Teil eines Netzabschnitts.

Ersterer ist die Vahrenwalder Straße zwischen der Dragoner Straße und der Hamburger Allee. Dieser Teil ist insgesamt rund 1.100 m lang und Teil des Netzabschnitts zwischen Niedersachsenring/Melanchtonstraße und Hamburger Allee. Er besteht aus drei Strecken zwischen Dragoner Straße und Grabbestraße/Zietenstraße (Länge: 360 m), zwischen Grabbestraße/Zietenstraße und Phillipsbornstraße/Werderstraße (Länge: 490 m) und zwischen Phillipsbornstraße/Werderstraße und Hamburger Allee (Länge: 280 m).

Der zweite Netzabschnitt ist die Arndtstraße zwischen Hamburger Allee und Weidendamm/Herschelstraße. Er ist 190 m lang.

Der dritte Netzabschnitt ist im Zug der Arndtstraße und Schloßwender Straße zwischen Weidendamm/Herschelstraße und Königsworther Platz. Er ist 970 m lang und besteht aus zwei Strecken zwischen Weidendamm/Herschelstraße und An der Christuskirche/Am Klagesmarkt (Länge: 430 m) sowie zwischen An der Christuskirche/Am Klagesmarkt und Königsworther Platz (Länge: 440 m).

Der Straßenzug ist durchgehend vierstreifig und verfügt in der Vahrenwalder Straße über einen baulichen Mittelstreifen; zwischen der Dragoner Straße und der Hischestraße/Dörnbergstraße verläuft hier die U-Bahn oberirdisch. Zwischen Hischestraße/Dörnbergstraße und Königsworther Platz verläuft die U-Bahn unterirdisch; hier ist der Mittelstreifen auf der Vahrenwalder Straße begrünt. In den Bereichen mit Wohn- und Geschäftsnutzungen sind an der Vahrenwalder Straße beidseitig ein Längsparksstände vorhanden. Die Arndtstraße und Schloßwender Straße weisen einen vierstreifigen Querschnitt ohne Mittelstreifen auf. In der Arndtstraße sind beidseitig Längsparksstände vorhanden, auf der nördlichen Seite teilweise auch

Schrägparkstände. Auf der Schloßwender Straße befinden sich im betrachteten Abschnitt keine Parkstände im Seitenraum.

Über den Straßenzug verkehren keine Buslinien, da hier die U-Bahn verkehrt. Auf dem gesamten Straßenzug wird der Radverkehr im Seitenraum geführt.

Die Knotenpunkte sind lichtsignalgesteuert bzw. mit Verkehrszeichen vorfahrtgeregelt.

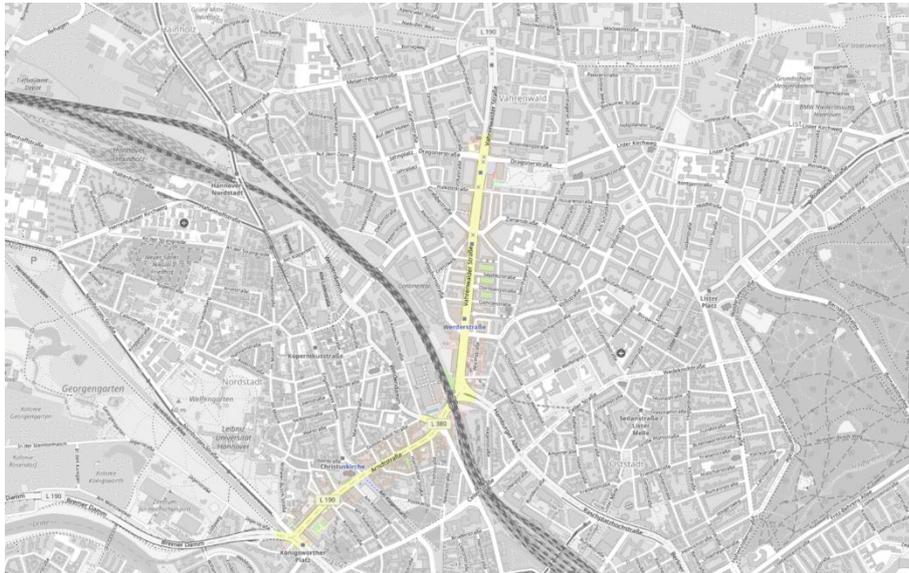


Bild 4-3: Übersichtskarte zum Straßenzug Vahrenwalder Straße, Arndtstraße und Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.1.4 Celler Straße, Lange Straße, Küchenstraße, Hagenbrücke und Hagenmarkt (Braunschweig)

Die Celler Straße, im weiteren Verlauf in die Lange Straße, Küchenstraße, Hagenbrücke und den Hagenmarkt übergehend, ist die Verbindung zwischen dem Autobahnkreuz Braunschweig-Ölper an der A 391 und der Braunschweiger Innenstadt. Der betrachtete Straßenzug zwischen der Sudetenstraße und Wendenstraße/Bohlweg ist etwa 2,4 km lang.

Der Straßenzug beinhaltet drei Netzabschnitte, bei denen es sich um angebaute Hauptverkehrsstraßen handelt (Kategoriengruppe HS). Diese sind durch Wohn- und mit zunehmender Nähe zum Stadtzentrum auch durch Geschäftsnutzungen geprägt.

Der erste Netzabschnitt der Celler Straße zwischen Sudetenstraße und Neustadtring ist 840 m lang. Er besteht aus zwei Strecken zwischen Sudetenstraße und Eichtalstraße (Länge: 660 m) sowie zwischen Eichtalstraße und Neustadtring (Länge: 180 m).

Der zweite Netzabschnitt der Celler Straße zwischen Neustadtring und Güldenstraße/Neuer Weg ist 830 m lang. Er besteht aus zwei Strecken zwischen Neustadtring und Petristraße bzw. Eulenstraße (Länge: 340 m) sowie zwischen Petristraße bzw. Eulenstraße und Güldenstraße/Neuer Weg mit einer Länge: von 490 m.

Der dritte Netzabschnitt im Zuge von Lange Straße, Küchenstraße, Hagenbrücke und Hagenmarkt zwischen Güldenstraße/Neuer Weg und Wendenstraße/Bohlweg ist 710 m lang. Er besteht aus zwei Strecken zwischen Wendenstraße/Bohlweg und Meinhardshof/Alte Waage (Länge: 370 m) sowie zwischen Meinhardshof/Alte Waage und Wendenstraße/Bohlweg (Länge: 340 m).

Der Straßenzug ist im gesamten Verlauf vierstreifig. In der Celler Straße ist zwischen Sudetenstraße und Bei dem Gerichte ein begrünter Mittelstreifen vorhanden. Im übrigen Straßenzug ist ein begrünter Mittelstreifen vorhanden. Über nahezu den gesamten Straßenzug, ausgenommen zwischen der Küchenstraße und dem Hagenmarkt, sind Längsparkstände im Seitenraum vorhanden. Der Radverkehr wird im gesamten Bereich im Seitenraum geführt.

Über den Straßenzug verkehren insgesamt drei Buslinien, die Linie 416 über die gesamte Länge, die Linie 450 ab der Haltestelle Amalienplatz und die Linie 411 ab der Haltestelle Maschstraße. Von den insgesamt zehn Haltestellen sind acht als Fahrbahnhaltestelle und zwei als Busbuchten ausgebildet. Zwischen der Lange Straße und dem Hagenmarkt verkehren keine Busse. Stattdessen verkehrt hier eine Stadtbahnlinie im Mittelstreifen.

Die Knotenpunkte sind lichtsignalgesteuert bzw. mit Verkehrszeichen vorfahrts geregelt. Stadteinwärts sind zudem Einfahrten zu einem Krankenhaus und einem Einkaufszentrum vorhanden, stadtauswärts die Einfahrt zu einem Nahversorgungszentrum. Zusätzlich zu den lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten sind neun Fußgänger-LSA vorhanden.



Bild 4-4: Übersichtskarte zum Straßenzug Celler Straße – Langer Straße – Hagenbrücke in Braunschweig
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.1.5 Frankenforster Straße und Kölner Straße (Bergisch Gladbach)

Die Frankenforster Straße und im weiteren Verlauf die Kölner Straße stellen die Verbindung zwischen der Anschlussstelle Bergisch Gladbach-Frankenforst an der A 4 und dem Zentrum von Bensberg dar. Der Straßenzug zwischen der Brüderstraße und der Buddestraße/Falltorstraße ist insgesamt etwa 2,2 km lang und überwiegend angebaut (Kategoriengruppe HS), zwischen der Brüderstraße und der Buchenallee/Ernst-Reuter-Straße ist die Frankenforster Straße eine (überwiegend) anbaufreie Hauptverkehrsstraße (Kategoriengruppe HS) mit Wohn- und Geschäftsnutzungen, aber auch gewerblichen Nutzungen.

Der Straßenzug beinhaltet zwei Netzabschnitte: Der erste, anbaufreie Netzabschnitt der Frankenforster Straße zwischen Brüderstraße und Buchenallee/Ernst-Reuter-Straße ist 720 m lang. Der zweite Netzabschnitt im Zuge der Frankenforster Straße und Kölner Straße zwischen Buchenallee/Ernst-Reuter-Straße und Buddestraße/Falltorstraße ist 1450 m lang. Er besteht aus zwei Strecken zwischen Buchenallee/Ernst-Reuter-Straße und Neuenweg/Dariusstraße (Länge: 930 m) sowie zwischen Neuenweg/Dariusstraße und Buddestraße/Falltorstraße (Länge: 520 m).

Auf der letztgenannten Strecke befindet sich ein schienengleicher Bahnübergang. Hier kreuzt die Stadtbahn zwischen Köln und Bergisch Gladbach.

Der Straßenzug ist durchgängig zweistreifig. In den angebauten Bereichen sind teilweise einseitig, teilweise beidseitig Längsparkstände vorhanden. Über den Straßenzug verkehren mehrere Buslinien. Der Radverkehr wird überwiegend auf einem Radweg im Seitenraum geführt.

Die Knotenpunkte sind lichtsignalgesteuert bzw. mit Verkehrszeichen vorfahrtgeregelt.



Bild 4-5: Übersichtskarte zum Straßenzug Frankenforster Straße und Kölner Straße in Bergisch Gladbach
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.1.6 Indestraße (Eschweiler)

Die Indestraße liegt im Zuge der L 223, der Ortsdurchfahrt von Eschweiler. Sie verläuft parallel zur Inde und stellt gemeinsam mit dieser die städtebauliche Trennung zwischen nördlicher und südlicher Innenstadt von Eschweiler dar.

Der betrachtete Netzabschnitt zwischen Langwahn und Peilsgasse/Bergrather Straße ist etwa 790 m lang. Auf der nördlichen Seite ist die Indestraße angebaut, auf der südlichen Seite wegen des parallelen Verlaufs zur Inde anbaufrei. Der Netzabschnitt besteht aus vier, teilweise sehr kurzen Strecken zwischen Langwahn und Kochsgasse (Länge: 170 m), zwischen Kochsgasse und Grabenstraße (Länge: 150 m), zwischen Grabenstraße und Uferstraße (Länge: 70 m) sowie zwischen Uferstraße und Peilsgasse/Bergrather (Länge: 400 m).

Der Straßenzug ist durchgängig zweistreifig. Auf der nördlichen Seite sind nahezu durchgängig Längsparkstände vorhanden. Über den Straßenzug verkehren mehrere Buslinien; die Bushaltestellen sind als Buchten ausgebildet. Der Radverkehr wird auf beiden Seiten im Mischverkehr mit Schutzstreifen geführt.

Die Knotenpunkte sind lichtsignalgesteuert bzw. mit Verkehrszeichen vorfahrtgeregelt.



Bild 4-6: Übersichtskarte zur Indestraße (L 223) in Eschweiler
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.1.7 Verler Straße (Gütersloh)

Die Verler Straße (L 757), im weiteren Verlauf in die Friedrich-Ebert-Straße übergehend, ist die Verbindung zwischen der Anschlussstelle Gütersloh an der A 2 und der Gütersloher Innenstadt. Der betrachtete Straßenzug ist rund 3,7 km lang.

Der Straßenzug beinhaltet sechs Netzabschnitte, teilweise anbaufreie Hauptverkehrsstraßen (Kategoriegruppe VS), sowohl im Vorfeld als auch innerhalb bebauter Gebiete, teilweise angebaute Hauptverkehrsstraßen (Kategoriegruppe HS). Die angebauten Abschnitte, darunter die Ortsdurchfahrt Spexard, sind durch Wohn- und teilweise Geschäftsnutzungen geprägt, teilweise aber auch durch Gewerbenutzungen.

Der erste Netzabschnitt zwischen der Anschlussstelle Gütersloh und der Ohmstraße ist anbaufrei und 800 m lang.

Der zweite Netzabschnitt zwischen der Ohmstraße und dem Ortsrand von Spexard ist überwiegend angebaut und 680 m lang. Er besteht aus zwei Strecken zwischen Ohmstraße und Am Hüttenbrink/Bruder-Konrad-Straße (Länge: 280 m) sowie zwischen Am Hüttenbrink/Bruder-Konrad-Straße und dem Ortsrand von Spexard (Länge: 400 m).

Der dritte Netzabschnitt zwischen dem Ortsrand von Spexard und Auf der Haar ist anbaufrei (außerhalb und im Vorfeld bebauter Gebiete) und 850 m lang.

Der vierte Netzabschnitt zwischen Auf der Haar und dem Stadtring Sundern ist anbaufrei (im Vorfeld und innerhalb bebauter Gebiete) und 770 m lang.

Der fünfte Netzabschnitt zwischen dem Stadtring Sundern und Kampstraße/Alte Verler Straße ist überwiegend anbaufrei (innerhalb bebauter Gebiete) und 530 m lang.

Der sechste Netzabschnitt zwischen Kampstraße/Alte Verler Straße und Carl-Bertelsmann-Straße ist angebaut und 580 m lang.

Die Verler Straße ist überwiegend zweistreifig, im innenstadtnahen Abschnitt weist sie jedoch vier durchgehende Fahrstreifen auf; hier verfügt sie teilweise auch über einen begrünten Mittelstreifen. In den anbaufreien Abschnitten im Vorfeld bebauter Gebiete verfügt der Fahrbahnquerschnitt über einen Seitenstreifen.

In den angebauten Abschnitten mit Wohn- und Geschäftsnutzungen sind teilweise Längsparkstände vorhanden. Über die Verler Straße verkehren mehrere Buslinien im Mischverkehr, die insgesamt sechs Haltestellen sind als Busbuchten ausgebildet. Der Radverkehr wird im Seitenraum geführt, in den anbaufreien Abschnitten im Vorfeld bebauter Gebiete teilweise auf dem vorhandenen Seitenstreifen.

Die insgesamt sieben Hauptknotenpunkte sind lichtsignalgesteuert. Stadteinwärts sind zudem acht, stadtauswärts sechs mit Verkehrszeichen geregelte Einmündungen vorhanden. Zusätzlich ist eine Fußgänger-LSA vorhanden.



Bild 4-7: Übersichtskarte zur Verler Straße (L 757) in Gütersloh
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.1.8 Elberfelder Straße, Wansbeckstraße und Nordstraße (Remscheid)

Die Elberfelder Straße, Wansbeckstraße und Nordstraße zwischen Hochstraße/Peterstraße und Bismarckstraße (B 229) ist Teil des sogenannten Innenstadturnings von Remscheid. Der Straßenzug ist teilweise anbaufrei, teilweise angebaut und rund 1,0 km lang.

Der Straßenzug besteht aus zwei Netzabschnitten.

Der erste Netzabschnitt der Elberfelder Straße zwischen Hochstraße/Peterstraße und Ludwigstraße ist angebaut und 520 m lang.

Der zweite Netzabschnitt im Zuge der Wansbeckstraße und Nordstraße zwischen Ludwigstraße und Bismarckstraße ist anbaufrei und 530 m lang. Er besteht aus zwei Strecken zwischen Ludwigstraße und Nordstraße (Länge: 450 m) sowie zwischen Nordstraße und Bismarckstraße (Länge: 180 m).

Der Straßenzug ist vierstreifig. Zwischen Hochstraße/Peterstraße und Konrad-Adenauer-Straße sowie zwischen Nordstraße und Bismarckstraße ist ein begrünter Mittelstreifen vorhanden. In diesen beiden Bereichen sind auf der nördlichen Seite teilweise Längsparkstände vorhanden. Über den Straßenzug verkehren mehrere Buslinien.

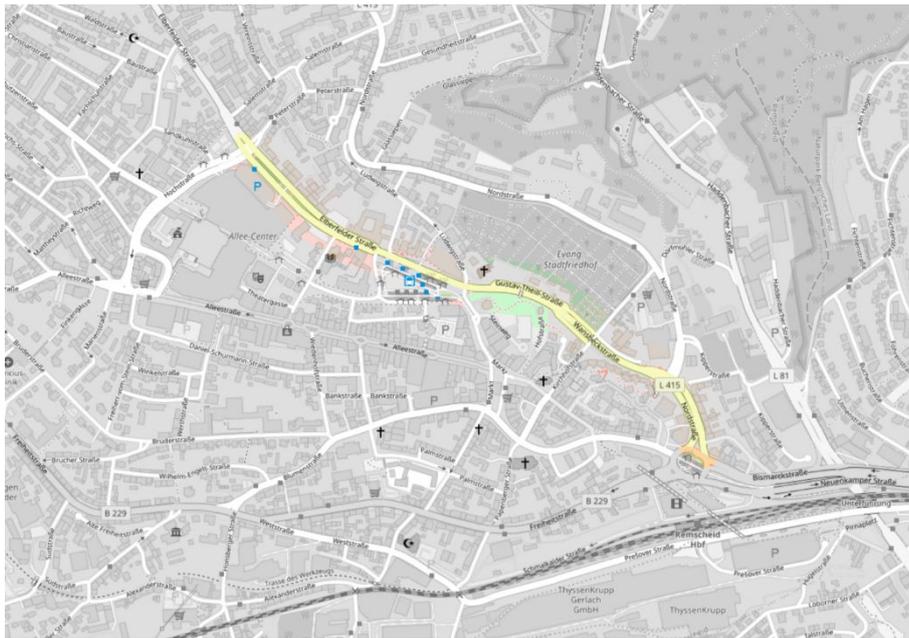


Bild 4-8: Übersichtskarte zur Elberfelder Straße, Wansbeckstraße und Nordstraße in Remscheid
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

4.2 Messung der Fahrtzeiten

4.2.1 Aufbau und Konfiguration der Messtechnik

Auf vier ausgewählten Untersuchungsstrecken in Karlsruhe, Hannover und Braunschweig wurden umfangreiche empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf durchgeführt. Diese Erhebungen umfassten die Erfassung von Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen mit Hilfe von Kennzeichenerfassungsgeräten (Automatic Number Plate Recognition, ANPR) sowie das Filmen von bestimmten Bereichen der Strecken mit Videokameras, um daraus später die Verkehrsströme an den Knotenpunkten zu ermitteln. Die Erhebungen erfolgten unter Einhaltung des Datenschutzes und wurden in Abstimmung mit den jeweils zuständigen Straßenverkehrsbehörden durchgeführt.

Bei allen Streckenzügen wurden beide Fahrtrichtungen gemessen, zum Teil gleichzeitig, zum Teil aufgrund der Verfügbarkeit der Messgeräte an verschiedenen Tagen.

Die zur Erhebung der Fahrtzeiten eingesetzten Kennzeichenerfassungssysteme bestehen jeweils aus einer Infrarotkamera, der Auswerteeinheit (Notebook), der Verkabelung sowie einer Stromversorgung über Generatoren oder Batterien. Die Kameras liefern fahrstreifenbezogene Infrarotbilder der Kennzeichen, welche durch optische Zeichenerkennung (Optical Character Recognition, OCR) digitalisiert werden. Die Kennzeichen werden zum Datenschutz verschlüsselt, indem aus dem Kennzeichentext ein Salted-MD5-Hash-Code generiert wird, von dem nicht auf das ursprüngliche Kennzeichen zurück geschlossen werden kann. Die verschlüsselten Kennzeichencodes werden zusammen mit Ort und Zeit der Erfassung in einer verschlüsselten Datenbank gespeichert. Weitere Daten werden von der Software nicht erhoben oder gespeichert. Die Festplatten sowie die zur Übertragung verwendeten Datenträger sind ebenfalls verschlüsselt und passwortgeschützt. Eine Erkennung von beispielsweise Gesichtern der Fahrer ist mit dem verwendeten Erfassungssystem nicht möglich. Damit ist auch für die Erhebung der Validierungsdaten eine vollständige Anonymisierung sichergestellt. Der Aufbau der ANPR-Kameras ist anhand eines Messquerschnittes der Messung in Hannover in Bild 4-9 beispielhaft dargestellt.



Bild 4-9: Beispiel für den Aufbau der ANPR-Messgeräte

Zusätzlich zur Erfassung der Fahrtzeiten wurden an den vier Untersuchungsstrecken für den jeweiligen Erhebungstag Videokameras installiert, um die Fahrtbeziehungen an den Knotenpunkten sowie das Parkverhalten zu dokumentieren. Diese Daten wurden im weiteren Projektverlauf für die Kalibrierung und Validierung der mikroskopischen Verkehrssimulationen verwendet. Die Aufzeichnungen weisen dabei eine geringe Auflösung auf, die eine Erkennung von Gesichtern oder Kennzeichen auf den Videos ausschließt.

Außerdem wurden an den Untersuchungsstrecken in Karlsruhe Seitenstreifen-Radargeräte genutzt, um die Abstände und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zu messen. Dabei ergaben sich an einigen Messorten Probleme, z.B. bei im Hintergrund parkenden Fahrzeugen oder durchfahrenden Bahnen, die als mehrere kleine Fahrzeuge detektiert wurden. Die Nutzung der Fahrtzeitdaten aus den ANPR ist durch diese Probleme bei den Radargeräten nicht beeinträchtigt.

Während der Erhebungen wurden die Standorte und die Messgeräte laufend durch das vor Ort eingesetzte Personal überwacht, um die Geräte vor Vandalismus und Diebstahl zu schützen, aber auch um die Erfassungsraten jede halbe Stunde zu überprüfen und die Kameras eventuell neu auszurichten. Dadurch konnte eine durchgehende Funktionsweise der Messgeräte sichergestellt werden.

In den folgenden Abschnitten wird der Messaufbau an den vier ausgewählten Untersuchungsstrecken detailliert beschrieben.

Kriegsstraße (Karlsruhe)

Die Erhebung im westlichen Teil der Kriegsstraße in Karlsruhe fand am 28.09.2021 statt. Dazu wurden, vier ANPR-Geräte, elf Videokameras und fünf Seitenstreifen-Radargeräte eingesetzt. Die genauen Standorte der Geräte sind in den nachfolgenden Karten (Bild 4-10 bis Bild 4-14) dargestellt.

Die Erfassung der Fahrtzeiten erfolgte an zwei Messquerschnitten am Anfang und Ende der Untersuchungsstrecke zwischen 7:00 und 20:00 Uhr. Über den Untersuchungszeitraum hinweg wurde eine Erfassungsrate von über 95% bei allen Geräten erreicht.

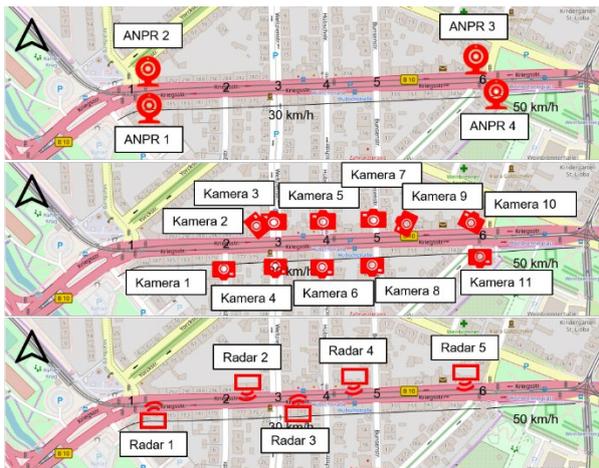


Bild 4-10: Übersichtskarten des Messaufbaus Kriegsstraße in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Der westliche Messquerschnitt (Bild 4-11) befand sich am Knotenpunkt Kriegsstraße – Wichernstraße. ANPR 2 wurde auf dem nördlichen Gehweg platziert, ANPR 1 südlich der in der Mitte der Straße verlaufenden Straßenbahnschienen. Radar 1 wurde zu ANPR 1 an den Beginn der Untersuchungsstrecke aufgestellt, um die Abstände der in die Untersuchungsstrecke einfahrenden Fahrzeuge zu erfassen. Radar 2 wurde genutzt, um die Geschwindigkeiten zu messen. Kamera 1 nimmt die Abbiegebeziehungen des Knotenpunktes auf.

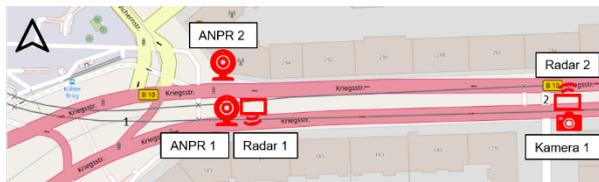


Bild 4-11: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße West in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Die Kameras 3 bis 8 wurden ebenfalls genutzt, um die Abbiegebeziehungen an den nachfolgenden Knotenpunkten zu ermitteln. Außerdem wurden Kamera 2 und 9 (Bild 4-12 und Bild 4-13) so ausgerichtet, dass Parkvorgänge beobachtet werden konnten, um Daten dieser für den Aufbau der Mikrosimulation zu erhalten. Die Kameras wurden dabei möglichst weit nach oben an Laternen oder andere hohe Pfosten, wie z.B. von der Oberleitung der Straßenbahn, angebracht. Die beiden Radargeräte 3 und 4 wurden auf eingemantelten Metallstangen in der Mitte der Strecke, möglichst weit weg von Knotenpunkten, angebracht, um die Geschwindigkeiten zu messen.

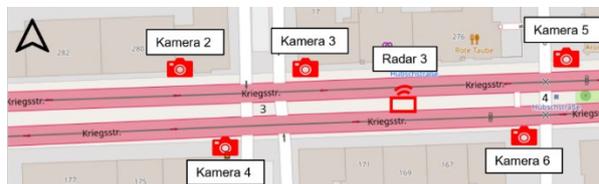


Bild 4-12: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße Mitte-West in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

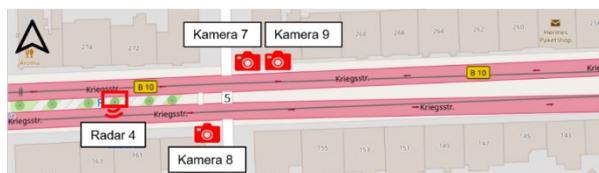


Bild 4-13: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße Mitte-Ost in Karlsruhe

(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Am östlichen Messquerschnitt (Bild 4-14) wurden die beiden ANPR-Geräte (ANPR 3 und 4) auf der jeweiligen Straßenseite hinter dem Knotenpunkt Kriegsstraße – Körnerstraße auf den vorhandenen Mittelinseln angebracht. Radar 5 wurde genauso wie Radar 1 dazu genutzt, die Abstände der Fahrzeuge am Startquerschnitt dieser Fahrtrichtung zu erfassen. Kamera 10 und 11 nahmen die Knotenpunkte auf.



Bild 4-14: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße Ost in Karlsruhe

(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße (Karlsruhe)

Die Erhebung auf der Untersuchungsstrecke Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße fand am 6.10.2021 statt. Dabei waren sechs ANPR-Geräte, elf Videokameras und sechs Seitenstreifen-Radargeräte im Einsatz. Eine Übersicht über den Messaufbau ist in Bild 4-15 zu sehen. Die Gerätetechnik sowie die Überwachung und Befestigung der Geräte erfolgte analog zur Kriegsstraße in Karlsruhe. Bei allen Geräten wurde über den Messzeitraum hinweg eine Erfassungsrate von über 96% erreicht.

Die Erfassung der Fahrtzeiten erfolgte an drei Messquerschnitten. Auch an dieser Untersuchungsstrecke wurden die Abbiegebeziehungen an allen Knotenpunkten und fast allen Einfahrten zu Geschäfts- oder Gewerbeflächen durch Videokameras aufgenommen. Ebenfalls wurden auch hier fünf Radargeräte aufgehängt bzw. an selbst aufgebauten Stativen befestigt.

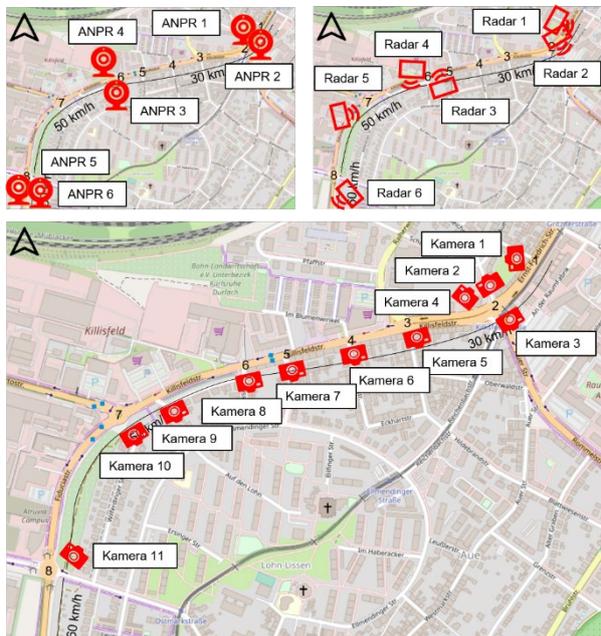


Bild 4-15: Übersichtskarten des Messaufbaus Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße in Karlsruhe

(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Am nördlichen Messquerschnitt (Bild 4-16) wurden die beiden ANPR-Geräte (ANPR 1 und 2) südlich des Knotenpunktes Ernst-Friedrich-Straße – Christofstraße – Gritznerstraße angebracht. ANPR 1 wurde dabei im Seitenraum an einem Verkehrsschild befestigt, ANPR 2 an einem Fahrradbügel im begrünten Mittelstreifen. Die Abbiegebeziehungen an den Knotenpunkten wurden mit Videokameras erfasst, außerdem

diente Kamera 4 zum Aufnehmen der Parkvorgänge. Radar 1 diente zur Abstandsmessung der in den Untersuchungsabschnitt einfahrenden Fahrzeuge, Radar 2 zur Messung der Geschwindigkeiten.

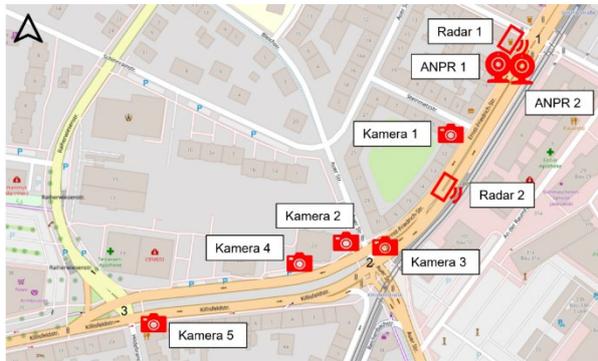


Bild 4-16: Detailkarte Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße Nord in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

ANPR 3 und 4 wurden in der Nähe des Knotenpunktes Killisfeldstraße – Lissenstraße an Verkehrsschildern angebracht. Die Knotenpunktströme und die Abbiegebeziehungen mancher Einfahrten wurden durch Kameras aufgenommen. Radar 3 und 4 dienten zur Messung der Geschwindigkeiten im mittleren Abschnitt. Die Standorte der Geräte sind auf Bild 4-17 dargestellt.

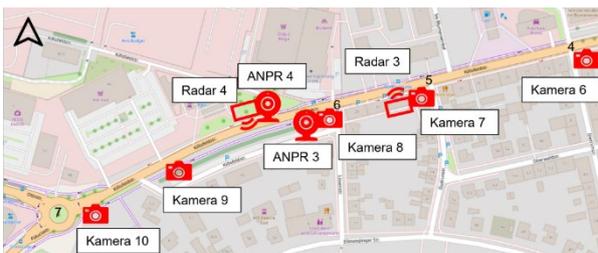


Bild 4-17: Detailkarte Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße Mitte in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Am südlichen Messquerschnitt (Bild 4-18) wurden die beiden ANPR 5 und 6 im Seitenraum an einem Verkehrsschild bzw. an einer Laterne aufgehängt. Die Abbiegebeziehungen des Kreisverkehrs wurden durch Kamera 11 aufgenommen, die Geschwindigkeiten durch Radar 5 und die Abstände der in die Untersuchungsstrecke einfahrenden Fahrzeuge von Radar 6 gemessen.



Bild 4-18: Detailkarte Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße Süd in Karlsruhe
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße (Hannover)

Die Erhebungen auf der Untersuchungsstrecke Vahrenwalder Straße – Schlosswender Straße in Hannover fanden am 04.10.2021 und 11.10.2021 statt. Dabei wurden die Fahrtzeiten von Norden nach Süden am 04.10. und die Fahrtzeiten in der Gegenrichtung am 11.10. erhoben. Hierzu wurden insgesamt sechs

ANPR-Geräte sowie sechs Videokameras eingesetzt. Bild 4-19 zeigt die Karte der Untersuchungsstrecke mit den Messquerschnitten für die ANPR-Messung und den Knotenpunkten an denen Kameras installiert wurden. Am 04.10. kam es laut Aussagen der Verkehrsmanagementzentrale Hannover zu Verkehrsstörungen am Königswörther Platz, der am süd-westlichen Ende der Untersuchungsstrecke liegt. Hierdurch kam es am Nachmittag (von ca. 16:55 bis ca. 19:00 Uhr) zu Staus auf den anliegenden Straßen.

Die Erhebung der Fahrtzeiten mit Hilfe von ANPR-Geräten erfolgte abschnittsweise mit drei Messquerschnitten. Da der Stromgenerator für die Messgeräte für eine sichere Betankung ausgeschaltet werden muss, wurde die Messung für das Nachtanken für wenige Minuten unterbrochen und anschließend fortgeführt.



Bild 4-19: Übersichtskarte des Messaufbaus Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Der Messquerschnitt „ANPR 1“ (s. Bild 4-20) befand sich an der Vahrenwalder Straße auf Höhe einer Fußgänger-LSA, welche die Hischestraße und die Dörnbergstraße miteinander verbindet. Der MQ ANPR 1 wurde an beiden Messtagen mit zwei Messgeräten ausgestattet. Zur Erfassung der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen wurde eine ANPR-Kamera auf dem begrünten Mittelstreifen positioniert. Zur Erfassung der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen wurde eine weitere ANPR-Kamera zwischen den an der Seite parkenden Fahrzeugen positioniert.



Bild 4-20: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 1 Vahrenwalder Straße - Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Der Messquerschnitt „ANPR 2“ (s. Bild 4-21) befand sich in der Arndtstraße. Auch hier wurden an jedem Erhebungstag zwei ANPR-Geräte aufgestellt, die jeweils einen Fahrstreifen pro Fahrtrichtung erfasst haben.

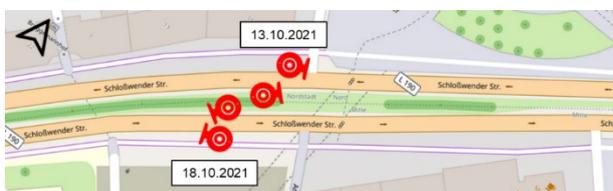


Bild 4-21: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 2 Untersuchungsstrecke Vahrenwalder Straße - Schloßwender Straße in Hannover
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Der letzte ANPR-Messquerschnitt („ANPR 3“), der in Bild 4-22 dargestellt ist, befand sich in der Schloßwender Straße auf Höhe der Christuskirche. Hier wurden erneut an jedem Erhebungstag zwei ANPR-Messgeräte aufgestellt und jeweils auf einen der Fahrstreifen ausgerichtet.



Bild 4-22: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 3 Untersuchungsstrecke Vahrenwalder Straße - Schloßwender Straße in Hannover
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Neben den ANPR-Messungen wurden an beiden Tagen zwischen 08:00 Uhr und 17:00 Uhr die Knotenpunkte Vahrenwalder Straße – Werderstraße – Philipsbornstraße, Vahrenwalder Straße – Arndtstraße – Hamburger Allee und Arndtstraße – Weidendam – Herschelstraße mit Videokameras aufgezeichnet.

Celler Straße – Hagenmarkt (Braunschweig)

Die Erhebungen auf der Untersuchungsstrecke Celler Straße - Hagenmarkt in Braunschweig fanden am 13.10.2021 und 18.10.2021 statt. Dabei wurden die Fahrtzeiten stadteinwärts am 13.10. und die Fahrtzeiten stadtauswärts am 18.10. erhoben. Hierzu wurden insgesamt fünf ANPR-Geräte sowie fünf Videokameras eingesetzt. Bild 4-23 zeigt die eine Karte der Untersuchungsstrecke mit den Messquerschnitten für die ANPR-Messung und den Knotenpunkten an denen Kameras installiert wurden.

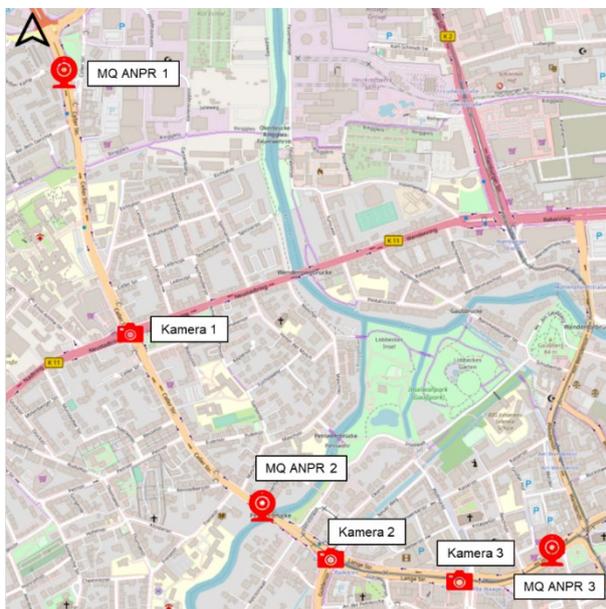


Bild 4-23: Übersichtskarte des Messaufbaus Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Die Erhebung der Fahrtzeiten mit Hilfe von ANPR-Geräten erfolgte auch hier abschnittsweise mit drei Messquerschnitten.

Der Messquerschnitt „ANPR 1“ (s. Bild 4-24) befand sich an der Celler Straße in unmittelbarer Nähe zur Autobahnein- bzw. -ausfahrt Celler Straße. Zur Messung der Fahrtzeiten stadteinwärts am 13.10. wurde jeweils ein ANPR-Messgerät pro Fahrstreifen eingesetzt.



Bild 4-24: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 1 Untersuchungsstrecke Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Der Messquerschnitt „ANPR 2“ (s. Bild 4-25) lag im weiteren Verlauf der Celler Straße auf Höhe der Petri-
torbrücke. Da an dieser Stelle kein Mittelstreifen für das Aufstellen der Messgeräte zur Verfügung steht,
wurden an beiden Erhebungstagen beide Fahrstreifen mit einer ANPR-Kamera erfasst.

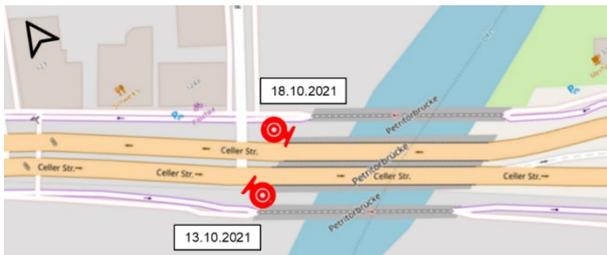


Bild 4-25: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 2 Untersuchungsstrecke Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Der dritte Messquerschnitt („ANPR 3“) befand sich im Bereich des Hagenmarktes entlang der Straße „Ha-
genbrücke“ (s. Bild 4-26). Aufgrund der beengten Platzverhältnisse konnten in diesem Bereich die beiden
Messstandorte nicht direkt gegenüberliegen, sondern mussten ca. 150 m versetzt positioniert werden. Für
die Messungen stadteinwärts am 13.11. wurden zwei ANPR-Kameras auf Höhe der Einmündung in die
Straße „Höhe“ positioniert, die jeweils einen Fahrstreifen erfassen. Die Messung am 18.11. erfolgten dann
weiter östlich auf Höhe des Hagenmarktes.

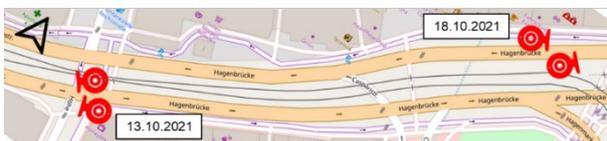


Bild 4-26: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 3 Untersuchungsstrecke Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Zusätzlich zur Erhebung von Fahrtzeiten wurden an beiden Tagen zwischen 07:00 und 17:00 Uhr an den
Knotenpunkten Amalienplatz, Radeklint und Lange Straße – Küchenstraße – Alte Waage – Meinhardshof
Videokameras zur Erfassung des Verkehrsablaufs installiert.

4.2.2 Erhebungsergebnisse

Nach Abschluss der Messungen wurden die aufgezeichneten Daten aufbereitet und anschließend analysiert. Für die ANPR-Messungen wurden hierzu zunächst die Daten aller Messgeräte zu einem Gesamtdatensatz pro Erhebungstag und Fahrtrichtung zusammengefasst. Um aus diesen einzelnen Erfassungen der Messgeräte Fahrtzeiten identifizieren zu können, mussten die Daten allerdings noch so aufbereitet werden, dass die Durchfahrten einzelner Messabschnitte oder der gesamten Untersuchungsstrecke betrachtet werden konnten. Hierzu wurden die Datenpunkte zunächst nach dem erfassten Kennzeichen gruppiert und dabei doppelte Erfassungen sowie Datensätze mit nur einer Erfassung pro Kennzeichen gelöscht. Anschließend wurde für jeden Datenpunkt überprüft, ob dieser am ersten der Messquerschnitte erfasst wurde. Ist dies der Fall gewesen, wurde eine neue Reihe im Ergebnisdatensatz angelegt. Für die nachfolgenden Datenpunkte wurde anschließend die zeitliche Differenz zum vorausgehenden Punkt berechnet. Lag dieser unterhalb einer streckenabhängig eingestellten Schwelle (um Fahrzeuge auszuschließen, die aus nicht verkehrlichen Gründen gehalten haben), wurde dieser zweite Punkt in den Datensatz hinzugefügt. Wurde dann bei den nachfolgenden Datenpunkten der letzte Messquerschnitt erreicht, wurde erneut eine neue Zeile im Ergebnisdatensatz angelegt. Sobald dieser Prozess für alle erfassten Kennzeichen durchlaufen wurde, lag ein Datensatz vor, aus dem die Fahrtzeiten für jede Durchfahrt der Untersuchungsstrecke berechnet werden konnte.

Der aus der Datenaufbereitung resultierende Datensatz wurde anschließend dafür genutzt, Fahrtzeiten auf den Abschnitten der Untersuchungsstrecken zu bestimmen und darzustellen. Die Fahrtzeit ergibt sich als Differenz der im Datensatz hinterlegten Zeitstempel an den definierten Messquerschnitten. Um Ausreißer aus den Daten (z.B. Fahrzeuge, die zwischen zwei Messquerschnitten gehalten haben) herauszufiltern, wurde für jede Verteilung der Fahrtzeiten das Maximum und Minimum bestimmt (Bild 4-27). Zur Glättung der Zeitreihen wurde anschließend ein gleitender Median mit einem Betrachtungsfenster von 15 Minuten gebildet.

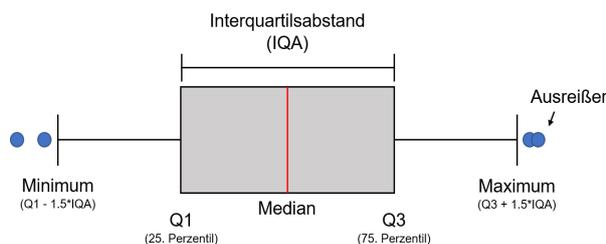


Bild 4-27: Interquartilsabstand bei Boxplots

In den folgenden Abschnitten wird jeweils auf die Ergebnisse der Erhebungen auf den einzelnen Untersuchungsstrecken eingegangen. Die Fahrtzeiten werden dabei abschnittsweise analysiert. Die Uhrzeit auf der x-Achse bezieht sich dabei auf die Zeit, zu der die Fahrzeuge den ersten der Messquerschnitte durchfahren haben. Der gleitende Median ist jeweils in Rot dargestellt.

Die Bezeichnungen „A1“, „A2“ usw. beziehen sich auf die Standorte der ANPR-Geräte gleicher Nummer in der obigen Kartendarstellung.

Kriegsstraße (Karlsruhe)

Im Verlauf des Tages ist stadteinwärts (von A1 zu A4) eine deutliche Morgenspitze in den Fahrtzeiten erkennbar. Innerhalb dieser zeichnet sich ein stark schwankendes Muster ab, bei dem circa jede halbe Stunde erhöhte Fahrtzeiten aufgezeichnet wurden. Dies ist wohl auf die erhöhte Nachfrage zur vollen bzw. halben Stunde zurückzuführen. In der Gegenrichtung stadtauswärts (von A3 zu A2) zeichnet sich eine Mittagsspitze zwischen 13 und 14 Uhr ab.

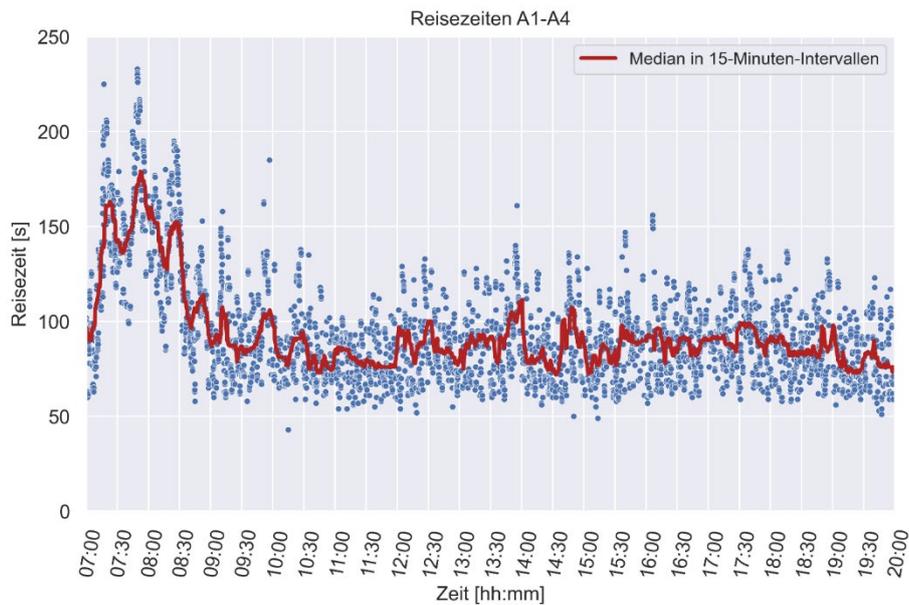


Bild 4-28: Fahrtzeiten Kriegsstraße stadteinwärts (Karlsruhe)

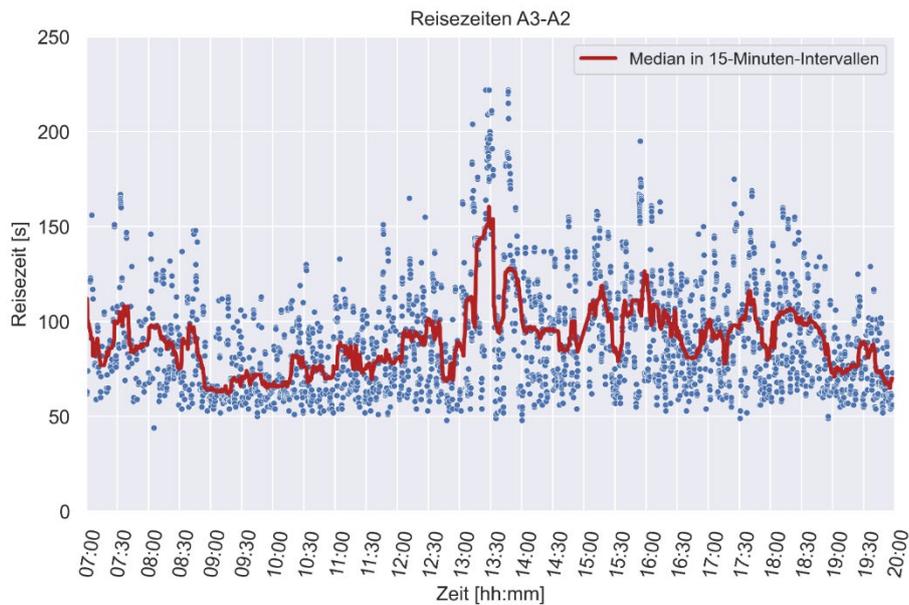


Bild 4-29: Fahrtzeiten Kriegsstraße stadtauswärts (Karlsruhe)

Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße (Karlsruhe)

In den folgenden Darstellungen sind einige sehr hohe Werte der Fahrtzeiten bei den Verläufen von A1 zu A4 und A4 zu A5 nicht zu sehen, da zur besseren Erkennbarkeit die Abbildung auf die große Mehrheit der Werte skaliert wurde.

Im ersten Abschnitt stadtauswärts (A1-A4) unterliegen die Fahrtzeiten im Verlauf des Tages keinen großen Schwankungen. Die sehr hohen Medianwerte zwischen 7:00 und 7:30 Uhr sowie 10:00 und 10:30 Uhr kommen durch sehr wenig vorhandene Messwerte zustande, da in diesen Zeitbereichen die Durchfahrt durch den gesamten Abschnitt wohl nur selten vorkommt. Es handelt sich hierbei wahrscheinlich nicht um

erhöhte Fahrtzeiten durch Störquellen, sondern vermutlich um zwischendurch Parkende, da im gleichen Zeitraum auch Fahrtzeiten im Normalbereich gemessen wurden.

Im zweiten Abschnitt stadtauswärts (A4-A5) sind jeweils erhöhte Fahrtzeiten zwischen 7:00 und 8:00 Uhr sowie 16:30 und 17:00 erkennbar. Generell sind die Fahrtzeiten in der zweiten Hälfte des Tages höher als in der ersten Hälfte. Stadteinwärts (A6-A3 und A3-A2) schwanken die Fahrtzeiten im Verlauf des Tages wenig und sind lediglich im ersten Abschnitt zweimal nachmittags leicht erhöht.

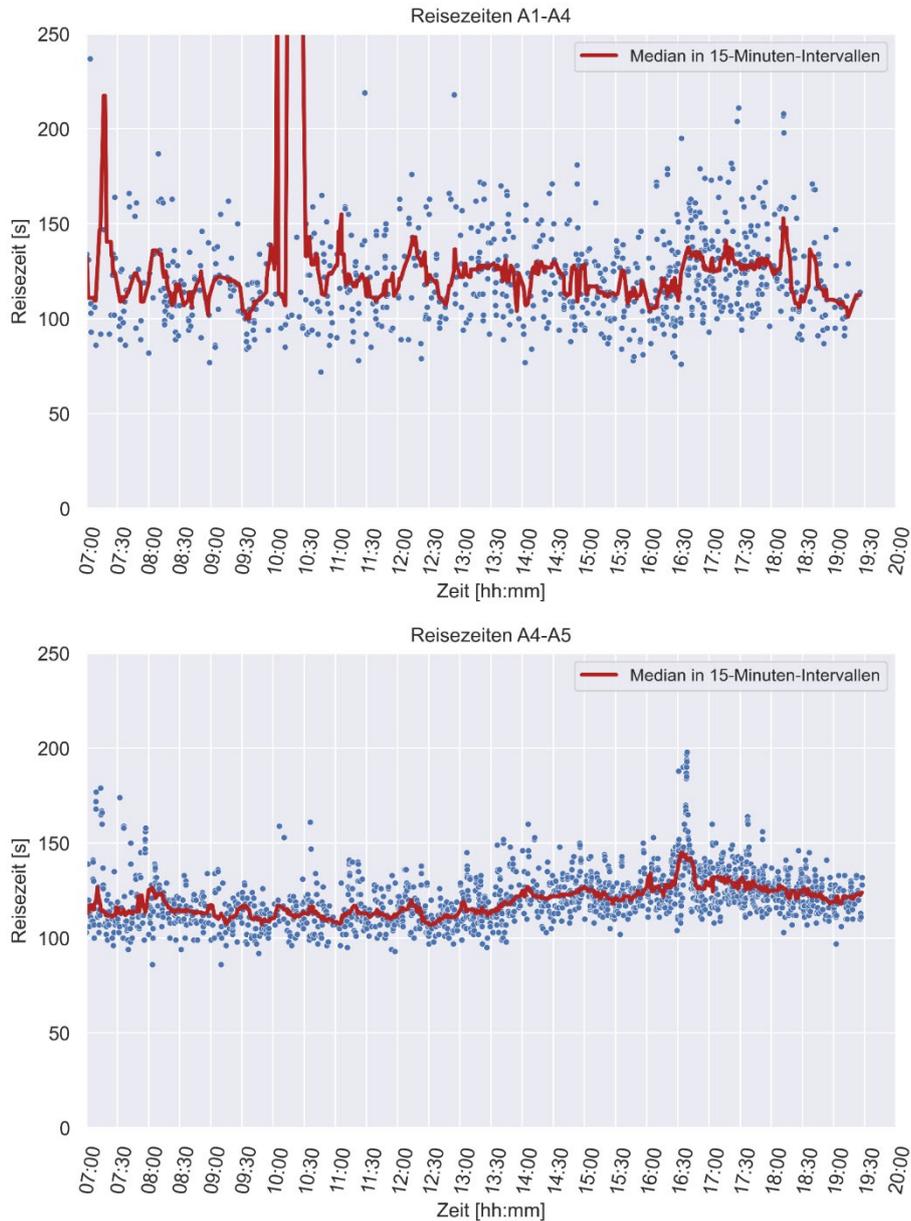


Bild 4-30: Fahrtzeiten Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße stadtauswärts (Karlsruhe)

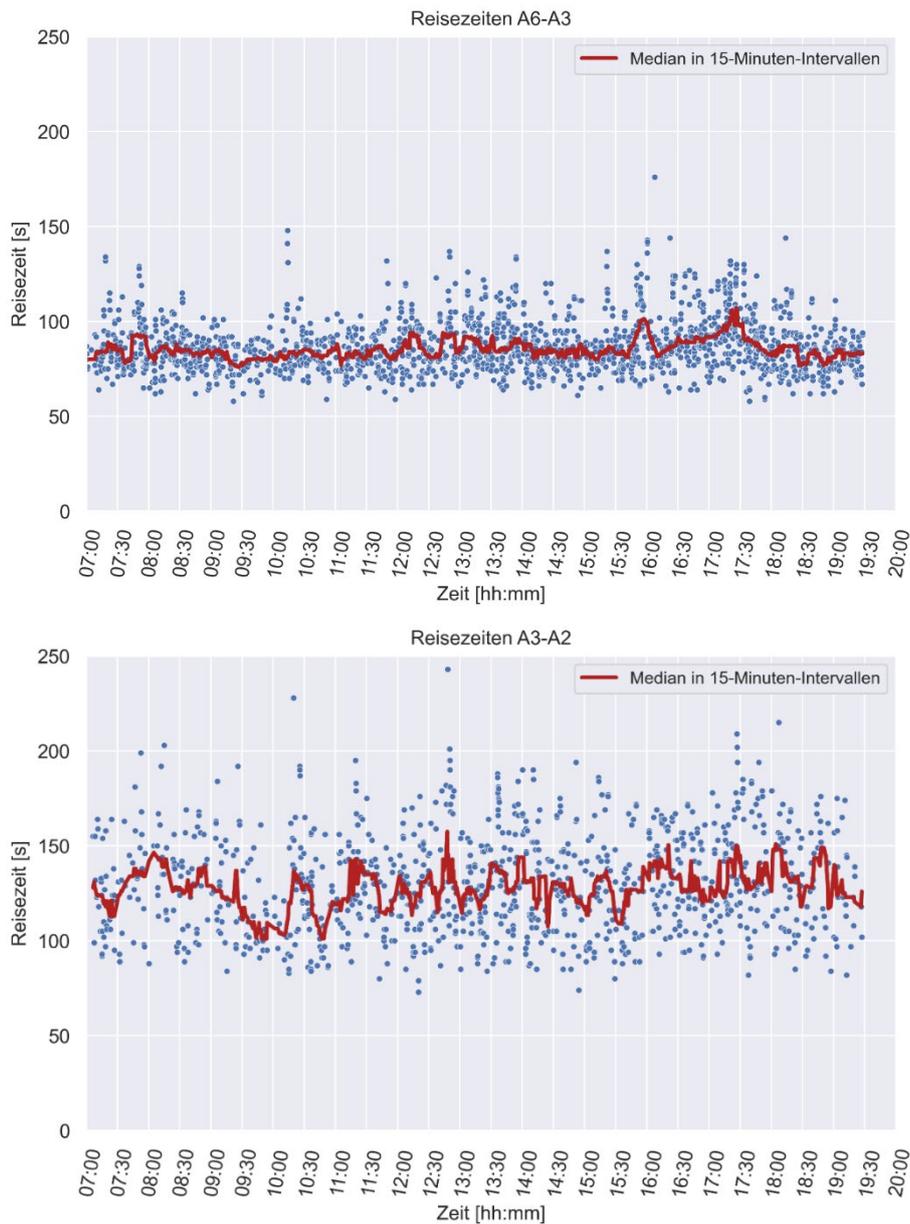


Bild 4-31: Fahrtzeiten Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße stadteinwärts (Karlsruhe)

Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße (Hannover)

Der Verlauf der Fahrtzeiten, die bei der Messung am 04.10.2021 in Hannover aufgezeichnet wurden, sind in Bild 4-32 abgebildet. Auffällig ist hierbei auf beiden Messabschnitten die starke Erhöhung der Fahrtzeiten nach 15:00 Uhr, die auf den bereits beschriebenen und am Erhebungstag beobachteten Stauzustand entlang der Untersuchungsstrecke zurückgeführt werden kann.

Für die Messung in der Gegenrichtung, die am 11.10.2021 durchgeführt wurde, sind die aufgezeichneten Fahrtzeiten in Bild 4-33 abgebildet. Anders als am ersten Erhebungstag war in dieser Fahrtrichtung kein Stau zu beobachten, was sich auch in den gemessenen Fahrtzeiten für die beiden Abschnitte widerspiegelt. Für den ersten Abschnitt ist die Verteilung der Fahrtzeiten über den Tag sehr homogen und es ist keine klare Spitze zu erkennen. Auf dem zweiten Abschnitt sind die Fahrtzeiten weniger homogen als auf dem vorherigen Abschnitt und es ist ein leichter Trend zum Anstieg im Laufe des Tages zu verzeichnen. Eine klare Spitze ist jedoch auch hier nicht zu erkennen.

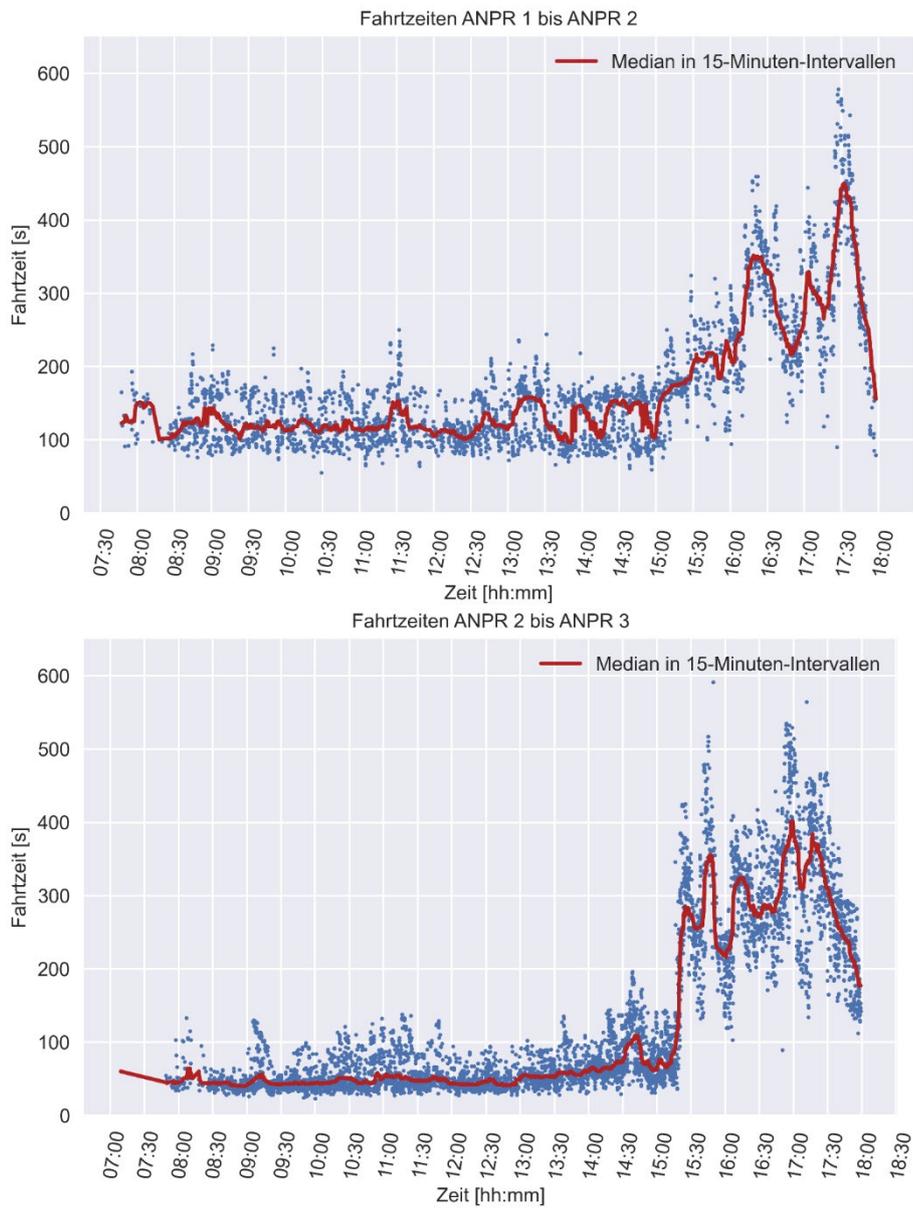


Bild 4-32: Fahrzeiten Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße am 04.10.2021 (Hannover)

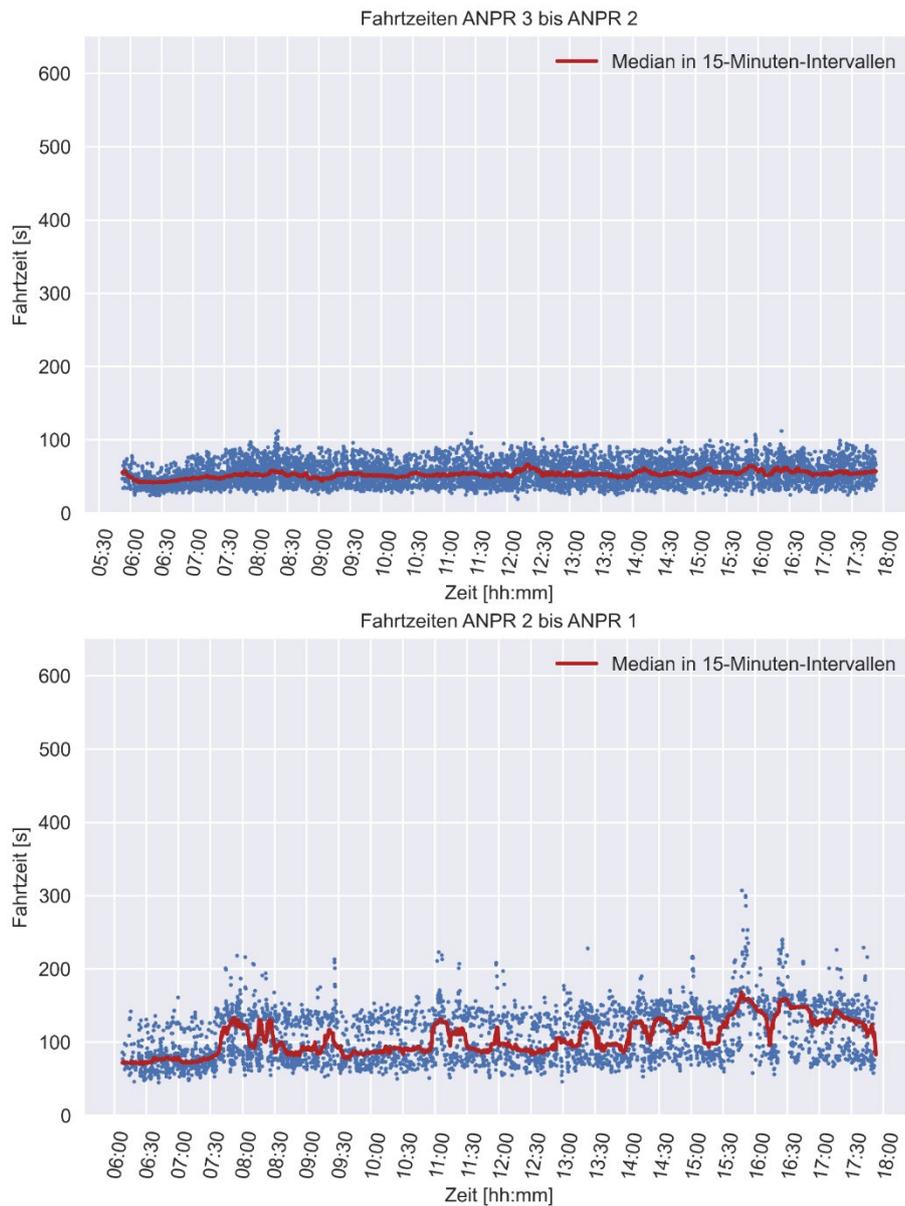


Bild 4-33: Fahrzeiten Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße am 11.10.2021 (Hannover)

Celler Straße - Hagenmarkt (Braunschweig)

Die Ergebnisse der ANPR-Erhebungen für die Untersuchungsstrecke in Braunschweig sind in Bild 4-34 für die Erhebung am 13.10.2021 und in Bild 4-35 für die Erhebung am 18.10.2021 dargestellt. In den Ergebnissen der Erhebung, die am 13.10. in Fahrtrichtung der Innenstadt durchgeführt wurde, ist auf beiden Messabschnitten eine Spitze der Zeitreihe zwischen 07:30 und 08:00 Uhr zu erkennen.

Die Diagramme für die Erhebung am 18.10.2021 in der Gegenrichtung (stadtauswärts) zeigt für den Abschnitt zwischen ANPR 3 und ANPR 2 eine Zeitreihe ohne deutlich erkennbare Tagesspitze. Lediglich zwischen 11:00 und 12:00 Uhr werden einige Fahrzeiten über dem allgemeinen Niveau aufgezeichnet, die aber nur einen geringen Einfluss auf den gleitenden Median haben. Im Diagramm des Abschnittes zwischen ANPR 2 und ANPR 3 ist deutlich eine Erhöhung der Fahrzeiten am Nachmittag und Abend zu erkennen, die um 17:15 Uhr ihr Maximum erreicht. Bis ca. 14:30 Uhr liegen die Fahrzeiten allgemein auf einem geringeren Niveau.

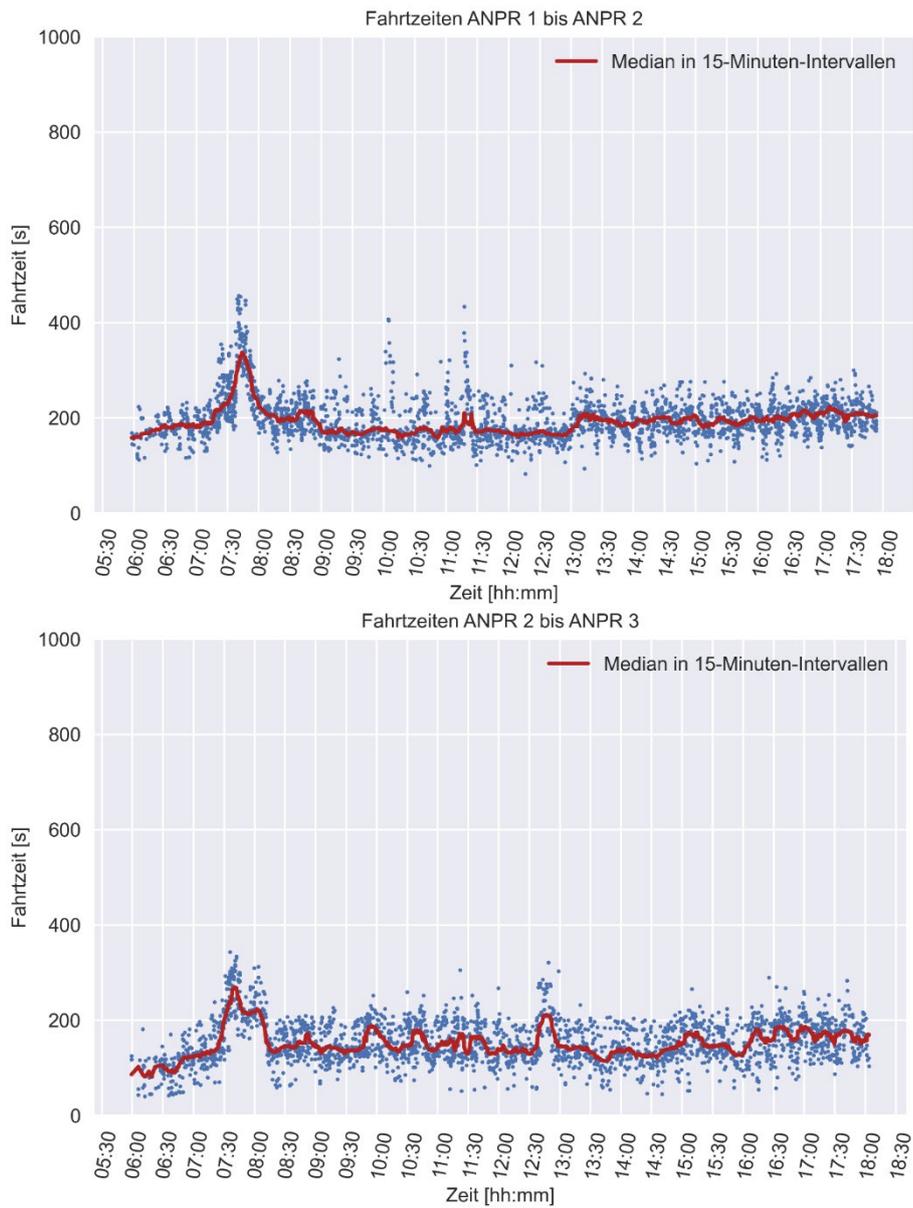


Bild 4-34: Fahrzeiten Celler Straße – Hagenmarkt am 13.10.2021 (Braunschweig)

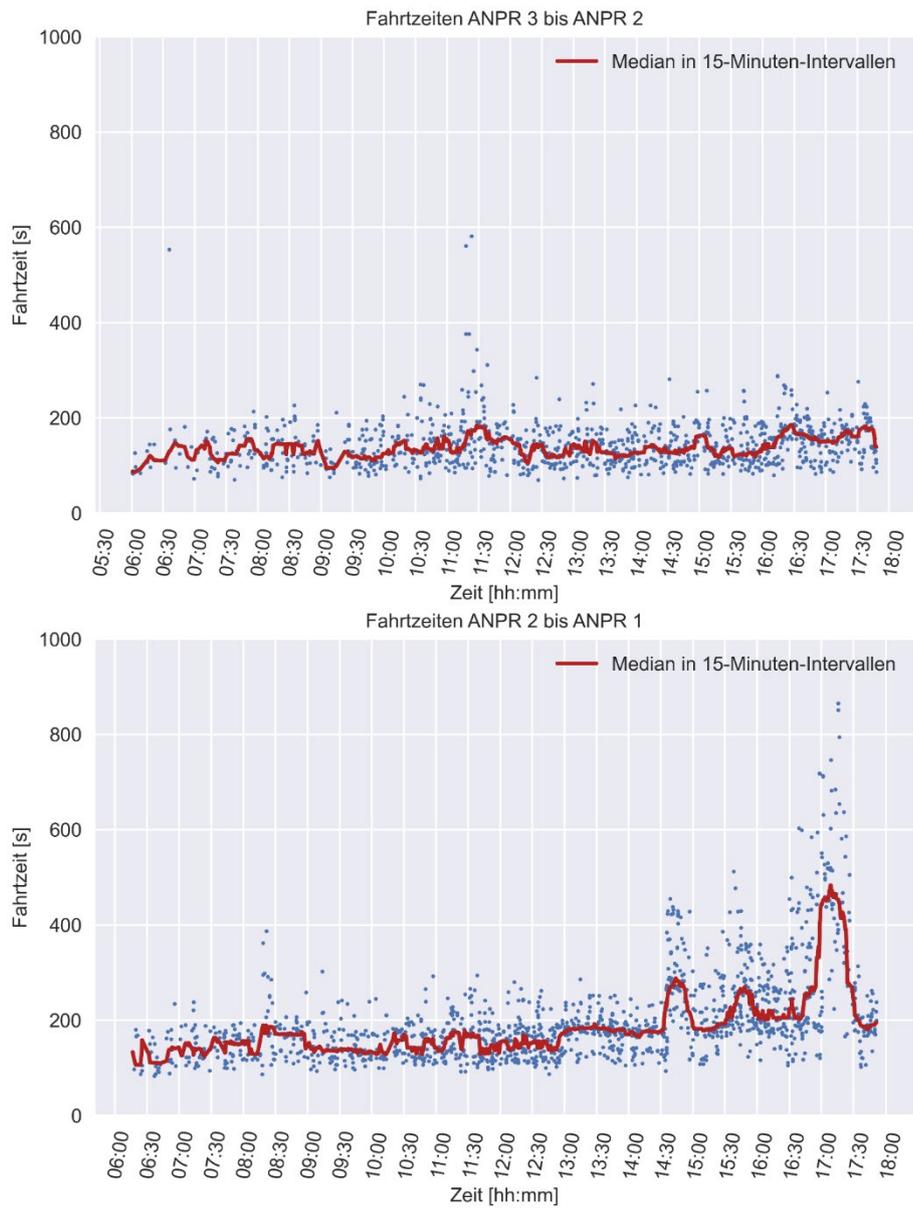


Bild 4-35: Fahrzeiten Celler Straße – Hagenmarkt am 18.10.2021 (Braunschweig)

4.3 Vergleich von FCD und Messung

Die aus den FCD ermittelten Fahrtzeiten auf den Streckenzügen in Hannover, Braunschweig und Karlsruhe wurden mit Hilfe der Daten der durchgeführten ANPR-Messungen (vgl. Kapitel 4.2) validiert. Hierzu wurden aus den FCD mit Hilfe der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Methodik die Fahrtzeiten zwischen den ANPR-Messquerschnitten bestimmt und mit den erhobenen Fahrtzeiten verglichen. Die Auswertung erfolgte jeweils abschnittsweise zwischen den Messquerschnitten der ANPR-Messungen. Für jeden Abschnitt des Streckenzuges wurde zusätzlich die Anzahl an aufgezeichneten Fahrtzeiten aus der ANPR-Messung mit der Anzahl von ermittelten Fahrtzeiten aus FCD verglichen, um den Durchdringungsgrad der FCD abschätzen zu können. Zunächst erfolge eine visuelle Überprüfung der Übereinstimmung zwischen den erhobenen und den aus FCD generierten Fahrtzeiten. Hierzu wurden die Fahrtzeiten aus FCD auf die gleiche Weise in Diagrammen dargestellt, wie die Fahrtzeiten aus den ANPR-Messungen. Beispielhaft sind in Bild 4-36 beide Diagramme für die Untersuchungsstrecke in Hannover zwischen Messquerschnitt 2 und 3 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass der Verlauf der Fahrtzeiten im täglichen Verlauf in beiden Diagrammen ähnlich ist. Lediglich die Spitzen am Nachmittag sind in den Fahrtzeiten aus FCD nicht so stark ausgeprägt, wie in der Grundgesamtheit.

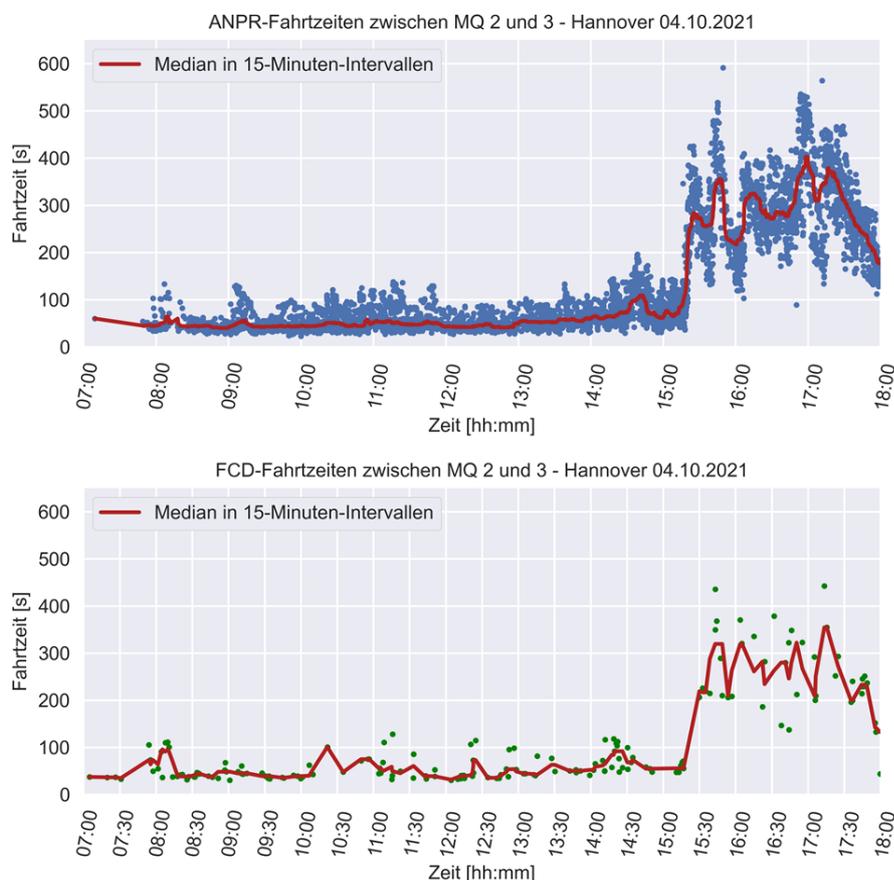


Bild 4-36: Vergleich von aufgezeichneten Fahrtzeiten mittels ANPR (oben) und FCD (unten)

Anschließend wurden die Fahrtzeiten aus der ANPR-Erhebung sowie aus den FCD nach Stunden gruppiert und aus den stündlichen Verteilungen jeweils ein Median erzeugt. Dieser stündliche Median dient in den folgenden Analysen als repräsentativer Wert für die Fahrtzeitverteilung innerhalb der jeweiligen Stunde. Der Median wurde anstatt des arithmetischen Mittels als Vergleichswert gewählt, da die Verteilung von Fahrtzeiten innerhalb einer Stunde sehr sensibel auf Ausreißer reagiert, die durch eventuelle Erhebungsfehler oder Fehler bei der Aufbereitung der FCD verursacht werden könnten. Besonders bei der in einigen Stunden geringen Anzahl an aufgezeichneten FCD-Trajektorien würde bereits ein einziger Ausreißer zu einer starken Verzerrung des arithmetischen Mittels führen. Der Median ist in dieser Hinsicht robuster und daher für die vorliegende Auswertung besser geeignet.

Eine Analyse der Korrelation der Median-Fahrtzeiten beider Verteilungen zeigt, dass allgemein eine gute Übereinstimmung zwischen den Fahrtzeiten der beiden Quellen für die identischen Zeitintervalle besteht. In Bild 4-37 ist hierzu ein Korrelationsdiagramm der Datenreihen zu sehen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 erzielt einen Wert von 0,70 und der Pearson-Korrelationskoeffizient liegt bei 0,83. Allerdings wird aus der Abbildung auch deutlich, dass einige Fahrtzeit-Paare weit von der Winkelhalbierenden entfernt und somit die Fahrtzeiten weiter auseinander liegen. Die einzelnen Datenpunkte im abgebildeten Diagramm sind nach dem Durchdringungsgrad der FCD innerhalb der jeweiligen Stunde eingefärbt. Dabei bildet eine dunklere Einfärbung des Datenpunktes einen höheren Durchdringungsgrad ab. Es wird ersichtlich, dass die Stunden, die eine größere Abweichung zwischen den Fahrtzeiten aufweisen auch durch einen geringen Durchdringungsgrad charakterisiert werden. Umgekehrt bedeutet aber ein geringer Durchdringungsgrad nicht automatisch eine schlechte Übereinstimmung, da auch einige Stunden mit geringer Durchdringung der FCD eine gute Übereinstimmung zeigen. Auf den grundlegenden Zusammenhang zwischen der Anzahl an Erfassungen und der Übereinstimmung der Fahrtzeiten wird im späteren Teil dieses Kapitels eingegangen.

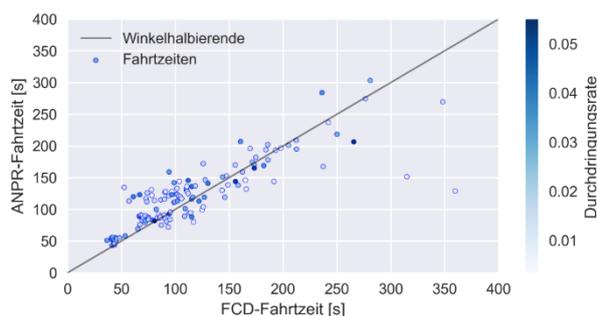


Bild 4-37: Korrelation zwischen FCD- und ANPR-Fahrtzeit

Um die Übereinstimmung der aus FCD gewonnenen mittleren Fahrtgeschwindigkeiten mit den erhobenen Fahrtgeschwindigkeiten auch quantifizieren zu können, wurden die stündlichen Wertepaare verglichen. Als maßgebliches Ähnlichkeitsmaß wurde hierbei das „Scalable Quality Value“ (SQV) nach FRIEDRICH et al. (2019) gewählt. Der SQV-Wert für ein Wertepaar ist dabei definiert durch folgende Formel:

$$SQV = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(v_{m,FCD} - v_{m,ANPR})^2}{f * v_{m,ANPR}}}}$$

Die Variable f steht dabei für einen Skalierungsfaktor, dessen Größenordnung nach FRIEDRICH et al. (2019) an den zu erwarteten Wert der untersuchten Variable gekoppelt sein sollte. Für die Auswertungen in Bezug auf die Fahrtgeschwindigkeit der Untersuchungsstrecken wurde ein Skalierungsfaktor von $f = 30$ gewählt. In Tabelle 4.1 ist beispielhaft die Auswertung für die Untersuchungsstrecke in Hannover in Fahrtrichtung stadtauswärts für den Abschnitt zwischen Messquerschnitt MQ3 und MQ2 dargestellt.

Braunschweig N-S Abschnitt 1	ANPR		FCD		Durchdringung [%]	SQV
	Anzahl Erfassungen [-]	Mittlere Fahrt- geschwindigkeit [km/h]	Anzahl Trajektorien [-]	Mittlere Fahrt- geschwindigkeit [km/h]		
07:00	422	18,6	5	17,6	1,2	0,957
08:00	338	23,5	8	25,5	2,4	0,929
09:00	236	26,2	6	27,8	2,5	0,947
10:00	186	25,9	3	19,4	1,6	0,810
11:00	284	25,0	6	23,1	2,1	0,935
12:00	210	27,7	11	27,2	5,2	0,981
13:00	223	24,3	4	25,0	1,8	0,977
14:00	267	24,3	6	19,5	2,2	0,850
15:00	258	24,6	3	22,7	1,2	0,935
16:00	333	23,7	8	23,5	2,4	0,995
17:00	295	22,8	7	23,6	2,4	0,972

Tabelle 4.1: Auswertung Fahrtgeschwindigkeiten und SQV für Untersuchungsstrecke Braunschweig

Die SQV-Auswertungen der betrachteten Abschnitte der Untersuchungsstrecken wurden anschließend zusammengeführt, um einen allgemeinen Blick auf die Übereinstimmung von FCD- und ANPR-Fahrtgeschwindigkeiten zu erlangen. Hierzu würde für jeden Abschnitt das arithmetische Mittel der SQV-Werte angesetzt. Ebenso wurden die Mittelwerte für Durchdringungsgrad und Anzahl an erfassten Trajektorien für den Abschnitt angesetzt. Hierbei ist zu beachten, dass auch Stunden ohne erfasste Trajektorien zur Mittelwertbildung herangezogen wurden. Daher kommt es bei einigen Abschnitten dazu, dass im Mittel weniger als eine Trajektorie pro Stunde als Kennwert angegeben ist. Das Ergebnis dieser Zusammenfassung der Daten ist in Tabelle 4.2 dargestellt.

Stadt	Strecke	Abschnitt	Trajektorien pro Stunde [-]	Durchdringung [%]	SQV [-]
Hannover	Vahrenwalder Str.	Nord-Süd Abschnitt 1	8,6	2,5	0,94
Hannover	Vahrenwalder Str.	Nord-Süd Abschnitt 2	21,3	3,0	0,91
Hannover	Vahrenwalder Str.	Süd-Nord Abschnitt 1	19,6	2,8	0,94
Hannover	Vahrenwalder Str.	Süd-Nord Abschnitt 2	10,8	3,4	0,88
Braunschweig	Celler Straße	Nord-Süd Abschnitt 1	6,1	2,3	0,94
Braunschweig	Celler Straße	Nord-Süd Abschnitt 2	3,9	1,8	0,89
Braunschweig	Celler Straße	Süd-Nord Abschnitt 1	2,0	2,2	0,77
Braunschweig	Celler Straße	Süd-Nord Abschnitt 2	3,6	2,7	0,85
Karlsruhe	Kriegsstraße	Ost-West	3,3	1,4	0,88
Karlsruhe	Kriegsstraße	West-Ost	5,2	1,5	0,89
Karlsruhe	Fiduciastraße	Nord-Süd Abschnitt 1	1,6	2,2	0,63
Karlsruhe	Fiduciastraße	Nord-Süd Abschnitt 2	2,6	2,9	0,76
Karlsruhe	Fiduciastraße	Süd-Nord Abschnitt 1	3,3	2,4	0,92
Karlsruhe	Fiduciastraße	Süd-Nord Abschnitt 2	1,3	1,8	0,83
Daten Gesamt			6,7	2,3	0,86

Tabelle 4.2: SQV-Auswertung für alle Abschnitte der Erhebung

Die Auswertung zeigt, dass der mittlere SQV-Wert über alle Abschnitte mit 0,86 in einem guten Bereich liegt. Im Mittel bilden die FCD-Fahrtgeschwindigkeiten also die Fahrtgeschwindigkeiten der Grundgesamtheit gut ab. Jedoch zeigen einige der Abschnitte weniger zufriedenstellende Werte. In einer weiteren Analyse wurde daher der Zusammenhang zwischen dem SQV-Wert eines Stundenintervalls und der Anzahl an erfassten Fahrtzeiten pro Stunde betrachtet. In der Auswertung wurde der Fokus auf die Anzahl an Trajektorien pro Stunde gelegt, da bei den kommerziell verfügbaren FCD der Durchdringungsgrad zumeist unbekannt ist. Die Anzahl an erfassten Trajektorien pro Stunde kann aus den Datensätzen in jeden Fall abgeleitet werden.

Für die abschließende Analyse wurden zunächst alle Stunden aus der Gesamtmenge der Geschwindigkeitswerte betrachtet und die Verteilung der SQVs und des Korrelationskoeffizienten analysiert. Dann wurden alle Stunden ausgeschlossen, in denen weniger als zwei Floating Cars erfasst wurden, und die gleiche Analyse mit dieser Teilmenge der Daten wiederholt. Dieser Prozess wird so lange fortgesetzt, bis die maximale Anzahl der erfassten Floating Cars erreicht ist. Bild 4-38 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse. Dabei wird jede Teilmenge durch die Mindestanzahl der erkannten Floating Cars definiert. Die Abbildung zeigt die Verteilung der SVQ-Werte in einem Boxplot und die Entwicklung des Korrelationskoeffizienten mit zunehmender Anzahl der minimalen Trajektorien pro Stunde.

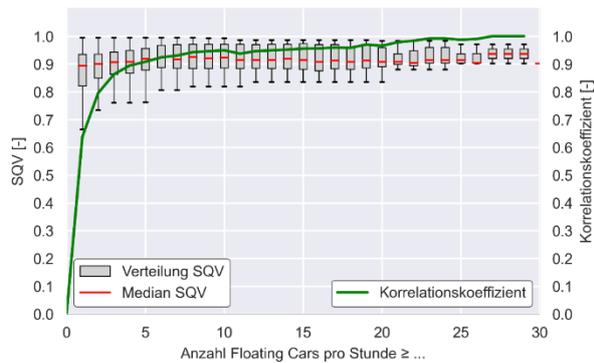


Bild 4-38: Zusammenhang zwischen SQV-Wert und Anzahl erfasster Floating Cars pro Stunde

Anhand der in Bild 4-38 dargestellten Analyse können mehrere Aussagen getroffen werden. Der Median des SQV ist über die verschiedenen Teilmengen nahezu konstant. Es ist jedoch zu erkennen, dass insbesondere in den Teilmengen, die Stunden mit einer geringen Anzahl von erfassten Floating Cars enthalten, Ausreißer bei der Geschwindigkeit dazu führen, dass der Korrelationskoeffizient nicht in einem zufriedenstellenden Bereich liegt. Bei der Betrachtung des Verlaufs des Korrelationskoeffizienten wird deutlich, dass sich die Übereinstimmung zwischen den Geschwindigkeitswerten aus der ANPR-Datenerfassung vor Ort und der FCD mit zunehmender Anzahl der pro Stunde erfassten Floating Cars verbessert. Der Korrelationskoeffizient verbessert sich deutlich für den Datensatz ohne die Stunden mit nur einer aufgezeichneten FCD-Trajektorie. Ebenfalls ist zu sehen, dass ab einem Minimum von fünf erfassten Floating Cars pro Stunde sowohl der Median des SQV als auch der Korrelationskoeffizient nicht unter einen Wert von 0,9 fallen. Dieser Wert repräsentiert sowohl eine sehr gute Übereinstimmung nach dem SQV (vgl. FRIEDRICH et al. 2015) als auch einen sehr guten Korrelationskoeffizienten (vgl. SCHÖBER et al., 2018).

Anschließend wurde eine erneute Analyse der Korrelation zwischen den mittleren Fahrtgeschwindigkeiten aus der ANPR-Erhebung und der FCD-Auswertung durchgeführt. In diesem Fall wurden allerdings nur die Stunden betrachtet, bei denen die mittlere FCD-Fahrtgeschwindigkeit auf Grundlage von mindestens fünf Trajektorien bestimmt wurde. Das Korrelationsdiagramm zu dieser Auswertung ist in Bild 4-39 zu sehen. Hierdurch steigt der Korrelationskoeffizient auf 0,91. Für die folgenden Untersuchungen im Rahmen des Projektes wurde daher eine Anzahl von ≥ 5 Trajektorien pro Stunde als ausreichend betrachtet, um einen repräsentativen Wert für die mittlere Fahrtgeschwindigkeit innerhalb dieser Stunde zu bestimmen.

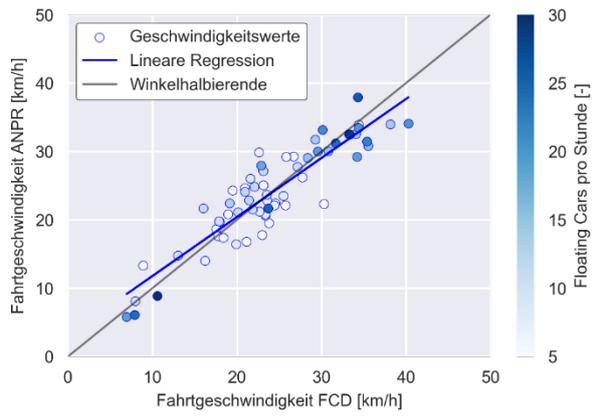


Bild 4-39: Korrelationsdiagramm der Fahrtzeiten aller Stunden mit mehr als fünf aufgezeichneten Trajektorien

5 Bewertung von Netzabschnitten

In diesem Kapitel wird zunächst das bestehende Bewertungsverfahren im HBS (FGSV 2015) dargestellt, analysiert und kommentiert und es werden mögliche und absehbare Erweiterungen genannt. Anschließend wird beschrieben, wie FCD HBS-konform verwendet werden können, um für bestehende Anlagen die mittlere Fahrtzeit zu ermitteln, die die Grundlage der Qualitätsbewertung ist. Für den Prognosefall kann nicht direkt mit Fahrtzeiten aus FCD gearbeitet werden, aber FC-Daten können eingesetzt werden, um mikroskopische Simulationsmodelle am Analysezustand zu kalibrieren, mit denen Fahrtzeiten im Prognosezustand berechnet werden können. Deshalb wird im letzten Teil am Beispiel eines der untersuchten Streckenzüge dargestellt, wie FCD zur Kalibrierung eingesetzt werden können.

5.1 Das bestehende Bewertungsverfahren im HBS-Kapitel S6

Der Verkehrsablauf auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen – insbesondere der des Kfz-Verkehrs („Motorisierter Individualverkehr“ - MIV), aber teilweise auch des straßengebundenen ÖPNV, in gewissem Maße auch des Radverkehrs – wird von der Gestaltung des Straßennetzes (Anzahl der Fahrstreifen je Richtung, Abstand und Ausbildung bzw. Gestaltung der Knotenpunkte), der Verkehrsregelung bzw. -steuerung an den Knotenpunkten (Einmündungen bzw. Kreuzungen, mit Lichtsignalanlage oder mit vorfahrregelnden Verkehrszeichen, Kreisverkehre) und der Verkehrsnachfrage beeinflusst. Zudem wird die übergeordnete verkehrliche Verbindungsfunktion der Hauptverkehrsstraßen durch lokale verkehrliche Erschließungsvorgänge wie Halte auf der Fahrbahn (z. B. durch Lieferverkehre), Ein- und Ausparken usw. überlagert. Deren Anzahl und Dauer bestimmen das Maß der Beeinflussung des fließenden Verkehrs. Die Intensität dieser Erschließungsvorgänge wird im Regelfall durch die Art der städtebaulichen Nutzung der angrenzenden Bebauung bestimmt.

Hauptverkehrsstraßen müssen diesen unterschiedlichen Anforderungen, die sich teilweise widersprechen und auf begrenztem Raum in Konkurrenz zueinanderstehen, gerecht werden. Es ist davon auszugehen, dass die Anforderungen mit der zu erwartenden zunehmenden Siedlungsentwicklung „nach Innen“ (Stichwort: Siedlungsverdichtung) sowohl in Bezug auf die Verkehrsnachfrage als auch bezüglich städtebaulicher Anforderungen weiter zunehmen werden, insbesondere in Städten innerhalb von Ballungsräumen.

Zwar wird die Kapazität innerörtlicher Hauptverkehrsstraßennetze primär durch die Knotenpunkte bestimmt, an denen gleichrangige oder zumindest annähernd gleich hoch belastete Straßen miteinander verknüpft werden, die Erschließungsfunktion der dazwischen liegenden Strecken haben aber einen Einfluss auf die Verkehrsqualität der betroffenen Abschnitte.

Im HBS (2015) erfolgt eine getrennte Bewertung des Kfz-Verkehrsablaufs auf Strecken und an Knotenpunkten als Einzelanlagen (Abschnitt 5.1.1 und Abschnitt 5.1.2).

Im Verfahren für Strecken (Abschnitt 5.1.1) erfolgt eine fahrtrichtungsbezogene Betrachtung von Strecken zwischen Hauptknotenpunkten, an denen der Verkehr auf der betrachteten Straße vorfahrrechtlich untergeordnet oder durch eine Lichtsignalanlage gesteuert ist. Nebenknotenpunkte, an denen der Verkehr auf der betrachteten Straße vorfahrrechtlich übergeordnet ist, sind Bestandteile von Strecken.

Für Knotenpunkte sind Verfahren für Einmündungen und Kreuzungen mit Lichtsignalanlage sowie für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage enthalten (Abschnitt 5.1.2). Letztgenannte gelten für Einmündungen und Kreuzungen mit vorfahrregelnden Verkehrszeichen und Kreisverkehre.

Die Bewertung der Verkehrsqualität von Einzelanlagen (Strecken und Knotenpunkte) dient dem Nachweis, dass die dort zu erwartende Verkehrsnachfrage mit der erwünschten Qualität abgewickelt werden kann. Dies erlaubt jedoch keine Beurteilung, inwieweit eine Kombination aus aufeinander folgenden Strecken und Knotenpunkten sicherstellen kann, dass die Zielvorstellungen der RIN (FGSV 2008) in Bezug auf eine der Netzfunktion angemessene Fahrtgeschwindigkeit verwirklicht werden. Deshalb ist im HBS auch ein Verfahren zur strecken- und knotenpunktübergreifenden Bewertung des Kfz-Verkehrsablaufs enthalten (Abschnitt 5.1.3). Dieses ermöglicht die Überprüfung, ob ein Netzabschnitt gemäß den RIN seine ihm zugedachte Netzfunktion erfüllt.

5.1.1 Bewertung des Verkehrsablaufs auf Strecken

Innerörtliche Hauptverkehrsstraßen sind in der Regel Bestandteile zwischengemeindlicher Verbindungen sowie überörtlicher Straßennetze. Sie übernehmen somit im Wesentlichen eine Verbindungsfunktion, gleichzeitig dienen sie aber auch der Erschließung der angrenzenden städtebaulichen Nutzungen und übernehmen folglich auch eine Erschließungsfunktion. Der Verkehrsablauf auf Strecken von Hauptverkehrsstraßen ist somit stark durch die Überlagerung von Nutzungsansprüchen aus der Verbindungsfunktion und der Erschließungsfunktion geprägt (Bild 5-1). Letztere hängt maßgeblich von der Art und Intensität der angrenzenden Nutzungen ab und ist durch Art, Anzahl sowie Dauer von Erschließungsvorgängen – wie Halte auf der Fahrbahn (z. B. durch Lieferfahrzeuge), ein-/ausparkende Fahrzeuge usw. – definiert.

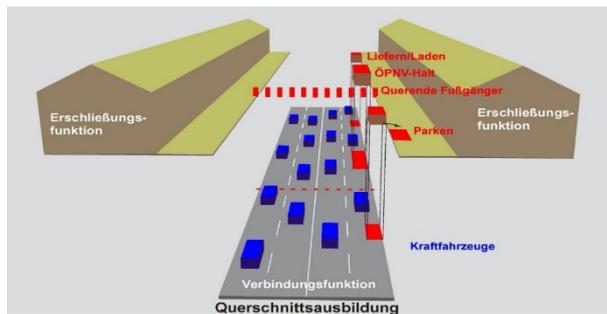


Bild 5-1: Überlagerung von Nutzungsansprüchen (BAIER et al., 2003, BAIER, 2006)

Das standardisierte Berechnungsverfahren des HBS in der aktuellen Fassung von 2015 wurde auf Grundlage der Untersuchungen von BAIER et al. (2003), BAIER (2006), BAIER et al. (2015) und BAIER & HARTKOPF (2015) entwickelt. Es ermöglicht sowohl die Verkehrsqualitätsbewertung von Strecken anbaufreier und angebaute Hauptverkehrsstraßen als auch die Ermittlung von Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten als Input für die Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten (siehe hierzu Abschnitt 5.1.3). Beide Verfahren gelten für anbaufreie Hauptverkehrsstraßen der Kategorien VS II und VS III sowie angebaute Hauptverkehrsstraßen der Kategorien HS III und HS IV, die gemäß den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt, FGSV 2006) geplant wurden. Sie sind sinngemäß auch für bestehende Hauptverkehrsstraßen anwendbar.

Als Maß der Verkehrsqualität wird die mittlere Kfz-Verkehrsdichte verwendet, anhand derer die Zuordnung zu einer Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV) erfolgt (Tabelle 5.1). Die Dichte wird mit Hilfe von nach Fahrbahnquerschnitten differenzierten q-V-Beziehungen, die den Zusammenhang zwischen Kfz-Verkehrsstärke und Geschwindigkeit beschreiben, fahrtrichtungsbezogen ermittelt.

QSV	fahrstreifenbezogene Verkehrsdichte k_{FS} [Kfz/km]	
	$V_{zul} = 70 \text{ km/h}$	$V_{zul} = 50 \text{ km/h}$
A	≤ 6	≤ 7
B	≤ 12	≤ 14
C	≤ 20	≤ 23
D	≤ 30	≤ 34
E	≤ 40	≤ 45
F	> 40	> 45

Tabelle 5.1: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs auf Strecken von Hauptverkehrsstraßen in Abhängigkeit der fahrtrichtungsbezogenen Kfz-Verkehrsdichte gemäß dem HBS (FGSV 2015)

Neben einer Differenzierung nach der Fahrstreifenanzahl werden auch die Einflüsse durch (aus den angrenzenden städtebaulichen Nutzungen resultierende) Erschließungsvorgänge berücksichtigt. Damit wird ermöglicht, anbaufreie sowie angebaute Hauptverkehrsstraßen mit unterschiedlichen Randnutzungen, wie

z. B. überwiegende Wohnnutzung und Mischnutzung (mittlere bis hohe Erschließungsintensität) oder überwiegend gewerbliche Nutzung (geringe Erschließungsintensität), betrachten zu können. Bild 5-2 zeigt beispielhaft die q-V-Beziehungen für Strecken mit einem normalbreiten Fahrstreifen in der betrachteten Richtung.

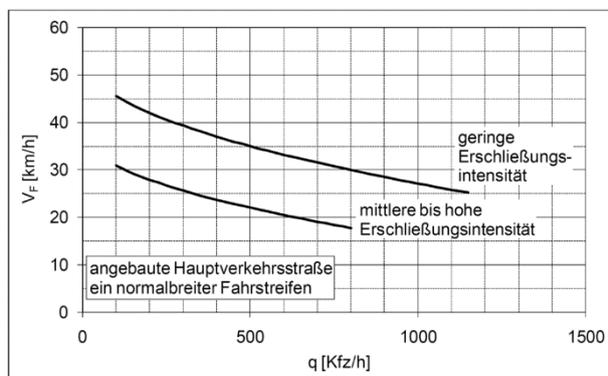


Bild 5-2: q-V-Beziehungen für Teilstrecken angebaute Hauptverkehrsstraßen mit einem normalbreiten Fahrstreifen im HBS (FGSV 2015)

Die q-V-Beziehungen gelten für Strecken mit bis zu zwei markierten Fahrstreifen in der betrachteten Richtung und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h (nur bei anbaufreien Hauptverkehrsstraßen) bzw. 50 km/h. Für Strecken mit mehr als zwei markierten Fahrstreifen in einer Richtung, Strecken, bei denen die Fahrstreifen regelmäßig in erheblichem Umfang vom Radverkehr mitgenutzt werden und Strecken, bei denen die Straßenbahn einen straßenbündigen Bahnkörper gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr nutzt, sowie Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h konnten aufgrund fehlender Erkenntnisse bei der Regelwerkserstellung keine q-V-Beziehungen abgeleitet werden und können daher nicht mit dem Standardverfahren gemäß HBS bewertet werden. In diesen Fällen wird im HBS auf die Möglichkeit der Nutzung von alternativen Verfahren, wie mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen verwiesen.

Die Verkehrsqualität des Kfz-Verkehrs ist von verschiedenen Einflussgrößen abhängig. Dazu gehören die Lage und Funktion der Hauptverkehrsstraße (anbaufrei oder angebaut, bei Letzteren die aus der Art der Nutzung der angrenzenden Bebauung resultierende Erschließungsintensität), die Anzahl und Art der durchgehenden Fahrstreifen je Richtung, die zulässige Höchstgeschwindigkeit (differenziert werden zulässige Höchstgeschwindigkeiten von 70 km/h und 50 km/h) sowie die Kfz-Verkehrsstärke.

Strecken werden deshalb dort in Teilstrecken unterteilt, wo sich eine dieser Einflussgrößen wesentlich ändert. Dabei bleiben Änderungen innerhalb der Knotenpunktbereiche (z. B. Querschnittsaufweitungen durch zusätzliche Abbiegestreifen) unbeachtet, da sie im Zusammenhang mit der Bewertung der Verkehrsqualität der Knotenpunkte (siehe Abschnitt 5.1.2) sowie bei der Bewertung von Netzabschnitten (siehe Abschnitt 5.1.3) berücksichtigt werden.

Darüber hinaus können bestimmte streckencharakteristische und verkehrliche Einflussgrößen die Anwendung des Berechnungsverfahrens gegebenenfalls einschränken. Dies sind z. B. Überlagerungen von Erschließungsvorgängen, bei denen maßgebliche Instationaritäten des Verkehrsablaufs nicht auszuschließen sind. Auch hierbei werden im HBS (2015) entsprechende Hinweise zur Verwendung alternativer Verfahren gegeben.

Zur Bewertung der Verkehrsqualität auf einer Strecke wird zunächst die fahrfstreifenbezogene Dichte gesondert für jede Teilstrecke ermittelt. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung für die Strecke; dabei sind eventuelle Bewertungen einzelner Teilstrecken mit QSV E oder QSV F gesondert zu berücksichtigen.

5.1.2 Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten

Die Verfahren für Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage gelten jeweils nur für einzelne Knotenpunkte (Einzelknotenpunkte), d. h. der Einfluss von oder Wechselwirkungen mit bzw. zwischen benachbarten Knotenpunkten (z. B. Koordinierung, Pulkbildung und Rückstauungen) wird bei der Bewertung der Verkehrsqualität nicht mitberücksichtigt. Bei Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage gilt das Verfahren zudem nur für Knotenpunkte mit festzeitgesteuerten Signalprogrammen, bei denen alle Knotenströme durch Lichtsignale gesteuert sind.

Für Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage dient als maßgebendes Qualitätskriterium für den Kfz-Verkehr die mittlere Wartezeit in jeder Zufahrt bzw. auf jedem Fahrstreifen (Signalgruppe), anhand derer die Bestimmung der zugehörigen Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs erfolgt. In Tabelle 5.2 sind die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage angegeben, in Tabelle 5.3 die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage.

QSV	Kfz-Verkehr	ÖPNV auf Sonderfahrstreifen ¹⁾	Fußgänger- und Radverkehr ²⁾
	mittlere Wartezeit t_w [s]	mittlere Wartezeit t_w [s]	maximale Wartezeit $t_{w,max}$ [s]
A	≤ 20	≤ 5	≤ 30
B	≤ 35	≤ 15	≤ 40
C	≤ 50	≤ 25	≤ 55
D	≤ 70	≤ 40	≤ 70
E	> 70	≤ 60	≤ 85
F	– ³⁾	> 60	> 85 ⁴⁾

¹⁾ Die Werte gelten auch für den ÖPNV, der durch eine verkehrsabhängige Steuerung priorisiert wird.

²⁾ Die Grenzwerte gelten für den Radverkehr auch, wenn er auf der Fahrbahn gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt wird.

³⁾ Die QSV F ist erreicht, wenn die nachgefragte Verkehrsstärke q über der Kapazität C liegt ($q > C$).

⁴⁾ Die Grenze zwischen den QSV E und F ergibt sich aus dem in den RILSA (2015) vorgegebenen Richtwert für die maximale Umlaufzeit von 90 s und der Mindestfreigabezeit von 5 s.

Tabelle 5.2: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für verschiedene Verkehrsarten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der mittleren bzw. maximalen Wartezeit gemäß dem HBS (FGSV 2015)

QSV	mittlere Wartezeit t_w [s]			
	Regelung durch Vorfahrtbeschilderung		Regelung „rechts vor links“	
	Fahrzeugverkehr auf der Fahrbahn	Radverkehr auf Radverkehrsanlagen und Fußgänger	Kraftfahrzeugverkehr	
			Kreuzung	Einmündung
A	≤ 10	≤ 5	} ≤ 10	} ≤ 10
B	≤ 20	≤ 10		
C	≤ 30	≤ 15	} ≤ 15	} ≤ 15
D	≤ 45	≤ 25		
E	> 45	≤ 35	≤ 25	≤ 20
F	– ¹⁾	> 35	> 25 ²⁾	> 20 ²⁾

¹⁾ Die QSV F ist erreicht, wenn die nachgefragte Verkehrsstärke q_i über der Kapazität C_i liegt ($q_i > C_i$).

²⁾ In diesem Bereich funktioniert die Regelungsart „rechts vor links“ nicht mehr.

Tabelle 5.3: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für verschiedene Verkehrsarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der mittleren Wartezeit gemäß dem HBS (FGSV 2015)

Das Verfahren für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage gilt, wie bereits erwähnt, nur für Einzelknotenpunkte mit festzeitgesteuerten Signalprogrammen. Um die Leistungsfähigkeit eines Knotenpunkts, der verkehrsabhängig gesteuert ist, zu beurteilen, ist es nach dem HBS sinnvoll, ein Festzeitprogramm zu entwerfen und dieses nach dem Verfahren für Einzelknotenpunkte mit festzeitgesteuerten Signalprogrammen zu bewerten. Die Bewertung der verkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerung ist durch alternative Verfahren möglich. Dabei soll der Nutzen der Verkehrsabhängigkeit gegenüber der Festzeitsteuerung aufgezeigt werden.

Bei sehr komplexen Verhältnissen oder weitgehenden verkehrsabhängigen Eingriffsmöglichkeiten kann es schwierig werden, einen „durchschnittlichen“ Umlauf zu definieren. Auch wenn mehrere Knotenpunkte dicht aufeinander folgen oder verschiedene Teilknotenpunkte sich gegenseitig beeinflussen, lassen sich Wartezeiten und Rückstaulängen nicht immer mit dem Berechnungsverfahren erfassen.

5.1.3 Verfahren zur übergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten im HBS

In den RIN sind, wie in Abschnitt 7.1 dargestellt, Zielvorgaben für die auf einem Netzabschnitt im Bemessungszeitraum angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit angegeben, die von der Straßenkategorie abhängen, sich also aus der funktionalen Gliederung des Straßennetzes ergeben.

Ein Verfahren zur Ermittlung der unter vorliegenden infrastrukturellen und verkehrlichen Randbedingungen erreichbaren mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit enthalten die RIN jedoch nicht. Deshalb wurde für das HBS ein Berechnungsverfahren entwickelt, mit dem die zu erwartende mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf einem Netzabschnitt als Folge von Strecken und Knotenpunkten ermittelt werden kann. Eingangsgrößen hierfür sind die mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken und die mittleren Wartezeiten an den Knotenpunkten. Diese Eingangsgrößen sind mit den jeweiligen Berechnungsverfahren des HBS für die Einzelanlagen – Strecken (vgl. Abschnitt 5.1.1) und Knotenpunkte (vgl. Abschnitt 5.1.2) – zu bestimmen. Zusätzlich zu den Wartezeiten am Knotenpunkt selbst treten zudem Zeitverluste durch Verzögerung vor dem Knotenpunkt und Beschleunigung hinter dem Knotenpunkt auf, die durch knotenpunktbezogene zusätzliche Zeitzuschläge berücksichtigt werden.

Die Entwicklung des Verfahrens für Netzabschnitte erfolgte durch BAIER & HARTKOPF (2015), aufbauend auf den von BAIER et al. (2015) entwickelten Ansätzen für Außerortsstraßen. Mit dem Verfahren für Netzabschnitte kann die mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit bestimmt werden, um zu überprüfen, ob die Zielvorgaben für die auf einem Netzabschnitt im Bemessungszeitraum angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit erfüllt werden. Darüber hinaus ermöglicht das Verfahren des HBS die Bewertung der Angebotsqualität eines Netzabschnitts, analog zur Bewertung der Verkehrsqualität von Einzelanlagen, anhand von sechs Qualitätsstufen, den sogenannten Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts (SAQ_N), von A bis F. Mit dem Verfahren können zudem neben gemäß den RIN (definierten Netzabschnitten auch ganze Streckenzüge als Folge von Strecken und Knotenpunkten betrachtet werden.

Für die Bewertung der Angebotsqualität wird der Fahrtgeschwindigkeitsindex verwendet, der sich aus der in der Bemessungsstunde zu erwartenden mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt bezogen auf eine von der Straßenkategorie abhängigen angestrebten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit ergibt. Dieses Qualitätskriterium wurde gewählt, da die Untersuchungen von BAIER et al. (2015) und BAIER & HARTKOPF (2015) gezeigt haben, dass eine Bewertung mit einer Qualitätsstufeneinteilung anhand absoluter Geschwindigkeiten, wie sie u. a. SCHNABEL et al. (1998), SCHNABEL et al. (2001) und BRILON & SCHNABEL (2003) für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen vorgeschlagen hatten, nicht zielführend ist.

In Tabelle 5.4 sind die die Grenzwerte der SAQ_N für Hauptverkehrsstraßen in Abhängigkeit des Fahrtgeschwindigkeitsindex angegeben. Diese wurden von BAIER & HARTKOPF (2015) u. a. auf Grundlage der Erkenntnisse aus den bisherigen fahrtgeschwindigkeitsbasierten Bewertungsansätzen für Hauptverkehrsstraßen von BRILON & SCHNABEL (2003) und LANK et al. (2009) abgeleitet.

SAQ	Fahrtgeschwindigkeitsindex I_{VF} [-]		
	Kategoriengruppe VS		Kategorien- gruppe HS
	im Vorfeld bebauter Gebiete	innerhalb bebauter Gebiete	
A	≥ 1,25	≥ 1,50	≥ 2,00
B	≥ 1,20	≥ 1,25	≥ 1,50
C	≥ 1,10	≥ 1,15	≥ 1,25
D	≥ 1,00	≥ 1,00	≥ 1,00
E	≥ 0,85	≥ 0,80	≥ 0,75
F	< 0,85	< 0,80	< 0,75

Tabelle 5.4: Stufen der Angebotsqualität für den Kfz-Verkehr auf Netzabschnitten von Hauptverkehrsstraßen in Abhängigkeit des Fahrtgeschwindigkeitsindex gemäß dem HBS (FGSV 2015)

Die Untersuchungen von BAIER et al. (2015) und BAIER & HARTKOPF (2015) haben zudem gezeigt, dass die angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit von der Länge des Netzabschnitts abhängig sein muss, um die Zeitverluste an den einen Netzabschnitt begrenzenden plangleichen Knotenpunkten angemessen zu berücksichtigen. Die im HBS angegebenen angestrebten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten lehnen sich deshalb zwar an die in den RIN angegebenen Zielgrößen an, sie weichen jedoch von den dort genannten Werten ab. Neben der Abhängigkeit von der Länge haben die Untersuchungen von BAIER &

HARTKOPF (2015) auch gezeigt, dass die Werte der RIN zu hoch sind. Infolge dieser Erkenntnisse wurden die in den RIN angegebenen Zielgrößen 2015 durch ein von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) veröffentlichtes Korrekturblatt angepasst.

Voraussetzung für die Anwendung des Berechnungsverfahrens ist, dass keine Einzelanlage im Zuge des Netzabschnitts die QSV F aufweist und somit überlastet ist. In diesen Fällen kann die mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt nur mit Hilfe alternativer Verfahren ermittelt werden. Dies gilt auch, wenn aufgrund der gegebenen Randbedingungen die Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken oder die Wartezeiten an den Knotenpunkten nicht rechnerisch bestimmt werden können. Für die Anwendung anderer geeigneter Verfahren wie der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation sind im HBS entsprechende Hinweise enthalten.

Bei der Bewertung der Angebotsqualität eines Netzabschnitts ist im Grundsatz für den gesamten Netzabschnitt eine einheitliche Bemessungsstunde zu Grunde zu legen. Dazu sollen die für die Bemessung möglicherweise maßgebenden Elemente, also Strecken und Knotenpunkte, und deren Bemessungsstunden identifiziert werden. Gegebenenfalls sind dabei mehrere Belastungsfälle zu betrachten, bei denen jeweils eine der für die verschiedenen Elemente (Strecken und Knotenpunkte) verwendeten Bemessungsstunden der Bewertung der Angebotsqualität des gesamten Netzabschnitts zu Grunde gelegt wird. In diesem Fall ist die schlechteste Bewertung maßgebend.

Die Grenzen des Verfahrens für Strecken resultieren zum einen aus den bestehenden Einschränkungen hinsichtlich der Anwendung für Strecken, bei denen die Fahrstreifen regelmäßig und in erheblichem Umfang gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr vom Radverkehr genutzt werden (unabhängig vom Vorhandensein eines Schutzstreifens); hier kann das Verfahren nicht angewendet werden. Zum anderen gilt es ebenfalls nicht für Strecken, bei denen der Kfz-Verkehr einen straßenbündigen Bahnkörper mitbenutzt. In diesen Fällen – darauf verweist auch das HBS – können die Verkehrsqualität und die Fahrtgeschwindigkeit ausschließlich mit Hilfe alternativer Verfahren ermittelt werden.

Somit ist die Anwendung auf wenige Fahrbahnquerschnitte – ein normalbreiter Fahrstreifen, ein überbreiter (von Pkw zweistreifig befahrbarer) Fahrstreifen und zwei markierte Fahrstreifen in der betrachteten Richtung – beschränkt, die ausschließlich vom Kfz-Verkehr genutzt werden (einzige Ausnahme: Strecken mit geringfügigem Radverkehr auf der Fahrbahn). Auch können nicht alle Kombinationen und damit Einflüsse aus sich überlagernden Erschließungsvorgängen hinreichend genau abgebildet werden, weshalb die q-V-Beziehungen zur Bestimmung der mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf einer Strecke vereinfachend nach verschiedenen Erschließungsintensitäten (gering, mittel, hoch) differenziert sind, die durch die Art der Nutzung der angrenzenden Bebauung (überwiegend gewerbliche Nutzung, überwiegend Wohnnutzung, überwiegend Mischnutzung) bestimmt werden, was eine weitere Vereinfachung darstellt.

Zudem gilt das Verfahren für Strecken nur für anbaufreie Hauptverkehrsstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h oder 50 km/h sowie für angebaute Hauptverkehrsstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Somit können angebaute Hauptverkehrsstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h, die vor dem Hintergrund von kommunalen Lärmaktions- und Luftreinhalteplanungen immer häufiger angeordnet wird, nicht bewertet werden. Auch eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h an anbaufreien Hauptverkehrsstraßen kann nur näherungsweise (durch Interpolation zwischen den q-V-Beziehungen für 70 km/h und 50 km/h) bewertet werden.

Die wesentliche Einschränkung der Anwendbarkeit des Verfahrens für Strecken liegt aber darin, dass die Anwendung der q-V-Beziehungen zur Bestimmung der mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf einer Strecke stationäre Verhältnisse voraussetzt. Diese sind bei innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen aufgrund der regelmäßigen Phasenwechsel aus der Signalfolge an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten oftmals nicht gegeben. Trotz dieser durch Lichtsignalanlagen entstehenden Instationaritäten auf den angrenzenden Strecken werden in dem Verfahren und damit bei der Anwendung der q-V-Beziehungen vereinfachend stationäre Verhältnisse unterstellt. Diese Vereinfachung ist im Hinblick auf die Bewertung der Verkehrsqualität der Strecken nicht so kritisch, da hier – wie bei allen anderen Verfahren des HBS auch – nur die Einzelanlage betrachtet wird, eventuelle Wechselwirkungen mit benachbarten Anlagen also „ausgeblendet“ werden. Im Hinblick auf die Ermittlung der mittleren Fahrtgeschwindigkeit über einen ganzen Netzabschnitt oder Streckenzug als Folge von Strecken und Knotenpunkten (mit gegebenenfalls unterschiedlichen Verkehrsregelungen/-steuerungen) ist diese Vereinfachung jedoch kritisch, insbesondere für hochbelastete

Hauptverkehrsstraßen, da die Geschwindigkeit auf den Strecken aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Einzelanlagen und den Instationaritäten nicht hinreichend genau bestimmt werden kann. Infolgedessen sind auch der Anwendung des Verfahrens für Netzabschnitte entsprechende Grenzen gesetzt.

5.1.4 Aktuelle Weiterentwicklungen der Verfahren für das HBS

Zu Strecken von Hauptverkehrsstraßen gibt es derzeit keine neueren Erkenntnisse, die eine Weiterentwicklung des Verfahrens erlauben. Es liegen lediglich einige wenige Erkenntnisse aus vereinzelt Anwendungen vor. Zu nennen sind hier u. a. die Untersuchungen von BSV (2016) und BSV (2019a), in denen eine Verkehrsqualitätsbewertung für Strecken mit dem Berechnungsverfahren des HBS durchgeführt wurde. In der Diskussion steht aber der notwendige Bedarf, Erkenntnisse zu den Auswirkungen von streckenbezogenen Beschränkungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 30 m/h umfassend zu untersuchen.

Zu Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage liegen einige neuere Erkenntnisse vor. Zu nennen sind hier vor allem die Untersuchungen von BUSCH et al. (2019) und VORTISCH et al. (2020).

In ihren Untersuchungen zum „Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen“ haben BUSCH et al. (2019) auf Basis von empirischen und Simulationsuntersuchungen verschiedene Ergänzungen für das bestehende Berechnungsverfahren abgeleitet. Für den Radverkehr auf eigenen Radverkehrsanlagen wurden Zeitbedarfswerte (zur Ermittlung von Kapazitäten) in Abhängigkeit der Breite der Radverkehrsanlage ermittelt. Für den Kfz-Verkehr wurde der Einfluss des Radverkehrs für folgende Konstellationen formal beschrieben: Behinderung von geradeausfahrenden Kfz durch Radverkehr auf aufgeweiteten Radaufstellstreifen, Belegungszeit der Furt durch Radfahrer bei bedingt verträglich rechtsabbiegenden Kfz und das Durchsetzen von entgegengerichteten Radfahrern durch bedingt verträglich linksabbiegende Kfz.

Die Untersuchungen von VORTISCH et al. (2020) zu Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage haben gezeigt, die gemessene bzw. simulierten Wartezeiten mit den nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten meist in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Bei einzelnen Komponenten der Berechnungsverfahren wurden die nachfolgenden Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert: Der Einfluss der Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalsteuerung sollte mit einem angepassten Instationaritätsfaktor abgebildet werden, um auch unsymmetrische Belastungsverläufe in der Bemessungsstunde korrekt zu berücksichtigen. Der Einfluss der Längsneigung auf die Sättigungsverkehrsstärke und der Einfluss bedingt verträglicher Fuß- und Radfahrerströme auf die Kapazitäten der abbiegenden Fahrzeugströme sollten vertieft untersucht werden, da bei den untersuchten Knotenpunkten Unstimmigkeiten festgestellt wurden.

Zudem haben die Untersuchungen von VORTISCH et al. (2020) gezeigt, dass die Wartezeitberechnung bei Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage geringfügig modifiziert werden sollte, um den Einfluss der Kapazität besser abzubilden.

Des Weiteren empfehlen VORTISCH et al. (2020), dass zur Verbesserung der Simulationspraxis entsprechende Hinweise zur HBS-konformen mikroskopischen Simulation von Knotenpunkten erarbeitet werden sollten. Hierzu wurde zwischenzeitlich in der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen ein Arbeitskreis initiiert, der „Empfehlungen zur mikroskopischen Verkehrssimulation“ erarbeiten soll.

Zu Netzabschnitten von Hauptverkehrsstraßen gibt es derzeit wie zu Strecken keine neueren Erkenntnisse, die eine Weiterentwicklung des Verfahrens erlauben. Auch hierzu liegen nur einige wenige Erkenntnisse aus vereinzelt Anwendungen vor, in der die Bewertung der Angebotsqualität eines Streckenzugs aufgrund der Einsatzgrenzen des Berechnungsverfahrens mittels Mikrosimulation als alternatives Verfahren erfolgt ist (z. B. BSV, 2019b).

Eine Vielzahl weiterer Untersuchungen zum Verkehrsablauf in innerörtlichen Straßennetzen haben die Verkehrssteuerung – konkret: die Lichtsignalsteuerung – im Fokus ihrer Betrachtungen, wie z. B. die Untersuchungen von BRILON et al. (2007), BOLTZE et al. (2011) und BRILON et al. (2013). Hierbei erfolgte jedoch keine Bewertung der Angebotsqualität im Sinne der RIN.

Das Verfahren im HBS zur Bewertung der geschwindigkeitsbezogenen Angebotsqualität für den ÖPNV wird derzeit, u. a. auch aufbauend den Erkenntnissen aus der exemplarischen Anwendung von SCHNEI-

DER et al. (2018), durch die zuständige Bearbeitergruppe im Arbeitsausschuss „Qualität des Verkehrsablaufs“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen überarbeitet. Ziel dieser Überarbeitung ist es, neben der netzabschnitts- bzw. verbindungsbezogenen Bewertung auch eine gesonderte Betrachtung und Bewertung einzelner Anlagen innerhalb eines Netzabschnitts – vor allem von Knotenpunkten – zu ermöglichen.

Zur Bewertung des Radverkehrs werden von GEISTEFELDT et al. (2021) derzeit „Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität“ erarbeitet. Im Ergebnis soll ein neues Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität des Radverkehrs auf Strecken bereitgestellt werden. Dieses Berechnungsverfahren basiert auf differenzierten q-V-Beziehungen für den Radverkehr auf eigenständigen Anlagen (Radwege, Radfahrstreifen), die im Wesentlichen nach der Anlagenbreite differenziert sind. Hierauf aufbauend wird zudem ein Berechnungsverfahren zur Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten des Radverkehrs erarbeitet.

5.2 Ermittlung der bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit durch FCD

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Ansätze untersucht, mit denen aus einem FCD-Datensatz eine bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit für einen Netzabschnitt oder Streckenzug mit mehreren Netzabschnitten gewonnen werden kann. Beide Ansätze orientieren sich dabei an Konzepten, die im HBS verankert sind. Im Folgenden werden die Ansätze vorgestellt und ihre Anwendbarkeit im Kontext des HBS Kapitels S6 diskutiert.

Beide Ansätze gehen davon aus, dass für den betreffenden Netzabschnitt FC-Rohdaten für ein komplettes Analysejahr vorliegen. Mit Hilfe der in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Methodik wird für jede aufgezeichnete Trajektorie innerhalb dieses Datensatzes eine Fahrtzeit für das betreffende Floating Car berechnet. Für die zeitliche Einordnung der Trajektorien wird der Zeitpunkt genutzt, an dem das Fahrzeug den gesetzten Referenzpunkt am Beginn des Netzabschnittes durchfährt.

5.2.1 Bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit aus der n-ten Stunde

Ein naheliegender Ansatz ist die Bestimmung der bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit als die mittlere Fahrtgeschwindigkeit der n-ten Stunde der Dauerlinie aller stündlichen Geschwindigkeiten. Dieser Ansatz orientiert sich direkt an der im HBS Kapitel S2 definierten Methodik zur Bestimmung der Bemessungsverkehrsstärke aus einer Dauerlinie der Verkehrsstärken. Dort wird die Bemessungsverkehrsstärke als die Verkehrsstärke der n-ten Stunde des Jahres definiert. Hierzu werden alle auftretenden Verkehrsstärken aus einer Dauerzählung absteigend in einer Dauerlinie sortiert und anschließend die Verkehrsstärke der n-ten Stunde als Bemessungsverkehrsstärke angesetzt. In der Regel handelt es sich hierbei um die 50. Stunde der Dauerlinie der Verkehrsbelastung. Zur Bestimmung der bemessungsrelevanten Fahrtzeit im Kapitel S6 des HBS wird dann auf Grundlage dieser Bemessungsverkehrsstärke die zu erwartende mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt berechnet.

Um diesen Ansatz für die Bestimmung der bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit adaptieren zu können, muss aus den vorliegenden FCD die Dauerlinie der stündlichen Fahrtgeschwindigkeiten gebildet werden. Hierzu werden zunächst die einzelnen aufgezeichneten Fahrtzeiten in die jeweilige Stunde des Jahres gruppiert, in der das Fahrzeug den Querschnitt am Beginn des Netzabschnittes durchfährt. Damit ergibt sich für jede der 8760 Stunden des Jahres (in Schaltjahren 8784 Stunden) eine Verteilung der einzelnen aufgezeichneten FCD-Fahrtzeiten. Mit Hilfe dieser Fahrtzeiten wird dann die mittlere Fahrtgeschwindigkeit für diese Stunde des Jahres berechnet.

Da die Auswertung in Kapitel 4 gezeigt hat, dass der Median der Fahrtzeit-Verteilung einer Stunde erst ab einer Anzahl von ≥ 5 Trajektorien repräsentativ ist, werden anschließend alle Fahrtgeschwindigkeiten in Stunden mit weniger als fünf aufgezeichneten Trajektorien ersetzt. Hierbei sind auch Stunden eingeschlossen, in denen keine Fahrtgeschwindigkeit aus den FCD gewonnen werden können, da keine Floating Cars erfasst wurden. Für die notwendige Messwertauschen werden Fahrtgeschwindigkeiten aus Stunden verwendet, die der zu ersetzenden Stunde kalendarisch (Wochentag, Ferienlage etc.) möglichst ähnlich sind. In Bild 5-3 ist das Histogramm der Fahrtzeiten für die Untersuchungsstrecke in Hannover aufgeführt. In der Abbildung ist ebenfalls die 50. Stunde der Fahrtgeschwindigkeiten markiert, die als 99,4%-Perzentil der Verteilung bestimmt wurde.

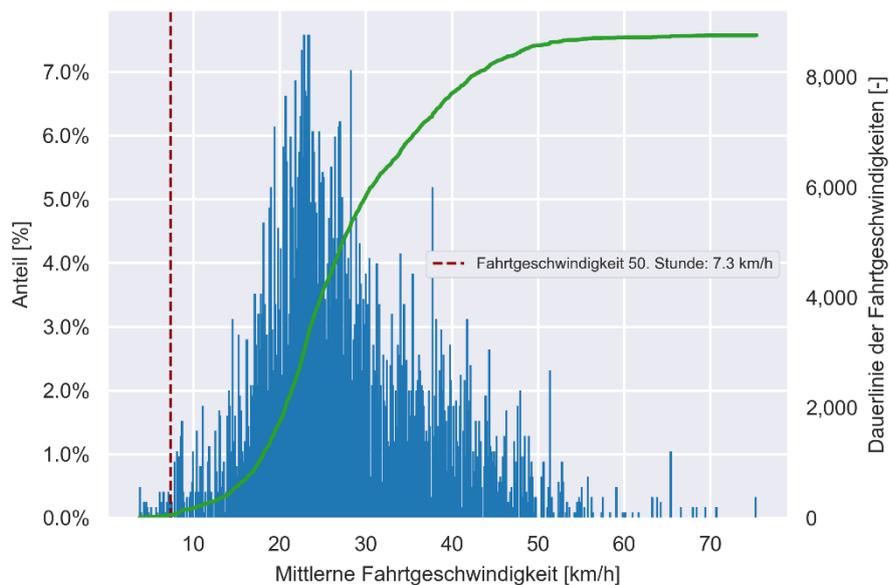


Bild 5-3: Histogramm (linke Achse) und Dauerlinie (rechte Achse) der Fahrtgeschwindigkeiten auf der Untersuchungsstrecke Hannover

Bei Betrachtung der berechneten 50. Stunde der Fahrtgeschwindigkeiten wird allerdings ein Problem deutlich, das sich bei der Verwendung der *Dauerlinie der Fahrtgeschwindigkeiten* im Vergleich zur Verwendung der *Dauerlinie der Verkehrsbelastungen* ergibt. Die bestimmte 50. Stunde der Fahrtgeschwindigkeiten liegt in einem Bereich, der nicht als Grundlage für die Beurteilung der Verkehrsqualität geeignet ist, da der Absolutwert der Geschwindigkeit sehr weit unter den Werten fast aller anderen Stunden liegt. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um eine Stunde handelt, in der eine Überlastung des Netzabschnittes oder eine besondere (nicht aus der Nachfrage resultierende) Störung vorlag. Aufgrund der Zusammenhänge im Fundamentaldiagramm zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit ergeben sich bei gestautem Verkehr geringe Geschwindigkeiten, aber ebenso geringe gemessene Verkehrsstärken. Das heißt, bei Überlastung der Verkehrsanlage nehmen die an einer Dauerzählstelle gemessenen Verkehrsstärken ab. Das führt dazu, dass diese Stunden nicht bei der Bestimmung der Bemessungsverkehrsstärke nach der n-ten Stunde berücksichtigt werden. Bei wiederkehrenden Überlastungssituationen auf dem Netzabschnitt werden also die 50. Stunde der FCD-Fahrtgeschwindigkeitsverteilung und die aus der Bemessungsverkehrsstärke berechnete mittlere zu erwartende Fahrtgeschwindigkeit voneinander abweichen, da sie verschiedene Verkehrssituationen abbilden. Die 50. Stunde der FCD-Fahrtgeschwindigkeitsverteilung müsste dabei regelmäßig unter der Fahrtgeschwindigkeit liegen, die aus der Bemessungsverkehrsstärke berechnet wird. Bild 5-3 sowie die Analysen für die anderen Untersuchungsstrecken bestätigen diese Vermutung.

Die Verwendung der 50. Stunde der Fahrtgeschwindigkeitsverteilung ist demnach aufgrund der fehlenden konzeptionellen Konsistenz mit dem HBS-Verfahren und der dadurch bedingten potenziellen Überdimensionierung der Straßenverkehrsanlagen nicht zu empfehlen.

5.2.2 Bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit aus durchschnittlichen Spitzenstunden innerhalb der Zählzeiten

Der zweite entwickelte Ansatz orientiert sich an der im HBS-Kapitel S 2.3 vorgeschlagenen Methodik zur Bestimmung einer Bemessungsverkehrsstärke auf Grundlage einer Kurzzeitzählung. Hierzu sind im HBS Zählzeiten festgelegt, in denen eine Kurzzeitzählung stattfinden sollte. Zählungen sollten demnach zwischen Ende März und Ende Oktober an den Wochentagen Dienstag, Mittwoch oder Donnerstag außerhalb der Schulferien durchgeführt werden. An diesen Tagen sollen mindestens vormittags (06:00 bis 10:00 Uhr) und nachmittags (15:00 bis 19:00 Uhr) jeweils vier Stunden kontinuierlich gezählt werden. Im Anschluss werden die vier höchstbelasteten 15-Minuten-Intervalle als Spitzenstunde gewählt und die dort gezählte Verkehrsstärke als Bemessungsverkehrsstärke angesetzt.

Auch dieser Ansatz lässt sich zur Bestimmung der bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit auf den FCD-Datensatz übertragen. Hierzu werden zunächst aus dem Jahres-Datensatz alle Trajektorien identifiziert, die innerhalb der im HBS definierten möglichen Zählzeiten liegen. Bei diesen Trajektorien wird anschließend die Information entfernt, an welchem Tag diese aufgezeichnet wurden. Dadurch werden alle Fahrtzeiten, die an den zulässigen Zähltagen aufgezeichnet wurden, zu zwei Datensätzen für die Vormittags- und Nachmittagszählzeiten aggregiert. Grundlage hierfür ist, dass die Verkehrszustände an den Zähltagen aufgrund der ähnlichen Nachfrage auch vergleichbar sind. Die Trajektorien in beiden Datensätzen werden anschließend in 15-Minuten-Intervalle gruppiert und für jedes Intervall die mittlere Fahrtgeschwindigkeit berechnet. Ein Beispiel für die resultierenden Datensätze ist in Tabelle 5.5 zu sehen.

Vormittag			Nachmittag		
Zeit	Fahrtgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl Trajektorien	Zeit	Fahrtgeschwindigkeit [km/h]	Anzahl Trajektorien
06:00	52,6	31	15:00	40,5	72
06:15	48,5	34	15:15	42,4	60
06:30	45,5	51	15:30	42,0	84
06:45	48,0	31	15:45	43,0	76
07:00	42,5	72	16:00	41,7	90
07:15	42,4	68	16:15	42,0	106
07:30	38,3	65	16:30	42,3	72
07:45	36,5	58	16:45	40,6	70
08:00	37,5	60	17:00	43,6	72
08:15	40,1	43	17:15	40,4	87
08:30	40,2	48	17:30	42,2	63
08:45	40,4	48	17:45	44,2	72
09:00	42,7	54	18:00	43,6	58
09:15	44,6	50	18:15	42,6	65
09:30	46,1	71	18:30	45,7	56
09:45	43,3	59	18:45	41,6	36

= Gewählte Spitzenstunde

Tabelle 5.5: Aggregierte FCD-Fahrtgeschwindigkeiten in möglichen Zählzeiten in 15-Minuten-Intervallen

In beiden Datensätzen werden anschließend die vier aufeinanderfolgenden 15-Minuten-Intervalle bestimmt, welche die niedrigste Summe der mittleren Fahrtgeschwindigkeiten aufweisen. Diese vier 15-Minuten-Intervalle ergeben für den Vormittag sowie für den Nachmittag jeweils eine durchschnittliche Spitzenstunde an den Zähltagen. Aus allen Trajektorien, die innerhalb der jeweiligen Spitzenstunden liegen, wird anschließend eine bemessungsrelevante mittlere Fahrtgeschwindigkeit für den Vormittag und den Nachmittag bestimmt.

Ein Vorteil dieser Methodik ist es, dass die aggregierten Trajektorien innerhalb der durchschnittlichen Spitzenstunden zur Bestimmung der bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit genutzt werden kann. Dadurch treten die im Kapitel 5.2.1 beschriebenen Probleme in Bezug auf Zeiträume mit Überlastungen nicht auf. Ebenso ist die Anforderung an die zeitliche Abdeckung der notwendigen FCD geringer. Da nur die Fahrtgeschwindigkeiten innerhalb der Zählperiode zwischen Ende März und Ende Oktober in der Berechnung relevant sind, reicht es auch aus lediglich diesen Datensatz zu beschaffen.

5.3 Vergleich von FCD und Berechnung nach HBS-Kapitel S6

Die beiden Ansätze zur Bestimmung einer bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit aus einem FC-Datensatz werden im folgenden Kapitel mit den Ergebnissen des Verfahrens nach HBS-Kapitel S6 verglichen. Hierzu wurden die Untersuchungsstrecken in Eschweiler, Remscheid und Gütersloh herangezogen.

Für die Bestimmung der Fahrtgeschwindigkeit gemäß dem Kapitel S6 des HBS wurden Verkehrszählungen genutzt, deren Erhebung in den folgenden Zeiträumen erfolgte:

- Verler Straße in Gütersloh: Zählungen am Donnerstag, 15. April 2021 in der morgendlichen und in der nachmittäglichen Spitzenstundengruppe (6:00 bis 10:00 Uhr und 15:00 bis 19:00 Uhr, ergänzt um Detektordaten aus den Lichtsignalsteuerungen der betrachteten Knotenpunkte sowohl von diesem Tag als auch von Donnerstag, 11. April 2019 (Vergleichstag vor der Corona-Pandemie)

- Indestraße in Eschweiler: Zählungen am Dienstag, 11. September 2018 und Donnerstag, 13. September 2018 in der morgendlichen und in der nachmittäglichen Spitzenstundengruppe (6:00 bis 10:00 Uhr und 15:00 bis 19:00 Uhr)
- Elberfelder Straße in Remscheid: Zählungen am Dienstag, 6. November 2018 sowie am Dienstag, 14. Mai 2019 und Mittwoch, 15. Mai 2019, jeweils in der morgendlichen und in der nachmittäglichen Spitzenstundengruppe (6:00 bis 10:00 Uhr und 15:00 bis 19:00 Uhr)

Die für den Vergleich genutzten Fahrtgeschwindigkeiten ergeben sich dabei aus der im Verfahren nach Kapitel S6 berechneten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt. Die mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf den Teilstrecken der Netzabschnitte wurden mit Hilfe der q-V-Funktionen gemäß Kapitel S3 berechnet. Für die Untersuchungsstrecke in Remscheid lagen zusätzlich Fahrtzeiten aus einer mikroskopischen Verkehrssimulation vor, aus denen eine weitere Vergleichsgeschwindigkeit berechnet wurde. Die für den Vergleich genutzten FCD umfassen auf allen Untersuchungsstrecken ein gesamtes Jahr zwischen dem 01.07.2018 und dem 31.06.2019. Aus den Daten wurden mithilfe der beiden in das vorherige Kapitel vorgestellten Ansätze verschiedene mögliche bemessungsrelevante Fahrtzeiten bestimmt.

Es ist bei dem Vergleich der Fahrtgeschwindigkeiten zu beachten, dass sich durch die Verschiedenheit der Grundlagendaten einige inhärente Unterschiede ergeben. Zunächst werden bei dem Verfahren nach Kapitel S6 des HBS lediglich die Fahrzeuge betrachtet, die geradeaus in den Netzabschnitt hineinfahren und diesen dann auch wieder in Fahrtrichtung geradeaus verlassen. Die Bestimmung der Fahrtgeschwindigkeit geschieht dann jeweils von der Mitte des Startknotenpunktes bis zur Mitte des Endknotenpunktes. Bei der Nutzung von FCD ist es grundsätzlich möglich, auch alle Fahrzeuge mit einzuschließen, die zu Beginn in den Netzabschnitt oder am Ende aus dem Netzabschnitt ausbiegen. Um eine möglichst große Datenbasis für den Netzabschnitt zu gewinnen kann es sogar empfehlenswert sein, diese Fahrzeuge mit zu betrachten. Dabei kann es allerdings zu Verzerrungen der mittleren Fahrtgeschwindigkeit aufgrund längerer Wartezeiten auf Abbiegefahrstreifen kommen.

Stadt	Netzabschnitt	Richtung	Länge ¹ [m]	Anzahl Trajektorien	Fahrtgeschwindigkeit aus FCD-Ansatz 1 (50. Stunde) [km/h]	Fahrtgeschwindigkeit aus FCD-Ansatz 2 (Spitzenstunde) [km/h]		Fahrtgeschwindigkeit nach HBS-Kapitel S6 [km/h]		Fahrtgeschwindigkeit aus Simulation/ Messfahrten [km/h]	
						Vormittag	Nachmittag	Vormittag	Nachmittag	Vormittag	Nachmittag
Eschweiler	Indestraße	West-Ost	793	4.996	9,8	30,7	27,7	20,5	18,6	-	-
Eschweiler	Indestraße	Ost-West	793	4.364	7,3	22,1	22,7	17,6	18,4	-	-
Remscheid	Elberfelder Straße	Nord-Süd	973	8.284	13,7	38,8	34,3	27,5	25,3	34,3	33,7
Remscheid	Elberfelder Straße	Süd-Nord	973	10.102	19,0	35,7	33,3	21,1	19,4	38,1	35,0
Gütersloh	Verler Straße	Nord-Süd	763	20.369	9,0	37,9	40,5	39,2	36,2	-	-
Gütersloh	Verler Straße	Süd-Nord	763	22.978	11,1	23,0	23,1	31,3	29,8	-	-

¹ Die Länge bei Berechnung der Fahrtzeit nach HBS-Kapitel S6 und die Länge bei Ermittlung der Fahrtzeit aus FCD weichen geringfügig voneinander ab.

Tabelle 5.6: Vergleich der Fahrtzeiten aus FCD mit Fahrtzeiten aus dem Verfahren des HBS (FGSV 2015)

Eine weitere Besonderheit, die beachtet werden muss, ist die Möglichkeit der FCD, bestehende Koordinierungen unter den Lichtsignalanlagen an den Knotenpunkten des Netzabschnittes abzubilden. Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit aus FCD wird über den gesamten Netzabschnitt im Bestand erhoben und nicht, wie im Verfahren nach HBS-Kapitel S6, auf Grundlage der theoretischen Fahrtgeschwindigkeiten auf den Teilstrecken und Wartezeiten an den einzelnen Knotenpunkten berechnet. Es ist daher davon auszugehen, dass die mittels FCD erhobenen Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten mit einer bestehenden Koordinierung geringer sind als die berechneten Fahrtgeschwindigkeiten mit dem Verfahren des HBS. Ebenso

gehen in die FCD- Fahrtgeschwindigkeiten auch bestehende, wiederkehrende Störfaktoren, wie Straßenbahnen oder Radfahrende im fließenden Verkehr mit in die bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit aus den FCD ein.

Tabelle 5.6 zeigt sämtliche berechneten Fahrtgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse der Untersuchungsstrecken sind dabei differenziert zu betrachten. Für die Indestraße in Eschweiler ist ersichtlich, dass die FCD-Fahrtgeschwindigkeit der durchschnittlichen Spitzenstunden deutlich oberhalb der berechneten Fahrtgeschwindigkeit gemäß HBS Kapitel S6 liegen. Es ist für die Indestraße also davon auszugehen, dass die Fahrtgeschwindigkeiten gemäß HBS Kapitel S6 zu niedrig angesetzt sind. Dies lässt sich durch eine bestehende Koordinierung der Lichtsignalanlagen entlang des Netzabschnittes begründen.

Auch bei der Elberfelder Straße in Remscheid ergeben die Berechnungen gemäß des HBS eine deutlich niedrigere Fahrtgeschwindigkeit als der FCD-basierte Ansatz auf Grundlage der durchschnittlichen Spitzenstunden. Wie in Eschweiler kann auch hier eine bestehende Koordinierung der Lichtsignalanlagen an den Knotenpunkten als Grund für die Differenz herangezogen werden. Gestützt werden die Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD auf diesem Netzabschnitt durch die Verkehrssimulation und die durchgeführten Messfahrten, die jeweils die vorliegende Koordinierung berücksichtigen.

Bei der Verler Straße in Gütersloh ist zu sehen, dass die Fahrtgeschwindigkeiten gemäß HBS-Kapitel S6 gut mit den FCD-basierten Fahrtgeschwindigkeiten auf Grundlage der durchschnittlichen Spitzenstunden übereinstimmen. In der Gegenrichtung liegen allerdings die Fahrtgeschwindigkeiten des FCD-basierten Ansatzes deutlich niedriger als die berechneten Fahrtgeschwindigkeiten des HBS Kapitels S6. Dies lässt sich dadurch begründen, dass an diesem Netzabschnitt regelmäßige Stauerscheinungen zu beobachten sind, die durch das Verfahren nach dem HBS nicht abgebildet werden.

Der Vergleich der Fahrtgeschwindigkeiten aus den entwickelten FCD-basierten Ansätzen mit den Ergebnissen des Verfahrens nach HBS Kapitel S6 ergibt, dass die FCD- Fahrtgeschwindigkeiten auf Grundlage der durchschnittlichen Spitzenstunde einen besseren Eindruck der tatsächlich vorliegenden Angebotsqualität der Netzabschnitte vermittelt. Besonders der Effekt einer bereits eingerichteten LSA-Koordinierung entlang der Knotenpunkte des Netzabschnittes hat einen deutlichen Einfluss auf die Angebotsqualität, was die Analyse der FCD- Fahrtgeschwindigkeiten zeigt. Lediglich an Netzabschnitten ohne vorliegende Koordinierung und ohne regelmäßig auftretende Störfälle, die nicht aus der Nachfrage zu begründen sind, liegen die Fahrtgeschwindigkeiten aus HBS- und FCD-Verfahren in einem ähnlichen Bereich. Aus diesen Ergebnissen resultieren auch zumeist unterschiedliche Stufen der Angebotsqualität (SAQ). Tabelle 5.7 zeigt diese Unterschiede für alle betrachteten Streckenzüge.

Stadt	Netzabschnitt	Richtung	Länge [m]	V _{H5/V5,N}	SAQ nach HBS Kapitel S6		SAQ aus FCD-Ansatz (Spitzenstunde)	
					Vormittag	Nachmittag	Vormittag	Nachmittag
Eschweiler	Indestraße	West-Ost	793	20,4	D	E	B	C
Eschweiler	Indestraße	Ost-West	793	20,4	E	E	D	D
Remscheid	Elberfelder Straße	Nord-Süd	973	21,3	C	D	B	B
Remscheid	Elberfelder Straße	Süd-Nord	973	21,3	E	E	B	B
Gütersloh	Verler Straße	Nord-Süd	763	30,9	B	C	B	B
Gütersloh	Verler Straße	Süd-Nord	763	30,9	D	E	F	F

Tabelle 5.7: Vergleich der Angebotsqualität aus Bestimmung durch FCD und Bestimmung durch Kapitel S6 des HBS (FGSV 2015)

Damit wird deutlich, dass der Ansatz, eine bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit aus der 50. Stunde der Fahrtgeschwindigkeitsverteilung zu bestimmen, verworfen werden sollte.

5.4 Fahrtzeiten aus Verkehrsflusssimulation und FCD

5.4.1 Verkehrsflusssimulation als alternatives Verfahren im HBS

In der Anwendungspraxis der Verfahren – dies betrifft sowohl das Verfahren für Strecken als auch das Verfahren für Netzabschnitte – hat sich gezeigt, dass insbesondere an angebauten Hauptverkehrsstraßen aufgrund der Überlagerung unterschiedlicher Nutzungsansprüche den analytischen Berechnungsverfahren enge Einsatzgrenzen gesetzt sind. Vor diesem Hintergrund wurden bereits bei der Entwicklung der beiden Verfahren auch Hinweise zur Anwendung von mikroskopischer Verkehrsflusssimulation als alternatives Verfahren erarbeitet. Diese Hinweise wurden, mit Verweis auf die „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ (FGSV 2006), in das HBS in der Fassung von 2015 aufgenommen. Sie sind im Hinblick auf die bereits bei der Veröffentlichung des HBS erkannten Grenzen der Berechnungsverfahren ausführlicher als die entsprechenden Hinweise zu den anderen darin enthaltenden.

Des Weiteren ergeben sich für das Verfahren für Netzabschnitte aber auch Anwendungsgrenzen aus den Signalsteuerungen der Knotenpunkte, da das Berechnungsverfahren des HBS nur für lichtsignalgeregelte Einmündungen und Kreuzungen mit Festzeitsteuerung gilt. Die mittleren Wartezeiten an verkehrabhängig gesteuerten Knotenpunkten, die mittlerweile auf Hauptverkehrsstraßen in Städten innerhalb von Ballungsräumen eher die Regel als die Ausnahme sind, können somit nicht berechnet werden. Auch Wechselwirkungen benachbarter Knotenpunkte können nicht berücksichtigt werden, da nur die Betrachtung und Bewertung einzelner Knotenpunkte möglich ist. Deshalb können auch keine mittleren Wartezeiten für Knotenpunkte im Zuge von Koordinierungen bestimmt werden. Insofern bestehen die Anwendungsgrenzen des Verfahrens für Netzabschnitte also nicht nur aufgrund der Einschränkungen des Verfahrens für die Strecken.

Darüber hinaus wird zur Anwendung des Verfahrens vorausgesetzt, dass keine Teilstrecke, keine der auf dem Netzabschnitt den durchfahrenden Verkehr betreffenden Zufahrten bzw. Fahrstreifen (Signalgruppen) an Knotenpunkten und keine Ausfahrt, Verflechtungsstrecke oder Einfahrt eines planfreien oder teilplanfreien Knotenpunkts im Zuge des Netzabschnitts überlastet ist. Auch dies schränkt die Anwendungsmöglichkeit insbesondere für Hauptverkehrsstraßen in Städten innerhalb von Ballungsräumen in vielen Fällen ein.

Im HBS sind zu den zuvor beschriebenen Verfahren für Strecken von Hauptverkehrsstraßen, für Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage sowie für Netzabschnitte jeweils Hinweise auf andere geeignete Verfahren gegeben, die verwendet werden können, wenn die jeweils beschriebenen Randbedingungen nicht gegeben sind. Der Schwerpunkt der Ausführungen liegt dabei auf der Anwendung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (Mikrosimulation) als alternatives Verfahren.

In diesem Zusammenhang wird jeweils darauf verwiesen, dass bei der Anwendung der Mikrosimulation die „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ der FGSV (2006) zu beachten sind. Die Gültigkeit des verwendeten Mikrosimulationsmodells ist in jedem Anwendungsfall nach den dort erläuterten Methoden nachzuweisen.

Zu **Strecken von Hauptverkehrsstraßen** wird im HBS ausgeführt, dass – um die Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs mittels Mikrosimulation zu bestimmen – in der Simulation die fahrstreifenbezogene Verkehrsdichte für die Streckenanteile außerhalb der Knotenpunktbereiche zu ermitteln ist. Diese für den Streckenanteil außerhalb der Knotenpunktbereiche ermittelte Verkehrsdichte wird dann vereinfachend für die gesamte Strecke von Knotenpunktmitte bis Knotenpunktmitte angesetzt.

Bei einem von Instationaritäten geprägten Verkehrsablauf ist zur Ermittlung der fahrstreifenbezogenen Verkehrsdichte auf einer Strecke eine räumlich-zeitliche Auswertung entweder der Dichte oder der Geschwindigkeit erforderlich, um alle Kraftfahrzeuge zu berücksichtigen, die sich während des Betrachtungszeitraums zeitweise auf der Strecke aufhalten.

Bei der Erfassung der räumlich-zeitlichen Verkehrsdichte kann diese zur Reduzierung des Auswerteaufwands in der Simulation durch momentane Messungen in konstanten Zeitschritten ermittelt werden. Für die momentane Erfassung sind die Dauern dieser Messintervalle so zu diskretisieren, dass eine Verzerrung

der Dichtewerte vermieden wird, was z. B. bei der Überlappung von Freigabe- und Sperrzeiten der Lichtsignalsteuerungen innerhalb eines Messintervalls eintreten kann. Diesem Umstand ist durch die Wahl eines entsprechend kurzen Messintervalls entgegenzuwirken.

Die mittlere Fahrgeschwindigkeit aller Kfz auf der Strecke der Länge ergibt sich aus deren mittleren Fahrtzeit auf der Strecke. Diese entspricht dem Mittelwert der Fahrtzeiten aller Kfz, die innerhalb des Betrachtungszeitraums in die Strecke einfahren und diese vollständig durchfahren. Diese Fahrtzeiten sind in der Simulation über den Streckenteil außerhalb der Knotenpunktbereiche zu messen.

In der Simulation ist eine möglichst realistische Abbildung der Störeinflüsse durch Erschließungsvorgänge wie Parkvorgänge oder Halte- und Liefervorgänge auf der Fahrbahn zu gewährleisten. So können Einparkvorgänge einen direkten Störeinfluss auf den Verkehrsablauf durch zeitweiliges Blockieren eines Fahrstreifens haben. Maßgebend ist die Stördauer, während der der Fahrstreifen durch das einparkende Fahrzeug blockiert wird; diese beginnt mit dem Halt auf dem Fahrstreifen und endet mit dem Verlassen der Fahrbahn. Ausparkvorgänge haben nur einen Störeinfluss, wenn ein anderes Fahrzeug während des Ausparkvorgangs wartet und dem ausparkenden Fahrzeug Vorrang gibt, z. B. um anschließend selbst einzuparken. Insofern ist es ausreichend, Parkvorgänge durch Halte einzelner Fahrzeuge auf der Fahrbahn abzubilden. Dabei sind entsprechende, z. B. empirisch ermittelte, mittlere Stördauern zu Grunde zu legen.

Zu **Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage** wird im HBS ausgeführt, dass für den Nachweis der Verbesserung der Verkehrsqualität, die durch verkehrabhängige Steuerungen erreicht werden kann, alternative Verfahren anzuwenden sind. Hierbei können Verfahren der Mikrosimulation zur Anwendung kommen. Wichtig ist dabei, dass die gleichen Kenngrößen – z. B. mittlere Wartezeiten, mittlere Rückstaulängen und Perzentile der Rückstaulängen für die einzelnen Verkehrsströme – abgeleitet werden, damit gleichwertige Aussagen zu den Verkehrsqualitäten, den erforderlichen Längen der Aufstellstreifen usw. gemacht werden können. Neben der Wartezeit können weitere Kenngrößen für die Qualitätsbewertung herangezogen werden, z. B. Rückstaulängen, Anzahl der Halte oder der Durchfahrten und der Auslastungsgrad.

Bei **Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage** ist nach dem HBS zu berücksichtigen, dass bei einigen mikroskopischen Simulationsprogrammen ausschließlich Verlustzeiten – als Zeitverlust gegenüber der unbehinderten Durchfahrt – erfasst werden können, die nicht unmittelbar mit den vorgegebenen Grenzwerten der mittleren Wartezeit verglichen werden dürfen. Die berechnete mittlere Wartezeit schließt nicht alle an einem Knotenpunkt gegenüber der unbehinderten Durchfahrt auftretenden Zeitverluste ein. So sind beispielsweise an Knotenpunkten mit Vorfahrtbeschilderung die aus Verzögerungsvorgängen am Warteschlangenende resultierenden zusätzlichen Zeitverluste nicht in der berechneten mittleren Wartezeit enthalten. Ebenso sind Zeitverluste durch die Befahrung des Knotenpunkts (geometric delay) und die Beschleunigung hinter dem Knotenpunkt nicht enthalten. Die zusätzlichen Zeitverluste durch Verzögerung und Beschleunigung sind von der gefahrenen Geschwindigkeit vor bzw. hinter dem Knotenpunkt sowie an Einmündungen und Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage von der Art der Vorfahrtregelung – durch Zeichen 205 StVO (Vorfahrt gewähren!) oder Zeichen 206 StVO (Halt! Vorfahrt gewähren!) – abhängig.

Daher ist im Einzelfall zu prüfen, welche Zeiten mit dem verwendeten Simulationsprogramm ermittelt und ausgewertet werden können. Werden die gesamten Verlustzeiten bei der Fahrt durch den Knotenpunkt ermittelt, so sind die in der Simulation erfassten mittleren Verlustzeiten, um die in im Verfahren für Netzabschnitte angegebenen Zuschläge für den zusätzlichen Zeitverlust vor und hinter einem Knotenpunkt (diese sind jeweils bezogen auf die Knotenpunktmitte) zu verringern. Werden dagegen die Verlustzeiten bis zum Verlassen der Warte- bzw. Haltlinie für die wartepflichtigen Fahrzeugströme an Einmündungen und Kreuzungen mit Vorfahrtbeschilderung bzw. bis zum Einfahren in die Kreisfahrbahn an Kreisverkehren ermittelt, sind die in der Simulation erfassten mittleren Verlustzeiten um die aus den Verzögerungen in der Knotenpunktzufahrt resultierenden zusätzlichen Zeitverluste zu verringern. Hierbei sind gegenüber den in Kapitel S6 angegebenen Zuschlägen für den zusätzlichen Zeitverlust vor einem Knotenpunkt (bezogen auf die Knotenpunktmitte) reduzierte Werte anzusetzen. Die so bestimmten Wartezeiten können dann mit den vorgegebenen Grenzwerten verglichen werden.

Für **Netzabschnitte** benennt das HBS als mögliche geeignete alternative Verfahren die Mikrosimulation und die Durchführung von Messfahrten bzw. die Verwendung von Floating Car Data (FCD). Bei der Durchführung von Messfahrten bzw. der Verwendung von FCD sind eine ausreichende Anzahl von Messfahrten bzw. Daten innerhalb der Bemessungsstunde erforderlich.

Die zu erwartende mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf einem Netzabschnitt ist dabei aus dem Mittelwert der Fahrtzeiten aller durchfahrenden Pkw auf dem Netzabschnitt zu ermitteln. Als Bezugsgröße ist die nach dem Berechnungsverfahren definierte Länge des Netzabschnitts zu Grunde zu legen.

Um aus dem Ergebnis alternativer Verfahren die Stufe der Angebotsqualität zu bestimmen, muss das im Berechnungsverfahren zu Grunde gelegte Kriterium für die Bewertung der Angebotsqualität – der Fahrtgeschwindigkeitsindex – als Ergebnisgröße ermittelt werden. Dafür ist die angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt gemäß dem Berechnungsverfahren als Bezugsgröße zu verwenden.

5.5 Kalibrierung von Verkehrsflusssimulation mit FCD für die Prognose

FC-Daten können nur Fahrtzeitinformationen aus der Vergangenheit liefern, d.h. ihre direkte Verwendung zur Bewertung der Verkehrsqualität ist auf die Analyse bestehende Anlagen begrenzt. Aber auch für den Prognosefall können FCD eine wertvolle Unterstützung darstellen, indem sie verwendet werden, um ein mikroskopisches Verkehrsflusssimulationsmodell im Ist-Zustand zu kalibrieren, das dann zur Fahrtzeitbestimmung im Prognosefall weiterentwickelt wird.

Im diesem Unterkapitel wird deshalb die Kalibrierung eines Mikrosimulationsmodells in PTV Vissim mithilfe von FCD am Beispiel einer der Untersuchungsstrecken in Karlsruhe beschrieben. Die wesentliche Kalibrierungsgröße ist die Fahrtzeit, weil das die verkehrstechnische Kenngröße ist, die das HBS-Verfahren zur Bewertung vorschreibt. Es wird im Folgenden nicht nur das Ergebnis der Kalibrierung dargestellt, sondern auch der Arbeitsablauf exemplarisch beschrieben.

5.5.1 Datenaufbereitung

Um die FCD zur Kalibrierung verwenden zu können, müssen diese zunächst aufbereitet werden. In der Regel werden zeitlich und räumlich mehr FCD vorliegen, als für die Kalibrierung des Streckenzugs benötigt werden. Im hier dargestellten Fall wurde für die nachmittägliche Spitzenstunde eines Normalwerktags kalibriert. Aus unabhängig von den FCD erhobenen Belastungszahlen wurde ermittelt, dass diese Spitzenstunde zwischen 16:30 und 17:30 Uhr liegt.

Zuerst wurden die FCD nach Wochentag und Uhrzeit gefiltert. Betrachtet wurden lediglich die Datenpunkte aller Dienstage, Mittwoch und Donnerstag im Jahr 2021, die in der Spitzenstunde von 16:30 bis 17:30 Uhr mit je einer Viertelstunde Vor- und Nachlauf lagen. Anschließend erfolgte eine räumliche Filterung der FCD; dazu wurde ein die Untersuchungsstrecke eng umschließendes Filterpolygon definiert.

Um außerdem eine Quell-Ziel-Matrix erstellen zu können, wurde jeder Zufahrt und Abfahrt zur Untersuchungsstrecke ein Polygon zugeordnet. Liegen die Zufahrten eng beieinander, wie z.B. beim Gewerbegebiet zwischen der Wachhaus- und Ottostraße, erscheint eine exakte Zuordnung aufgrund der GPS-Ungenauigkeiten zu ungenau. Aus diesem Grund können solche Zufahrten zu einem Polygon zusammengefasst werden, wobei die Ein- und Abbiegeanteile der Quell-Ziel-Matrix, die in das Simulationsmodell eingehen, im Nachgang auf die einzelnen Zufahrten aufgeteilt werden müssen. Aus den hieraus resultierenden Informationen über die Wege wurde eine Quell-Ziel-Matrix erstellt, die als Eingabe des Simulationsmodells dient. Weiterhin konnte mithilfe der Quell-Ziel-Matrix jeder Trajektorie eine Fahrtrichtung zugewiesen werden, nach der bei den nachfolgenden Auswertungen gefiltert werden kann.

Im Folgenden wurden nur Fahrzeuge betrachtet, bei denen mindestens ein Sendepunkt im Polygon der Untersuchungsstrecke lag. Fahrzeugtrajektorien wurden immer dann aufgetrennt, wenn zwischen zwei Sendepunkten mehr als 60 s lagen, da dann davon ausgegangen werden konnte, dass es sich hierbei um zwei verschiedene Wege handelt. Diese zeitliche Grenze muss jeweils an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden.

5.5.2 Aufbau des Simulationsmodells

Zur Erstellung des Simulationsmodells wurde die Geografie und Topologie der Untersuchungsstrecke auf einer Hintergrundkarte in PTV Vissim nachgebaut. Als weitere Eingangsdaten sind die Fahrzeugzuflüsse und -zusammensetzungen notwendig. Die Verkehrsbelastungen wurden hier aus der in Kapitel 4.2 be-

schriebenen Messung entnommen. Die FCD selbst konnten dazu nicht herangezogen werden, da aufgrund des nicht bekannten Durchsetzungsgrads keine Rückschlüsse auf die Verkehrsstärke gezogen werden können.

Die Lichtsignalanlage des Knotenpunktes Killisfeldstraße–Auer Straße wurde vereinfacht als Festzeitsteuerung modelliert, wobei die Freigabezeiten im vorliegenden Fall aus Videoaufnahmen heraus bestimmt wurden. Alternativ können Verkehrsbelastungen und Signalzeitenpläne aus den Bestandsplänen entnommen werden. Die beiden nördlich und südlich der Untersuchungsstrecke liegenden Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage wurden ebenfalls in das Modell aufgenommen, damit die Pulkbildung der Fahrzeuge realitätsnah abgebildet werden kann.

Auf der Untersuchungsstrecke verkehrten zwei Buslinien je Fahrtrichtung mit insgesamt acht Haltestellen. Die Abfahrtszeiten und Takte wurden aus den Fahrplänen des Verkehrsverbundes ermittelt. Als Aufenthaltszeit an jeder Haltestelle wurde eine Normalverteilung mit einem Mittelwert von 8 s angenommen.

Die beiden Kreisverkehre auf der Untersuchungsstrecke wurden zunächst mithilfe von Konfliktflächen mit Standardparametern und einem Langsamfahrbereich auf der Kreisfahrbahn simuliert (das sind beides Modellierungsbausteine in Vissim). In der nachfolgenden Kalibrierung nehmen sie eine wichtige Rolle ein und werden genauer betrachtet.

5.5.3 Kalibrierung

Das aufgebaute Simulationsmodell wurde dann mithilfe der realen FCD kalibriert. Dazu mussten die Mess-Informationen aus der Simulation mit den Mess-Informationen aus realen FCD vergleichbar gemacht werden. Da die Kalibrierungsleitgröße die Fahrtzeit ist, können im Simulationsmodell Fahrtzeiten mit den dafür vorgesehenen Modellierungsbausteinen, den in Vissim so genannten Reisezeitmessungen, zwischen beliebigen Streckenquerschnitten ermittelt werden.

Da im vorliegenden Projekt aber auch die Möglichkeit geschaffen worden war, aus der Simulation künstliche FCD zu erzeugen, wurde die Bestimmung der Fahrtzeiten anhand solcher simulierter FCD durchgeführt. Dadurch konnten reale und simulierte Daten noch direkter verglichen werden, da sie in der Auswertung den genau gleichen Prozess durchliefen.

Für die Bestimmung der Fahrtzeiten wurde hier beispielhaft die Methode ohne Map-Matching verwendet, wie sie in Kapitel 2.3.4 eingeführt worden ist. Dabei wird die Fahrtzeit ermittelt, indem die Differenz der Zeit zwischen Datenpunkten innerhalb von zwei definierten Fangradien bestimmt wird. Liegen mehrere Datenpunkte desselben Fahrzeugs in einem Fangradius, wird der Datenpunkt verwendet, der näher am Mittelpunkt des Fangradius liegt. Um eine höhere Datenabdeckung zu erreichen, wurde die Strecke in vier Abschnitte aufgeteilt. Die Wahl der Abschnitte erfolgt zum einen bei einem Wechsel der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und zum anderen aufgrund von örtlichen Gegebenheiten. Die verwendeten Datenpunkte, also jene, die in den Fangradien liegen, sind am Beispiel der realen FCD in Fahrtrichtung Nord-Süd in Bild 5-4 dargestellt.



Bild 5-4: Reale FCD, die in den Fangradien zur Fahrtzeitberechnung liegen am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Die resultierenden Fahrtzeiten der vier Abschnitte je Fahrtrichtung werden nachfolgend für die Kalibrierung herangezogen. Sie sind für reale und simulierte FCD in Bild 5-5 und Bild 5-6 für die Situation vor der Kalibrierung dargestellt. Auf der x-Achse ist dabei die Startuhrzeit dargestellt.

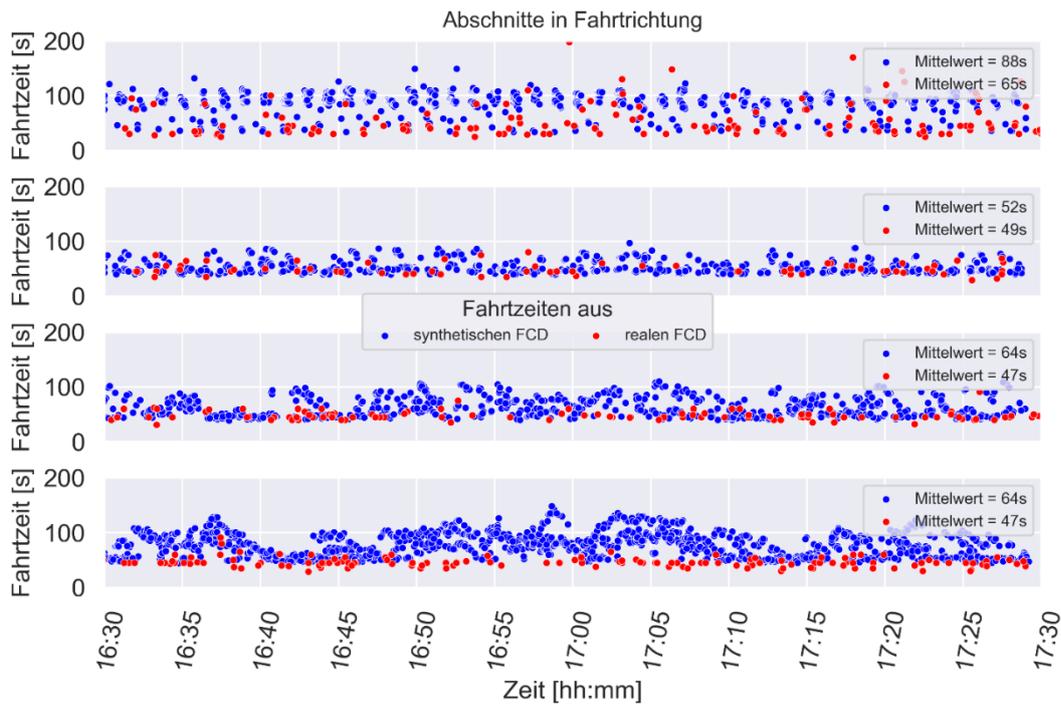


Bild 5-5: Vergleich der Fahrtzeiten aus realen und synthetischen FCD vor der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd

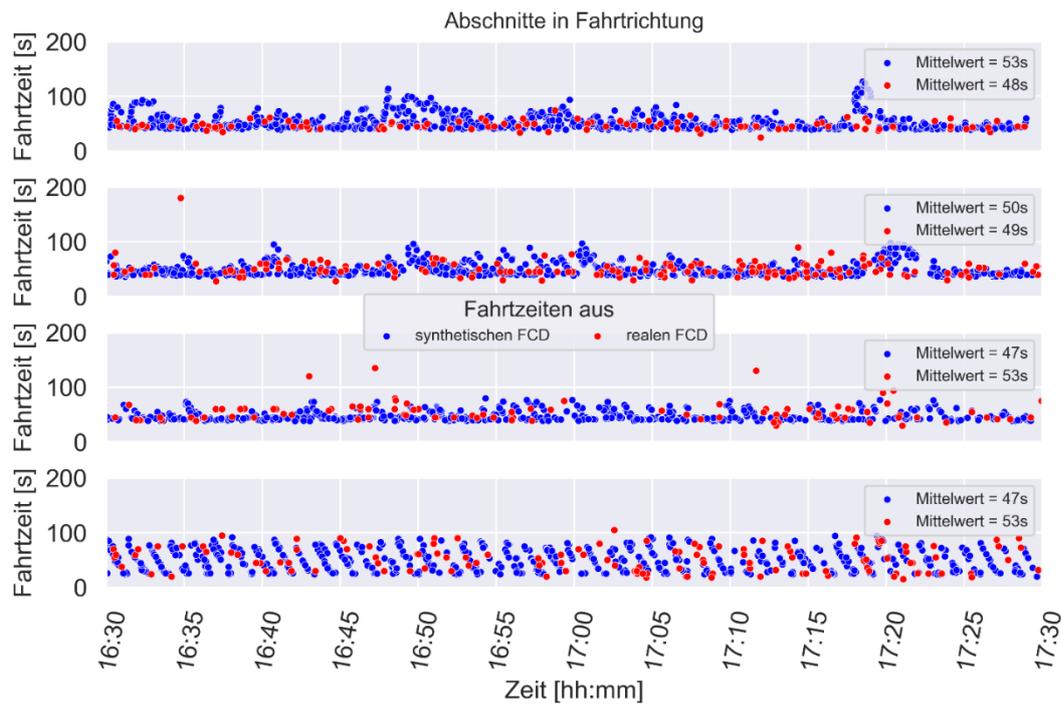


Bild 5-6: Vergleich der Fahrzeiten aus realen und synthetischen FCD vor der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Süd-Nord

Wie in den obenstehenden Abbildungen erkennbar ist, weichen im Ausgangszustand vor der Kalibrierung die Fahrzeiten in der Simulation noch zum Teil deutlich von den aus FCD ermittelten Fahrzeiten ab. Vor allem in Fahrtrichtung Nord-Süd liegen die simulierten Fahrzeiten deutlich über den realen. Um im Prozess der Kalibrierung herauszufinden, wo in der Simulation die Zeit verloren wird, bieten sich die weiter oben eingeführten Diagrammformen Heatmap und Violinplot an, da sie den Verlauf der Fahrgeschwindigkeiten entlang der Strecke visualisieren. Dabei können die Geschwindigkeiten auf der Untersuchungsstrecke in z. B. 10 m langen Abschnitten betrachtet werden, wodurch die Lokalisierung von Unterschieden zwischen Simulationsmodell und Realität sehr genau möglich ist. In Bild 5-7 und Bild 5-8 ist dies für den nicht kalibrierten Zustand dargestellt. Zusammen mit den Übersichtskarten in Bild 5-9 ist eine genaue Verortung der Abweichungen möglich, was eine große Hilfe bei der Kalibrierung darstellt. In mehreren Iterationsschritten wurden daraufhin die LSA-Steuerungen, die Langsamfahrbereiche und ihre Geschwindigkeitsverteilungen, das Fahrverhalten der Fahrradpendler und das Fahrverhalten in den Kreisverkehren angepasst. Letztere wurden zunächst mit Konfliktflächen simuliert, aber da hierdurch in der ortsspezifischen Situation kein realitätsnahes Verhalten erreicht werden konnte, wurde auf Querverkehrsstörungen zurückgegriffen.

Die Fahrzeiten des durch FCD kalibrierten Modells sind in Bild 5-10 und Bild 5-11 zu sehen. Es ist eine ausreichende Übereinstimmung der Fahrzeiten zwischen realen und synthetischen FCD erkennbar.

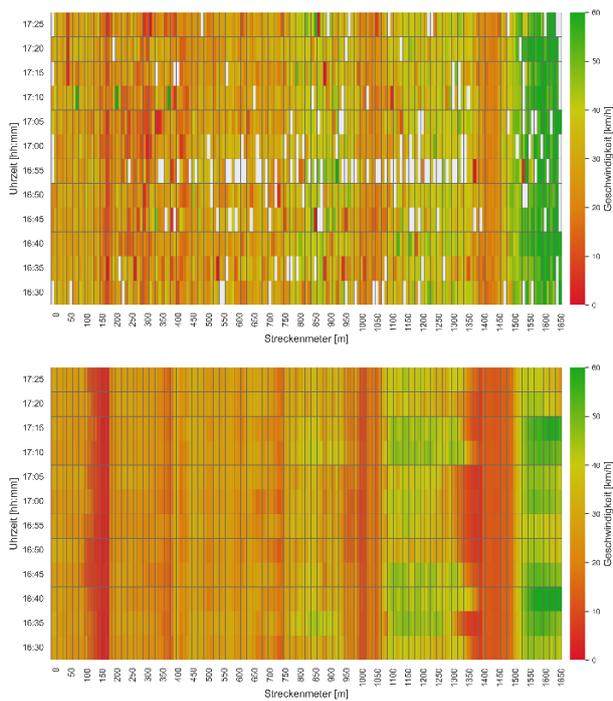


Bild 5-7: Heatmaps der realen (oben) und simulierten (unten) FCD am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd

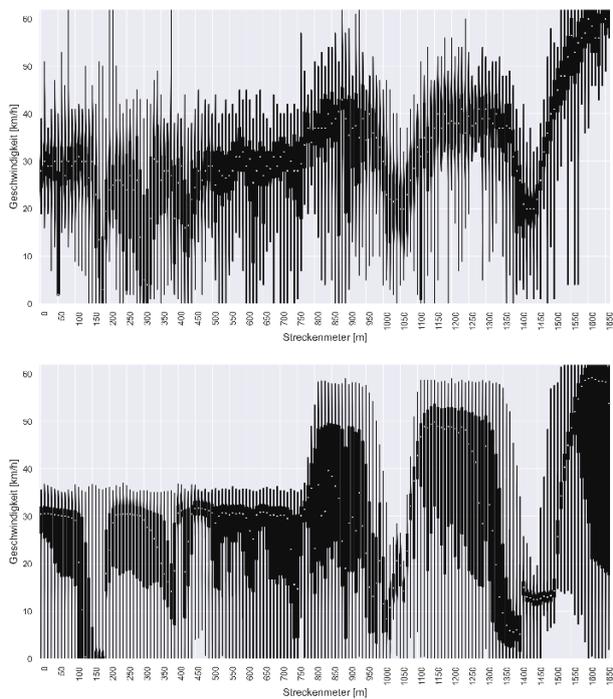


Bild 5-8: Violinplots der realen (oben) und simulierten (unten) FCD am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd

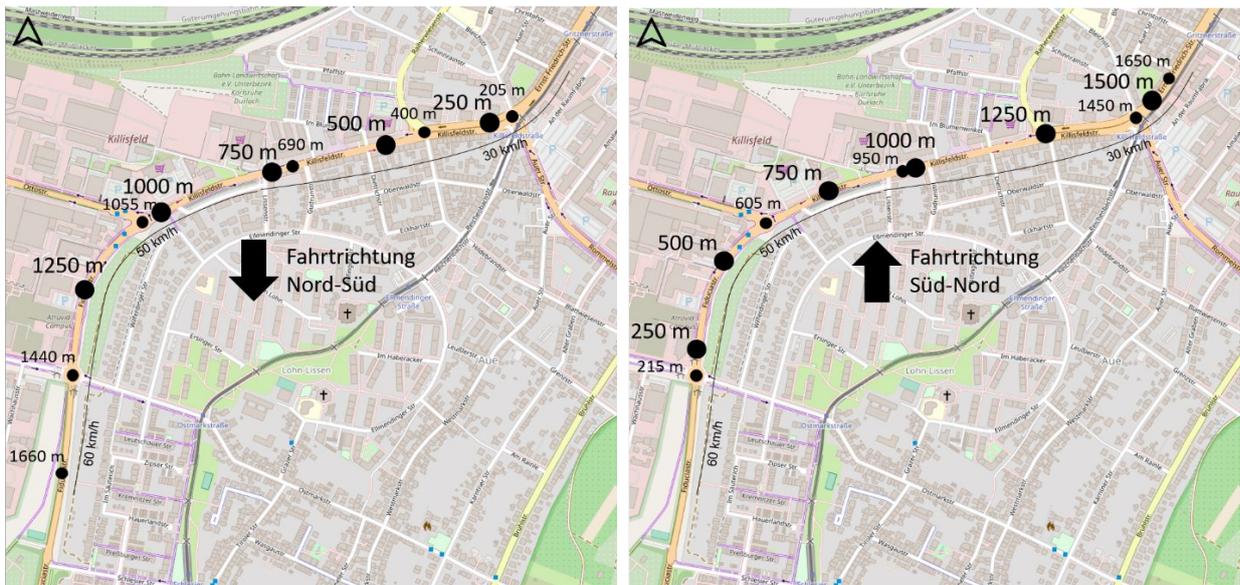


Bild 5-9: Übersichtskarten mit Streckenmeterangaben an wichtigen Punkten am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

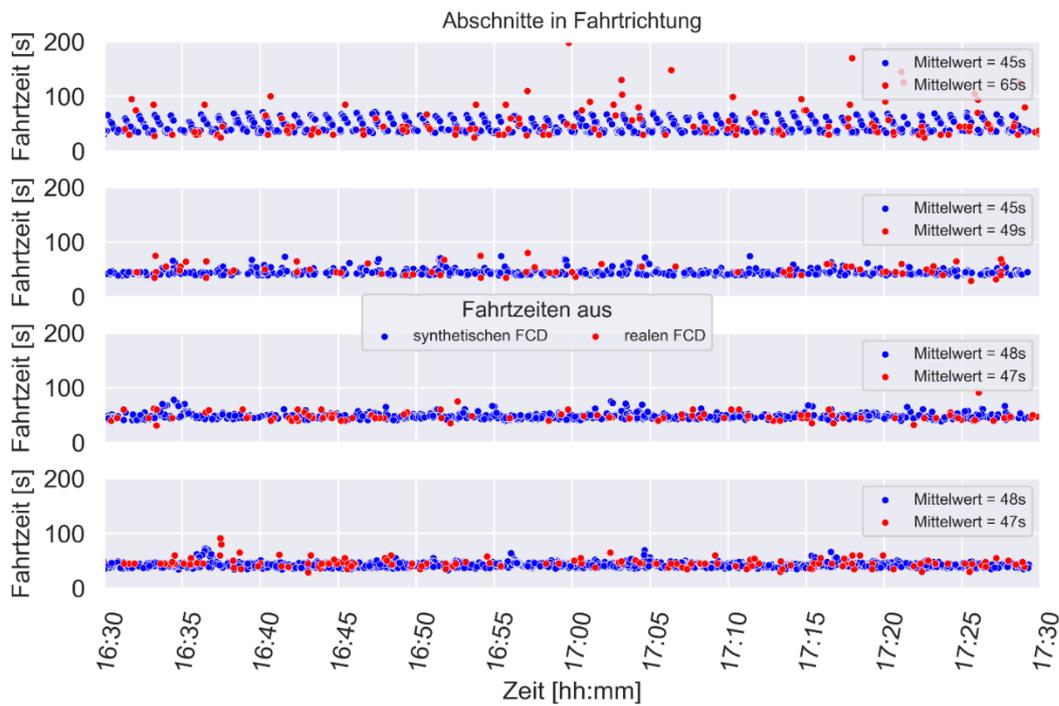


Bild 5-10: Vergleich der Fahrtzeiten aus realen und simulierten FCD nach der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd

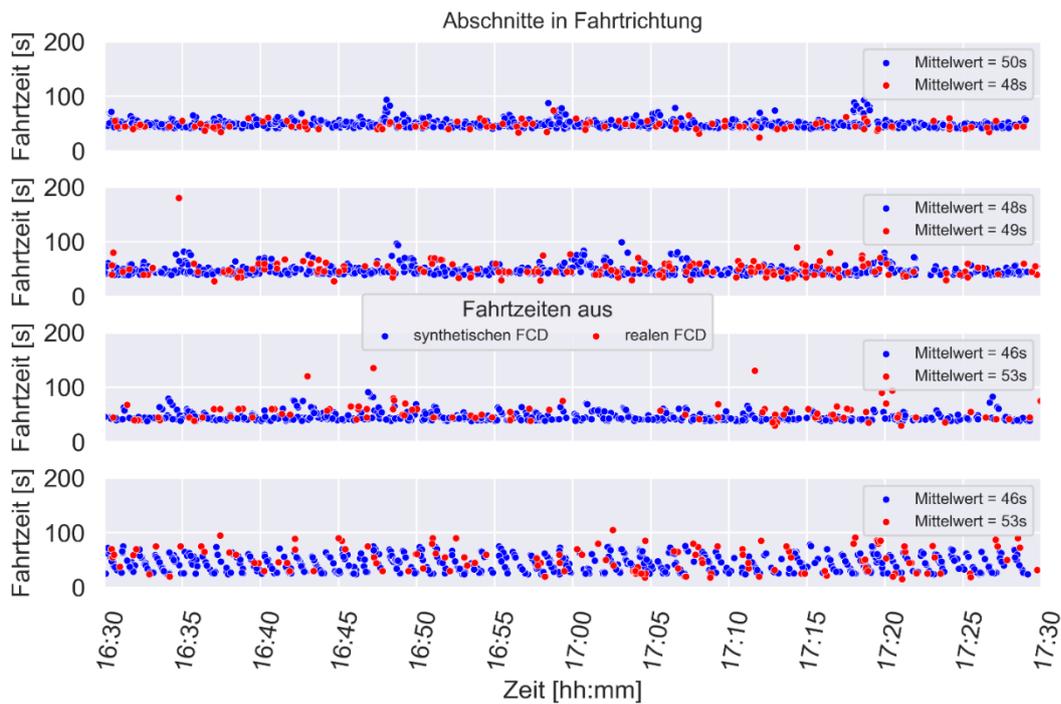


Bild 5-11: Vergleich der Fahrzeiten aus realen und simulierten FCD nach der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Süd-Nord

Im innerstädtischen Verkehr spielen die Wartezeiten an Lichtsignalanlagen eine dominierende Rolle für die Fahrzeiten auf Netzabschnitten. Es ist deshalb besonders wichtig, die Kapazitäten an signalgesteuerten Knotenpunkten genau in der Simulation abzubilden. Auch wenn die Signalprogramme aus Bestandsplänen bekannt sind, kann die ortsspezifische Sättigungsverkehrsstärke immer noch eine Quelle der Unsicherheit sein. Mit dem Verfahren nach FOURATI & FRIEDRICH (2021) kann die Sättigungsverkehrsstärke aus FCD-Trajektorien bestimmt werden. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 5-12 zu sehen. Im roten Bereich des Raum-Zeit-Diagrammes tritt während der Sperrzeit ein Stau („Congestion“) auf, in dem kein Fluss mehr stattfindet. Mit Beginn der Freigabezeit beginnen die Fahrzeuge mit der Anfahrt und erreichen nach dem Durchlauf von einigen Übergangszuständen einen Sättigungszustand („Saturation“) mit konstanten Geschwindigkeiten. In diesem Sättigungszustand tritt die Sättigungsverkehrsstärke auf.

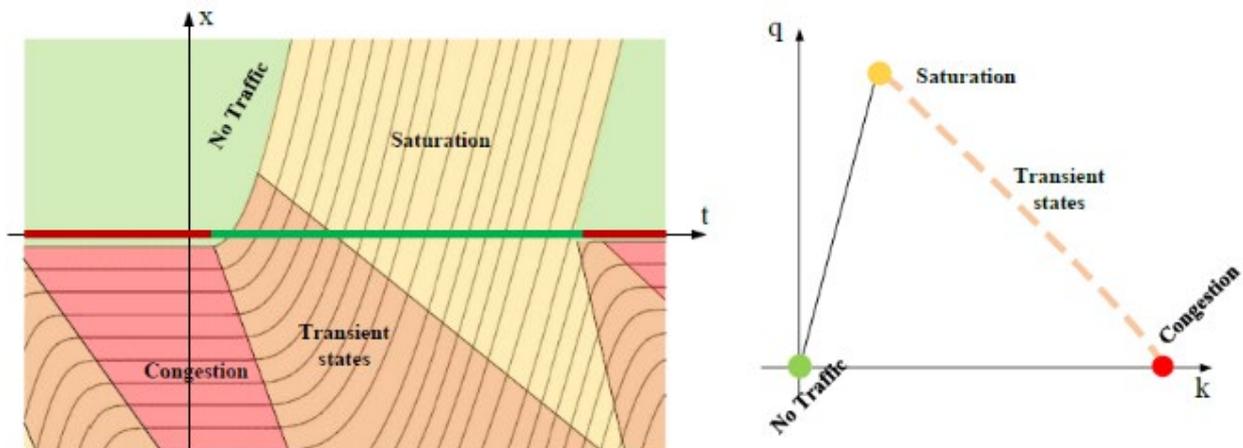


Bild 5-12: Verkehrszustände an der Zufahrt eines signalisierten Knotenpunktes (FOURATI & FRIEDRICH, 2021)

Um anhand dieser Methodik ein Fundamentaldiagramm aus FCD zu ermitteln, werden die FCD-Trajektorien zunächst mit dem Referenzpunkt der jeweiligen Haltelinie der Zufahrt übereinandergelegt, um daraus die

vorliegenden Signalprogramme bzw. Freigabezeiten zu identifizieren. Durch die Anwendung der Definitionen nach EDIE (1963) können aus den akkumulierten Trajektorien die relevanten Kennwerte Verkehrsstärke und -dichte für verschiedene Bereiche vor und nach der Haltelinie einer Zufahrt extrahiert werden. Aus den Einzelwerten wird anschließend ein Fundamentaldiagramm gebildet, aus dem die Sättigungsverkehrsstärke am Punkt der Sättigung abgelesen werden kann. Die Methodik wurde an einem Knotenpunkt in Braunschweig erprobt und mit Hilfe von Video-Auswertung validiert.

5.6 Empfehlungen zur Ergänzung des HBS

Im Kapitel S6 ist im Abschnitt S 6.6 die Verwendung von FCD zur Fahrzeitbestimmung schon jetzt als alternatives Verfahren aufgeführt. Diese Hinweise könnten nach den oben dargestellten Ergebnissen in Übereinstimmung mit dem HBS-Kapitel S 2.3 wie folgt konkretisiert werden:

Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit im Ausgangszustand kann auch durch die Verwendung von Floating-Car-Daten (FCD) bestimmt werden. Dazu müssen FCD für die Wochentage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag für mindestens einen der Monate April bis Oktober beschafft werden. Aus den FCD werden aus allen Tagen die zwei Zeitblöcke von 6:00 bis 10:00 Uhr (Vormittag) und 15:00 bis 17:00 Uhr (Nachmittag) extrahiert und ohne Berücksichtigung des Tages zu jeweils einem Datensatz zusammengefasst. Für beide Datensätze werden dann die mittleren FC-Fahrtgeschwindigkeiten in 15-Minuten-Intervallen bestimmt. In beiden Zeitblöcken (Vormittag und Nachmittag) wird die Spitzenstunde bestimmt als die Folge der vier aufeinanderfolgenden 15-Minuten-Intervalle, die die geringste Summe der mittleren Fahrtgeschwindigkeit aufweisen. Für jede der beiden so identifizierten Spitzenstunden wird schließlich die bemessungsrelevante Fahrtgeschwindigkeit mit Hilfe aller in dieser Spitzenstunde erfassten Fahrzeuge bestimmt.

Die FCD müssen mindestens so viele Tage abdecken, dass in jedem aggregierten 15-Minuten-Intervall mindestens fünf gemessene Fahrtgeschwindigkeiten enthalten sind.

Für den geplanten Zustand können FCD nicht direkt zur Ableitung der bemessungsrelevanten Fahrtgeschwindigkeit verwendet werden. Wird zur Bewertung des geplanten Zustands Mikrosimulation eingesetzt, können FCD zur Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells im Ausgangszustand verwendet werden.

6 Simulationsstudie zur Erkennung von Störungen aus FCD

Zeitverluste treten bei der Fahrt entlang eines Netzabschnitts aus verschiedenen Gründen auf. Bei hohen Belastungen dominieren die Wartezeiten aus Kapazitätsengpässen an den Knotenpunkten, aber auch in nicht voll ausgelasteten Situationen entstehen an Knotenpunkten (geringere) Wartezeiten. Auch Parkvorgänge oder Haltestellen des öffentlichen Verkehrs können den Verkehrsablauf stören. Im folgenden Kapitel wurde untersucht, wie gut solche Störungen durch FCD erkannt werden können. Diese Untersuchung stützt sich vor allem auf simulierte Laborbeispiele, um verschiedene Randbedingungen wie Sendefrequenz, Durchdringungsgrade und Schwere der Störung systematisch variieren zu können. Außerdem wurde untersucht, aus welchen Kenngrößen, die aus den FCD abgeleitet wurden – also im wesentlichen Kenngrößen der Fahrtzeitverteilung – in Verbindung mit Eigenschaften der betrachteten Strecken Indikatoren konstruiert werden können, die möglichst kompakt quantifizieren, wie betroffen eine Strecke oder ein Netzabschnitt von Störungen ist.

Die Nutzung von Laborbeispielen bedeutet hier, Simulationsmodelle von einfachen Streckenabschnitten aufzubauen und in diese bestimmte Störungselemente einzubauen. Dann werden aus dem simulierten Verkehr auf diesen Strecken künstliche FCD mit unterschiedlichen Durchdringungsgraden generiert und aus diesen die Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten auf den Strecken und kleinen Abschnitten davon berechnet. Aus diesen Verteilungen werden dann Störungsindikatoren abgeleitet. Eine Auswertung zeigt dann, welche Störungsarten vom Indikator unter den vorgegebenen Randbedingungen wie gut erkannt werden.

6.1.1 Laborbeispiele zur Beurteilung der Störungserkennung

Für die Modellierung verschiedener Laborbeispiele wurde zunächst ein Basismodell aufgebaut, das als Grundlage aller Laborbeispiele dient. Insgesamt wurde jeweils für zwei Fahrtrichtungen ein drei Kilometer langer einstreifiger Streckenabschnitt simuliert, von dem je ein Kilometer ausgewertet wurde. Es wurde eine Stunde simuliert, in der die Verkehrsstärke jede Viertelstunde um 100 Kfz/h erhöht wurde. Die simulierten Verkehrsstärken reichten von 400 bis 700 Kfz/h. Außerdem wurde ein Vorlauf und ein Nachlauf von einer Viertelstunde mit den Verkehrsstärken des ersten bzw. letzten Auswertintervalls angelegt. Die Fahrzeugzusammensetzung änderte sich über die Zeitintervalle nicht und bestand aus der in Vissim hinterlegten Standardverteilung von 98 % Pkw und 2 % Lkw. Es werden die beiden Geschwindigkeitsbegrenzungen auf 30 km/h und 50 km/h untersucht, für die jeweils die in Vissim vordefinierten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen angesetzt wurden. Die Störstellen befanden sich immer in der Mitte des Streckenabschnitts, also bei 500 m. Insgesamt werden fünf Laborbeispiele aufgebaut, die in Bild 6-1 dargestellt sind und deren Modellierung in PTV Vissim im Folgenden erläutert wird.

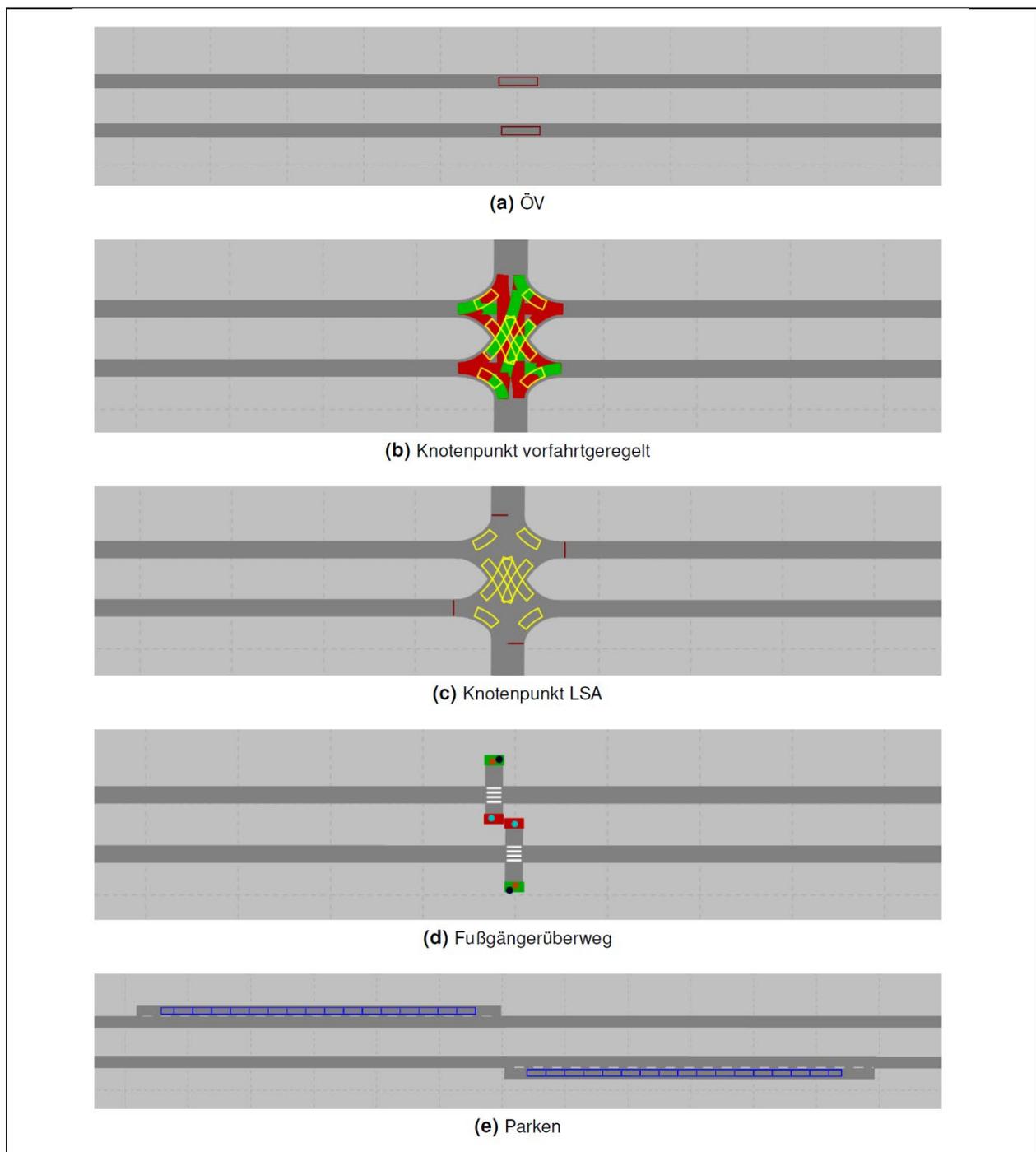


Bild 6-1: Vissim-Modelle der Laborbeispiele

Das Laborbeispiel ÖV enthält pro Fahrtrichtung eine ÖV-Haltestelle in der Mitte der Strecke. Jeweils im 10-min-Takt verkehrt in Fahrtrichtung Ost-West eine Bahn- und in West-Ost eine Buslinie. Die Aufenthaltszeit in Fahrtrichtung West-Ost beträgt 20 s, in Fahrtrichtung Ost-West lediglich 10 s.

Die beiden Knotenpunktmodelle enthalten einen vierarmigen Knotenpunkt, der einmal durch Konflikflächen vorfahrtgeregelt und einmal mit einer LSA betrieben wird. In beiden Fällen werden Langsamfahrbereiche für die Modellierung der Verzögerung in den Kurven angelegt. Die statischen Fahrzeug-Routenentscheidungen der Hauptfahrbahn enthalten je 10 % Links- und Rechtsabbiegender. Die beiden Zufahrten werden mit Fahrzeugzuflüssen von 100 Kfz/h in jedem Zeitintervall und Fahrzeug- Routenentscheidungen

von 20 % Geradeausfahrenden und je 40 % Einbiegenden ausgestattet. Die LSA-Steuerung in Laborbeispiel *Knotenpunkt LSA* kann mithilfe unterschiedlicher Grünzeiten in der Schwere der Störung variiert werden.

Für die Erstellung des Laborbeispiels *Fußgängerüberweg* werden je Fahrtrichtung zwei Flächen und eine Strecke erstellt. Letztere wird als Fußgängerfläche ausgewiesen und verbindet die beiden Flächen über die Hauptfahrbahn hinweg miteinander. Es werden zwei Fußgängerzuflüsse mit 200 Personen/h in Fahrtrichtung West-Ost und 100 Personen/h in Fahrtrichtung Ost-West erstellt. Diese sind bewusst sehr gering gewählt, da die Kfz-Belastungen bereits über den empfohlenen Verkehrsstärken der Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen (EFA, FGSV 2002) für die Anlage eines Fußgängerüberwegs liegen. Höhere Fußgängerbelastungen würden letztlich zu einem kompletten Stillstand des Verkehrs führen. Damit die Fußgänger die Straße überqueren, werden statische Fußgängerrouen von der Fläche, die den Fußgängerzufluss enthält, zur gegenüberliegenden Fläche erstellt. Durch Konfliktflächen wird gewährleistet, dass die Fußgänger Vorrang vor den Kfz haben.

Im Laborbeispiel *Parken* werden Längsparkstände im Bereich zwischen 500 m und 600 m eingebaut. Dazu wurde eine Fahrzeugklasse „Parker“ implementiert, die die Parkstände nutzen. Diese erhalten einen eigenen Fahrzeugzufluss von 100 Kfz/h, die je Zeitintervall von den ursprünglichen Fahrzeugzuflüssen abgezogen werden, damit in allen Laborbeispielen gleich viele Fahrzeuge auf dem Streckenabschnitt modelliert werden. Eine unterschiedliche Schwere der Störstelle wird mithilfe von verschiedenen Parkdauern erreicht. Ist diese kurz, finden häufigere Aus- und Einparkvorgänge statt. Die Parkdauer in Fahrtrichtung West-Ost beträgt 600 s, in Fahrtrichtung Ost-West 1800 s.

6.1.2 Visuelle Störfallerkennung in den Laborbeispielen

Die oben beschriebenen Laborbeispiele wurden mit verschiedenen Durchdringungsgraden (2 %, 5 %, 10 %) und verschiedenen Meldeintervallen (5 s, 10 s, 15 s), also in insgesamt 9 Fällen simuliert. Hinzu kommt als Referenz ein Fall für die perfekte Detektion (100 %, 1 s). Für die simulierten Fälle wurden jeweils vier Diagramme erstellt:

- Ein „Punkte-Diagramm“, in dem entlang der Strecke die Position der meldenden Fahrzeuge mit und ohne Farbcodierung der Geschwindigkeit dargestellt wurde;
- ein „Weg-Zeit-Diagramm“, in dem die Trajektorien der Fahrzeuge als Linien dargestellt wurden; ergänzt um eine Variante, in der die Meldepunkte der Fahrzeuge mit farbcodierter Geschwindigkeit in der Weg-Zeit-Ebene dargestellt werden (Scatter-Plot aus Abschnitt 2.4.2);
- ein „Heatmap“-Diagramm wie in Abschnitt 2.4.3 erläutert;
- ein Violin-Diagramm, wie in 2.4.4 erläutert.

In Bild 6-2 und Bild 6-3 sind beispielhaft anhand des Laborbeispiels *Knotenpunkt mit LSA* jeweils drei Kombinationen aus zulässiger Höchstgeschwindigkeit, Durchdringungsgrad und Sendeintervall die Scatterplots und die Violindiagramme wiedergegeben. Für die Diagramme aller Parameterkombinationen und Laborbeispiele wurde visuell geprüft, wie deutlich die Störungen zu erkennen waren. Die Ergebnisse dieser visuellen Auswertungen sind in Bild 6-4 zusammengefasst, in der grün für sehr deutlich erkennbar und rot für nicht erkennbar steht.

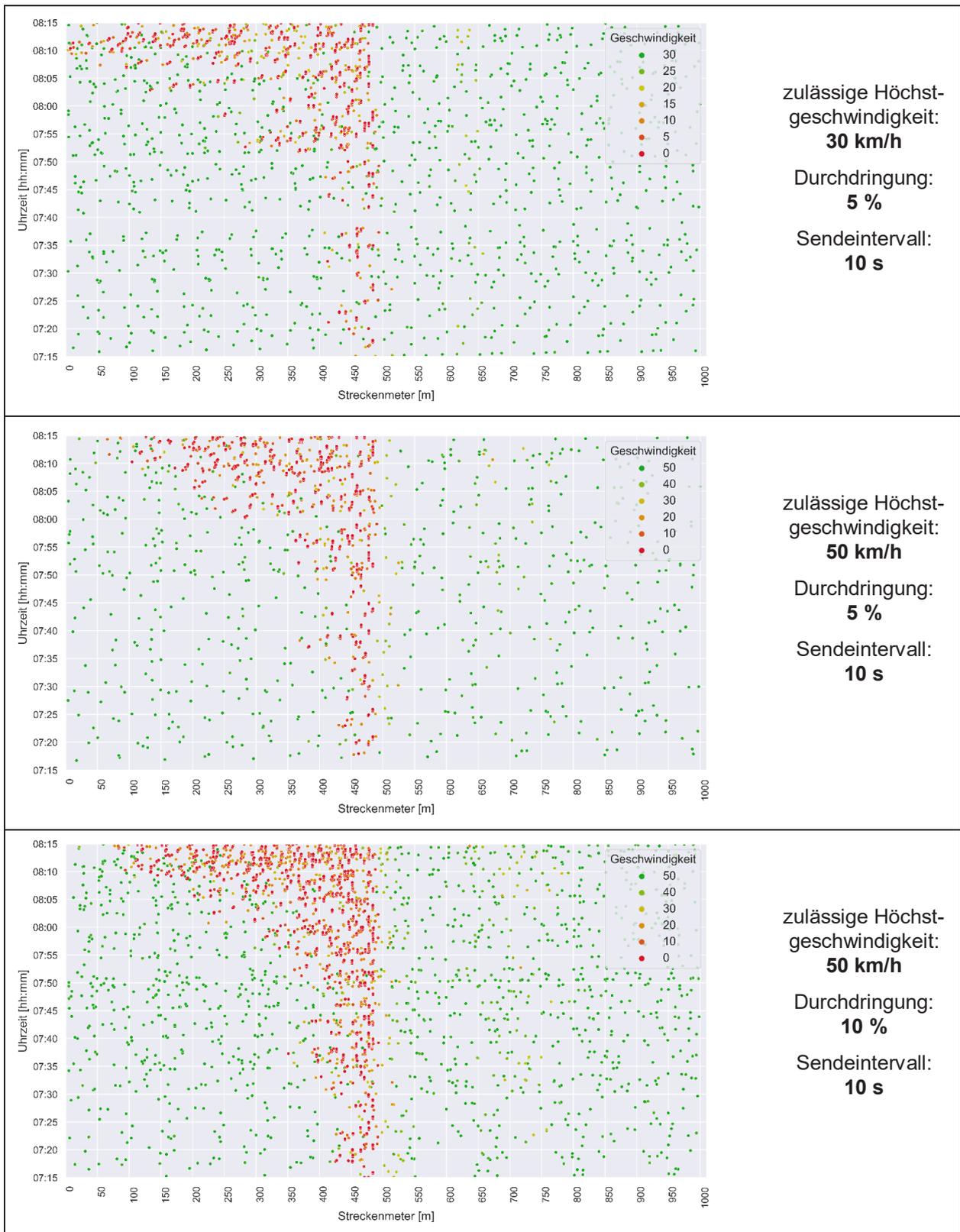


Bild 6-2: Beispieldiagramme (Scatter-Plots), Laborbeispiel Knotenpunkt mit LSA, verschiedene Parameter

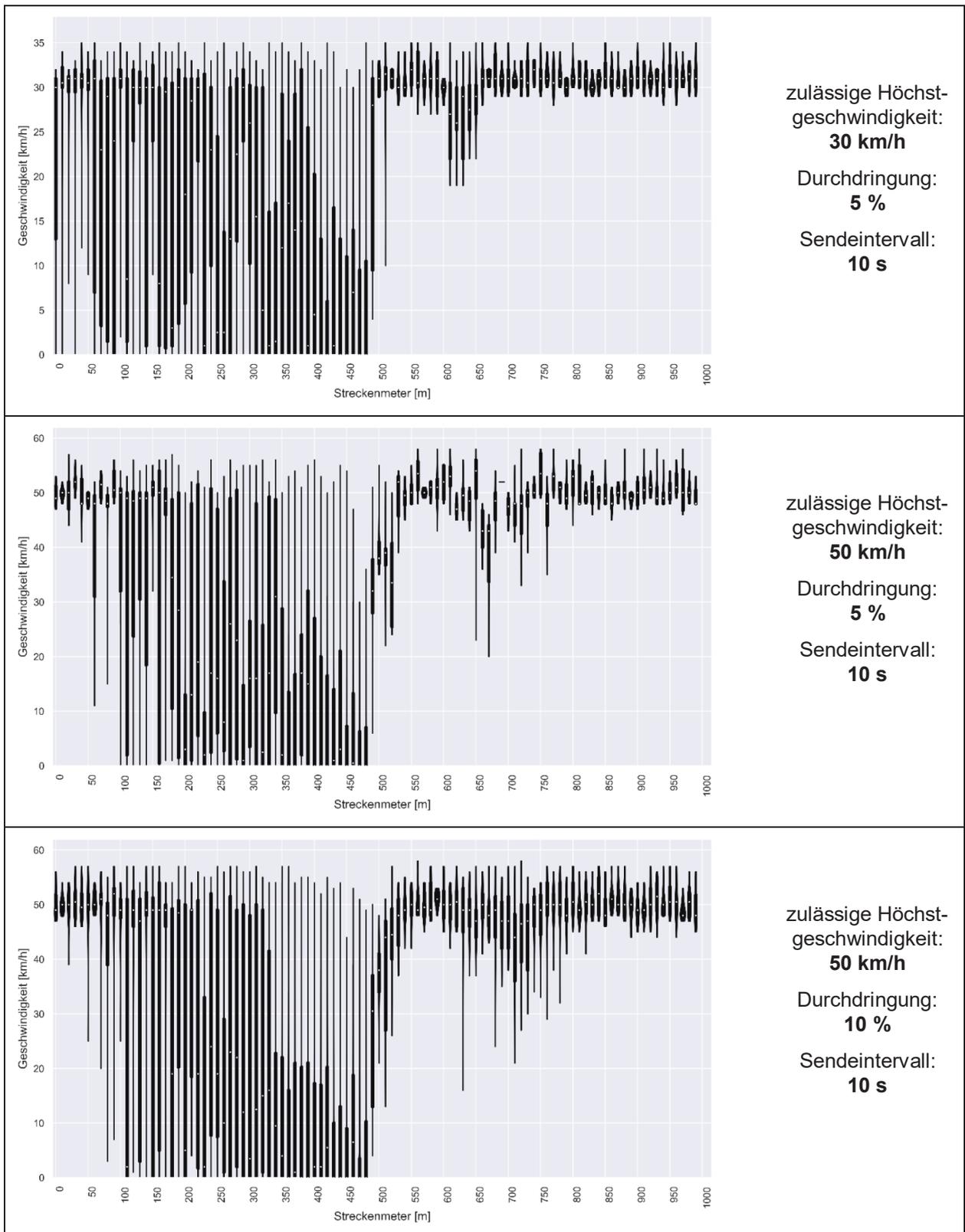


Bild 6-3: Beispieldiagramme (Violin-Diagramme), Laborbeispiel Knotenpunkt mit LSA, verschiedene Parameter

Laborbeispiel	Filterung (Durchsetzungsrate, Meldeintervall)	Punktendiagramm				Weg-Zeit-Diagramm				Heatmap				Violinplot			
		Dichte		Geschwindigkeit (+ Dichte)		Trajektorien		Punkte mit Geschwindigkeit		Geschwindigkeit berechnet		Geschwindigkeit vorhanden		Geschwindigkeit berechnet		Geschwindigkeit vorhanden	
		Ost- West	West- Ost	Ost- West	West- Ost	Ost- West	West- Ost	Ost- West	West- Ost	Ost- West	West- Ost	Ost- West	West- Ost	Ost- West	West- Ost	Ost- West	West- Ost
ÖV	100 %, 1 s					zu viele Daten								nicht erstellbar			
	10 %, 5 s	rot	rot							orange	orange						
	10 %, 10 s	rot	rot							orange	orange						
	10 %, 15 s	rot	rot							orange	orange						
	5 %, 5 s	rot	rot							orange	orange						
	5 %, 10 s	rot	rot							orange	orange						
	5 %, 15 s	rot	rot							orange	orange						
	2 %, 5 s	rot	rot							orange	orange						
	2 %, 10 s	rot	rot							orange	orange						
2 %, 15 s	rot	rot							orange	orange							
Knotenpunkt vorfahr geregelt	100 %, 1 s					zu viele Daten								nicht erstellbar			
	10 %, 5 s																
	10 %, 10 s																
	10 %, 15 s																
	5 %, 5 s	orange															
	5 %, 10 s	orange															
	5 %, 15 s	orange															
	2 %, 5 s	orange	orange														
	2 %, 10 s	orange	orange														
2 %, 15 s	orange	orange															
Knotenpunkt LSA	100 %, 1 s					zu viele Daten								nicht erstellbar			
	10 %, 5 s																
	10 %, 10 s																
	10 %, 15 s																
	5 %, 5 s																
	5 %, 10 s	orange															
	5 %, 15 s	orange															
	2 %, 5 s																
	2 %, 10 s																
2 %, 15 s																	
Fußgänger- überweg	100 %, 1 s					zu viele Daten								nicht erstellbar			
	10 %, 5 s	orange	orange														
	10 %, 10 s	rot	orange							orange							
	10 %, 15 s	rot	orange							orange							
	5 %, 5 s	rot	orange							orange							
	5 %, 10 s	rot	orange							orange							
	5 %, 15 s	rot	orange							orange							
	2 %, 5 s	rot	orange							orange							
	2 %, 10 s	rot	orange							orange							
2 %, 15 s	rot	orange							orange								
Parken	100 %, 1 s					zu viele Daten								nicht erstellbar			
	10 %, 5 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
	10 %, 10 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
	10 %, 15 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
	5 %, 5 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
	5 %, 10 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
	5 %, 15 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
	2 %, 5 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
	2 %, 10 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange				
2 %, 15 s	rot	rot	orange						rot	rot	orange	orange					

Bild 6-4: Visuelle Erkennbarkeit von Störungen in verschiedenen Diagrammarten bei verschiedenen Durchdringungsgraden und Meldeintervallen (grün = gut erkennbar, orange = im Ansatz erkennbar, rot = nicht erkennbar)

Man erkennt in dieser Zusammenstellung, dass Violinplots die beste visuelle Erkennbarkeit von Störungen bieten. Mit ihnen waren in fast allen Fällen die Störungen gut erkennbar, auch bei geringen Durchsetzungsgraden und langen Meldeintervallen. Ebenfalls ist erkennbar, dass Störungen durch ÖV, Parken und Fußgängerüberwege deutlich schlechter erkennbar sind als Störungen durch Knotenpunkte, was zeigt, dass die Störungsauswirkungen von ÖV, Parken und Fußgängerüberwegen auf die Fahrtzeiten viel geringer sind als die von Knotenpunkten.

6.1.3 Quantitative Störungserkennung in den Laborbeispielen

Zusätzlich zur visuellen, qualitativen Beurteilung soll auch eine quantitative Betrachtung möglich sein. Eine Quantifizierung der Qualität des Verkehrsablaufs für Netzabschnitte ist, wie in Kapitel 5.1 bereits vorgestellt, im HBS (FGSV 2015) in Form des Fahrtgeschwindigkeitsindex I enthalten. Er ergibt sich als Verhältnis der angestrebten (V_a) zu der zu erwartenden (V_e) mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf dem Netzabschnitt in der Bemessungsstunde. Wie ebenfalls im Kapitel 5.1 ausgeführt, unterliegt die Anwendbarkeit des HBS-Verfahrens mehreren Einschränkungen. Deshalb soll im Folgenden für die Simulationsstudie ein einfacher quantitativer Störungsindikator auf der Basis von FC-Daten verwendet werden, dessen Anwendung weniger Einschränkungen unterliegt.

Wie z. B. in den Violinplots gut erkennbar ist, kann man drei verschiedene Störungszustände unterscheiden, die durch die Störfallkennzahl abgrenzbar sein sollen:

- Dauerhaft hohe Geschwindigkeiten → Keine Störung
- Eine Mischung aus hohen und niedrigen Geschwindigkeiten → zeitweise Störungen
- Dauerhaft niedrige Geschwindigkeiten → Dauernde Störung

Werden dauerhaft hohe Geschwindigkeiten gemessen, liegt keine oder vernachlässigbar selten eine Störstelle vor. Dagegen lassen Abschnitte mit nahezu dauerhaft niedrigen Geschwindigkeiten auf andauernde Störstellen schließen. Zeigen Abschnitte eine Mischung aus hohen und niedrigen Geschwindigkeiten, liegt eine Störstelle, die zu einem Einbruch der Geschwindigkeiten führt, lediglich zu gewissen Zeiten oder bei Eintreten bestimmter Umstände vor.

Angelehnt an die Arbeiten von BAWIDAMANN et al. (2020a und 2020b) wird für die folgenden Arbeiten eine Störfallkennzahl entwickelt. In BAWIDAMANN et al. (2020b) wird ein sogenannter Unzuverlässigkeitsindex definiert, der die Breite der Fahrtzeitverteilung beschreibt, wobei die jeweils 10 % schnellsten und langsamsten Fahrzeuge sowie der Median betrachtet werden. Diese Überlegungen werden für die Definition einer Störfallkennzahl übernommen, wobei statt der Fahrtzeiten hier Geschwindigkeiten verwendet werden. Unverändert bleibt die Betrachtung des Medians (p_{50}) und der Perzentile bei 10 % (p_{10}) und 90 % (p_{90}):

$$\text{Störfallkennzahl} = \frac{p_{90} - p_{10}}{p_{50}}$$

Je höher die Störfallkennzahl, desto wahrscheinlicher liegt eine Störstelle vor. Eine Schwachstelle dieser Störkennzahl ist, dass lediglich die Breite der Geschwindigkeitsverteilung eingeht, nicht die absolute Höhe der Geschwindigkeiten. Bei einem Streckenabschnitt, in dem über alle Fahrten hinweg eine niedrige Geschwindigkeit herrscht, liegen die 10 %-, 50 %- und 90 %-Perzentile nah beieinander und die Störfallkennzahl fällt klein aus, obwohl eigentlich eine andauernde Störung vorliegt. Zur Milderung dieses Problems kann die Störfallkennzahl um einen Faktor erweitert werden, der zusätzlich die Differenz des Medians zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} bzw. einer planerisch intendierten Geschwindigkeit berücksichtigt. Diese Erweiterung kann nur eingesetzt werden, wenn diese Referenzgeschwindigkeit bekannt ist.

Damit ergibt sich als erweiterte Störfallkennzahl

$$\text{Störfallkennzahl} = \frac{p_{90} - p_{10}}{p_{50}} \cdot \frac{v_{zul}}{p_{50}}$$

Die so definierte Störfallkennzahl wurde für alle Laborbeispiele und Parameterkombinationen berechnet. Für eine mit der visuellen Inspektion vergleichbare Darstellung wurden zusätzlich drei Störungsgrade festgelegt:

Störfall liegt nicht vor:	$\text{Störfallkennzahl} < 1,0$
Störfall liegt manchmal vor:	$1,0 \leq \text{Störfallkennzahl} < 2,0$
Störfall liegt vor:	$\text{Störfallkennzahl} \geq 2,0$

Die Störfallkennzahlen aller Simulationsfälle der Laborbeispiele sind in Bild 6-5 zusammenfassend dargestellt. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu erreichen, sind lediglich die Streckenmeter 100 m bis 520 m abgebildet. Zusätzlich sind die drei Störungsgrade farblich von grün für „keine Störung“ über orange bis rot für „andauernde Störung“ markiert. Die Fahrtrichtungen der Laborbeispiele unterscheiden sich in der Verkehrsbelastung.

Bei Betrachtung der Störfallkennzahlen über alle Laborbeispiele sind vor allem die großen Rückstaus der beiden Knotenpunktmodelle auffällig, wobei der signalisierte gegenüber dem vorfahrtgeregelten Knotenpunkt häufiger höhere Störfallkennzahlen aufweist. Ebenfalls ist die Auflösung der Rückstaus bei Entfernung von der Störstelle stromaufwärts erkennbar. Auch beim Laborbeispiel ÖV sind Verringerungen der Geschwindigkeiten weit vor der Störstelle sichtbar. Im Gegensatz dazu ist beim Laborbeispiel Fußgängerüberweg nahezu kein Rückstau erkennbar. Die unterschiedliche Schwere der Störung liegt daran, dass die ÖV-Fahrzeuge nicht nur an der Haltestelle anhalten, sondern auch eine im Vergleich zu den Pkw geringere Beschleunigung aufweisen und langsamer fahren. An einem Fußgängerüberweg wird vergleichsweise weniger lange angehalten, weshalb eher viele kurze Störungen entstehen. Die Störstelle Parken ist mit der Störfallkennzahl nicht zu detektieren.

Bemerkenswert ist, dass selbst beim niedrigsten Durchdringungsgrad in Kombination mit der geringsten Meldefrequenz (2 %, 15 s) noch eine aussagekräftige Detektion möglich ist, sofern die Störung überhaupt, also mit Vollausrüstung (100 %, 1 s), detektierbar ist.

Bestätigt werden auch die Ergebnisse des Schweizer Forschungsprojekts (BUNDESAMT FÜR STRASSEN, 2022), dass ÖV-Halte, Fußgängerüberwege und Parken am Straßenrand keine bewertungsrelevanten Störungen verursachen, vor allem nicht im Vergleich zu Wartezeiten an Knotenpunkten.

7 Netzweite Mängelanalyse

Bisher wurde dargestellt, wie für einen gegebenen Netzabschnitt mit Hilfe von Floating-Car-Daten die Verkehrsqualität beurteilt werden kann. Im folgenden Kapitel wird die Betrachtung ausgeweitet auf das gesamte Straßennetz einer Stadt. Das Ziel dabei ist, automatisch die Netzabschnitte zu finden, auf denen keine zufriedenstellender Verkehrsablauf gegeben ist.

Sowohl das HBS (FGSV 2015) als auch die RIN (FGSV 2008) beziehen sich bei der Bewertung eines Netzabschnittes auf die mittlere Pkw-Fahrtzeit. Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt, kann dieser Indikator bei einem ausreichenden Durchdringungsgrad zuverlässig aus Floating-Car-Daten bestimmt werden. Darüber hinaus sind aber auch weitere Indikatoren sinnvoll, die zum Beispiel die Schwankungen der Fahrtzeiten abbilden, um Aussagen über die Zuverlässigkeit des Netzabschnitts zu machen. Für solche Indikatoren werden in BAWIDAMANN et al. (2020b) Vorschläge gemacht, die hier aufgegriffen werden.

Gegenüber der Aufgabe, FC-Daten für die Bewertung eines einzelnen Netzabschnitts nach HBS zu verwenden, sind bei der netzweiten Mängelanalyse zwei weitere technische Aspekte zu beachten: Zum einen sollen alle Netzabschnitte eines städtischen Straßennetzes automatisch auf der Basis digitaler Straßenkarten identifiziert werden und zum anderen stellt eine effiziente netzweite Betrachtung andere Anforderungen an die zu beschaffenden FCD. Auf beide Aspekte wird weiter unten in eigenen Unterkapiteln eingegangen.

Der hier vorgeschlagene Ablauf sieht insgesamt so aus:

1. Beschaffung eines Netzmodells für die zu untersuchende Stadt; in der Regel kann ein Netz kostenfrei aus OpenStreetMap importiert werden.
2. Automatische Identifikation von Netzabschnitten in diesem Netzmodell anhand von Streckenattributen, die eine Kategorisierung zulassen, durch einen Algorithmus.
3. Berechnung der Fahrzeitverteilungen für die Netzabschnitte aus FC-Daten.
4. Berechnung eines Störungsindikators für jeden Netzabschnitt aus der Fahrzeitverteilung und eventuell weiteren Attributen der enthaltenen Strecken.

7.1 Bewertung von Netzabschnitten in den RIN

Die RIN machen Zielvorgaben für die auf einem Netzabschnitt im gemäß dem im HBS definierten Bemessungszeitraum angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit. Diese Zielvorgaben sind in den RIN in Abhängigkeit von der Straßenkategorie als Bandbreite ausgewiesen; sie beinhalten auch die notwendigen Wartezeiten an Knotenpunkten.

Die in den RIN ursprünglich vorgegebenen angestrebten mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten (Tabelle 7.1) wurden aufgrund der Erkenntnisse aus den Untersuchungen von BAIER et al. (2015) sowie BAIER & HARTKOPF (2015) – die auch die Grundlage für das Verfahren zur übergreifenden Bewertung von Netzabschnitten im HBS darstellen (siehe Abschnitt 5.1.3) – zwischenzeitlich durch eine Korrektur zu den RIN angepasst (Tabelle 7.2).

Straßenkategorie	Standard-Entfernungsbereich ¹⁾ [km]	V _{F,N,Ziel} ²⁾ [km/h]
AS 0/I Fernautobahn	40 – 500	100 – 120
AS II Überregionalautobahn, Stadtautobahn	10 – 70	70 – 90
LS I Fernstraße	40 – 160	80 – 90
LS II Überregionalstraße	10 – 70	70 – 80
LS III Regionalstraße	5 – 35	60 – 70
LS IV Nahbereichsstraße	bis 15	50 – 60
LS V Anbindungsstraße	–	keine
VS II anbaufreie Hauptverkehrsstraße	–	40 – 60
VS III anbaufreie Hauptverkehrsstraße	–	30 – 50
HS III Ortsdurchfahrt, innergemeindliche Hauptverkehrsstraße	–	20 – 30
HS IV Ortsdurchfahrt, innergemeindliche Hauptverkehrsstraße	–	15 – 25
ES IV Sammelstraße	–	keine
ES V Anliegerstraße	–	keine

¹⁾ Außerhalb bebauter Gebiete wird die V_{F,N,Ziel} auch von dem für die Verbindungsfunktion maßgebenden Entfernungsbereich bestimmt; liegt die Entfernung an der oberen Grenze des Standard-Entfernungsbereichs, ist im Allgemeinen die höhere Geschwindigkeit anzustreben, liegt die Entfernung an der unteren Grenze, so genügt die niedrigere Geschwindigkeit.

²⁾ Die V_{F,N,Ziel} bezieht sich auf die mittlere Fahrtgeschwindigkeit der Pkw.

Tabelle 7.1: Angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten des Kfz-Verkehrs in Abhängigkeit der Straßenkategorie gemäß den RIN (FGSV 2008)

Kategoriengruppe		Kategorie		Standard-entfernungsbereich [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	–		

Tabelle 7.2: Angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten des Kfz-Verkehrs in Abhängigkeit der Straßenkategorie gemäß der Änderung zur RIN (FGSV 2008) vom Mai 2015

7.2 Indikatoren für Störungen im Verkehrsablauf

Im Rahmen der stadtweiten Mängelanalyse sollen automatisch kritische Netzabschnitte in der Stadt identifiziert werden, die dann einzeln detaillierter untersucht werden können. Die Einstufung eines Netzabschnitts als kritisch kann anhand verschiedener Indikatoren geschehen, die zum Großteil aus der Verteilung der Fahrtzeiten abgeleitet werden. Ein solcher Indikator ist zum Beispiel die im Kapitel 6.1.3 eingeführte Störfallkennzahl. Ausführlich untersucht wurden solche Indikatoren bei BAWIDAMANN et al. (2020a) und BAWIDAMANN et al. (2020b). Eine zusammenfassende Darstellung der Indikatoren, die aus diesen Arbeiten entnommen sind, ist in Tabelle 7.3 wiedergegeben.

KPI	Einheit	Berechnungsvorschrift	Bedeutung
KPI ohne Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage			
Fahrtgeschwindigkeitsindex nach HBS	[-]	$f_{si}^{VF} = \frac{l_s / t_{si}^{Mean}}{v^{Target}}$	v^{Target} aus HBS Tabelle S6-5
Fahrtzeitindex	[-]	$f_{si}^{TII,P50} = \frac{t_{si}^{P50}}{MIN_{i \in I}(t_{si}^{P50})}$	beschreibt die bei regelmäßigen Störungen üblicherweise zu erwartende Fahrtzeitverlängerung „planmäßige oder regelmäßige Verlustzeit“
Zuverlässigkeitsindex bezogen auf ein Perzentil	[-]	$f_{si}^{RI,P90} = \frac{t_{si}^{P90}}{t_{si}^{P50}}$	beschreibt die bei unregelmäßigen Störungen zu erwartende Fahrtzeitverlängerung „unplanmäßige Verlustzeit“
Zuverlässigkeitsindex bezogen auf den Mittelwert	[-]	$f_{si}^{RI,Mean} = \frac{t_{si}^{Mean}}{t_{si}^{P50}}$	beschreibt das Verhältnis von typischer und mittlerer Fahrtzeit
Pünktlichkeitsindex	[-]	$f_{si}^{PI,WT} = \frac{\sum_{i \in I} f(t_{si}^{Curr}, t_s^{Target})}{I}$ $f(t_i^{Curr}, t^{Target}) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } t_i^{Curr} \leq t^{Target} \\ 0, & \text{wenn } t_i^{Curr} > t^{Target} \end{cases}$	beschreibt die Verfügbarkeit der Verkehrsanlagen (Betriebersicht)
KPI mit Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage			
Verkehrsleistung	[Fz·km]	$L_{si} = l_s \cdot q_{si}$	quantifiziert die Verkehrsnachfrage
Verkehrszeitaufwand bei Soll-Geschwindigkeit	[Fz·h]	$T_{si}^{Target} = t_s^{Target} \cdot q_{si}$ $= MIN_{i \in I}(t_{si}^{P50}) \cdot q_{si}$	quantifiziert den theoretischen Zeitaufwand bei normalem Verkehrsfluss
Verkehrszeitaufwand bei Ist-Geschwindigkeit	[Fz·h]	$T_{si}^{Curr} = t_{si}^{Curr} \cdot q_{si} = t_{si}^{Mean} \cdot q_{si}$	quantifiziert den mittleren Zeitaufwand
Verlustzeitaufwand	[Fz·h]	$T_{si}^{Delay} = T_{si}^{Curr} - T_{si}^{Target}$	quantifiziert die „Stauzeiten“ (Nutzersicht)
Verlustzeit pro Kilometer	[s/km]	$t_{si}^{DelayKm} = \frac{T_{si}^{Delay}}{L_{si}}$	normiert die Verlustzeit für einen Vergleich von Verkehrsanlagen unterschiedlicher Länge
$i \in I$	Menge I der Zeiträume i eines Tages (oder eines längeren Untersuchungszeitraums)		
Index s	Strecke oder Netzabschnitt		
l	Länge oder Netzabschnitt		
q	Verkehrsstärke oder Hits		

Tabelle 7.3: Störungsindikatoren („KPI“ = „Key Performance Indicators“) aus BAWIDAMANN (2020b)

In Tabelle 7.3 wird danach unterschieden, ob Information über die Verkehrsbelastung der Strecken in die Indikatoren einbezogen werden kann oder nicht. Bei ausschließlicher Nutzung von FCD sind die Verkehrsbelastungen nicht zuverlässig ermittelbar, weshalb sich nur die Indikatoren aus der oberen Tabellenhälfte anbieten. Die meisten verwendeten Größen sind in der Fahrtzeitverteilung enthalten (50 %- und 90 %-Perzentile ($p50$, $p90$), Mittelwert ($Mean$)), einige zusätzliche werden benötigt, um einen Bezug zur planerisch gewünschten Situation herzustellen („ $Target$ “).

Die im Folgenden dargestellte Methode zur stadtweiten Mängelanalyse ist vom Ablauf her nicht von einer bestimmten Definition der Störungsindikatoren abhängig. Beachtet werden muss allerdings, dass nur Indikatoren verwendet werden können, für die alle benötigten Ausgangsgrößen entweder aus der Fahrzeitverteilung gewonnen werden können (im Wesentlichen die Perzentile der Verteilung) oder in dem zu Grunde gelegten digitalen Straßennetzmodell enthalten sind (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen).

7.3 Automatische Identifikation von Netzabschnitten in einer Stadt

Ein Netzabschnitt ist definiert als „Teil eines Verkehrsweges zwischen zwei Knotenpunkten, in denen dieser mit anderen Verkehrswegen der gleichen oder einer höheren Verbindungsfunktionsstufe verknüpft wird“ (Begriffsbestimmungen der FGSV 2020). Im Stadtstraßennetz besteht ein Netzabschnitt also aus einer Abfolge von Strecken der gleichen Straßenkategorie zwischen Knotenpunkten mit Strecken der gleichen oder höheren Kategorie.

Für die stadtweite Mängelanalyse müssen alle Netzabschnitte im Sinn dieser Definition im Straßennetz der Stadt identifiziert werden. Im Folgenden wird dafür eine algorithmische Lösung beschrieben, die als Ausgangspunkt ein digitales Straßennetzmodell der Stadt benötigt. Im Zusammenhang mit einem solchen digitalen Straßennetz wird im weiteren Text der Begriff „Link“ verwendet für Straßenabschnitte, die durch das im jeweiligen Kontext verwendete Netzmodell als kleinste Einheit vorgegeben werden. Bei FCD-Anbietern, die aggregierte Daten liefern, ist die Netzbasis meist ein eigenes Netzmodell (Beispiel FCD-Anbieter 4). Bei FC-Rohdaten ohne Map-Matching ist kein Netzbezug erforderlich. Manche Anbieter bieten auch für FC-Rohdaten ein Map-Matching an, wobei dann meistens das frei verfügbare Straßennetzmodell aus OpenStreetMap (OSM) die Basis ist (Beispiel FCD-Anbieter 6).

Um Netzabschnitte in einem Straßennetzmodell automatisch bestimmen zu können, muss an den Links des Netzes ein Attribut verfügbar sein, das die Straßenkategorie angibt. Im Straßennetzmodell eines Verkehrsplanungsmodells liegt in der Regel mindestens eine Typisierung der Straßen vor. In den Straßennetzmodellen verschiedener Anbieter von Verkehrsinformation wird ebenfalls in der Regel eine Art Kategorie der Straße angegeben. Beim FCD-Anbieter 4 zum Beispiel enthält das Netz ein Attribut „Functional Road Class“, das quasi die Kategorisierung darstellt. Im Straßennetzmodellen von OpenStreetMap gibt es ein Attribut „highway“, das als Kategorisierung verwendet werden kann. Es entspricht aufgrund der internationalen Ausrichtung von OSM nicht direkt einer offiziellen deutschen Straßenkategorisierung; für die automatische Mängelanalyse erscheint das aber auch nicht notwendig.

Aufgrund der freien Verfügbarkeit und der hohen räumlichen Abdeckung wird auch in den folgenden beispielhaften Anwendungen das OSM-Netz verwendet. Das entwickelte Verfahren zur automatischen Identifikation von Netzabschnitten ist aber auf andere Netzmodelle übertragbar, solange sie ein Attribut zur Kategorisierung enthalten und aus Knoten und Kanten aufgebaut sind.

Die automatische Identifikation von Netzabschnitten geschieht im Wesentlichen durch folgenden Algorithmus:

- Zu Beginn gibt es noch keine Netzabschnitte und alle Links des Netzes sind noch keinem Netzabschnitt zugeordnet.
- Wiederhole die folgenden Schritte, bis jeder Link einem Netzausschnitt zugeordnet ist:
 - o Wähle zufällig einen Link aus, der noch keinem Netzausschnitt zugeordnet ist.
 - o Erzeuge einen neuen Netzausschnitt und ordne den Link diesem Netzausschnitt zu.
 - o Erweitere von diesem Link aus den Netzabschnitt jeweils in und gegen die Fahrtrichtung, bis zum ersten Knoten, an dem Links der gleichen oder höheren Kategorie kreuzen.
 - o Damit ist der neue Netzabschnitt erkannt und abgegrenzt; das Verfahren wird fortgesetzt mit dem nächsten, nicht zugeordneten Link.

Im Detail sind während des Durchlaufs einige Sonderbehandlungen notwendig. Zum Beispiel muss erkannt werden, dass der Übergang von richtungsgetreuten Fahrbahnen zu einer gemeinsamen Fahrbahn und umgekehrt keinen neuen Netzabschnitt begründet, obwohl an den Übergangsstellen formal das Netzmodell einen Knoten mit gleichrangigen Links enthält. Mit Hilfe einer Analyse der Geometrie der Links sind diese Fälle aber gut behandelbar.

Im OSM-Netz der Stadt Karlsruhe liefert dieses Verfahren plausible und intuitive Ergebnisse, von denen einige beispielhaft in der Bild 7-1 dargestellt werden.

7.4 Berechnung der Fahrzeitverteilung und von Störungsindikatoren aus FCD

Die folgenden Betrachtungen werden am Beispiel der Städte Karlsruhe und Hannover illustriert. Grundlage der verschiedenen Auswertungen sind mehrere Arten von FC-Daten: FC-Rohdaten ohne Map-Matching für einen Monat (September 2021) von FCD-Anbieter 6, FC-Rohdaten mit OSM-Map-Matching für einen Monat (September 2021) von FCD-Anbieter 3 und aggregierte Daten auf Straßenabschnitten des Anbieter-eigenen Straßennetzes für einen Monat (Januar 2021) von FCD-Anbieter 4.

7.4.1 Fahrtzeiten aus aggregierten Daten (FCD-Anbieter 4)

Die aggregierten Daten des FCD-Anbieters 4 enthalten Fahrzeitverteilungen in 5 %-Schritten für jeden Link sowie verschiedene Zusatzinformationen über den Link (Road Class, zulässige Höchstgeschwindigkeit). Damit können die meisten Störungsmaße auf Linkebene berechnet werden, wodurch diese Datenart für die Mängelanalyse zunächst prädestiniert scheint. Beispielhaft wird deshalb ein Störungsmaß auf einzelne Links angewendet und das Ergebnis visualisiert. Weiter unten wird später dargestellt, dass der Übergang von einzelnen Links zu Netzabschnitten methodisch problematisch ist.

Das technische Vorgehen bei der Nutzung der Daten des FCD-Anbieters 4 besteht darin, dass in der Verkehrsanalyse-App des Anbieters (Webseite) ein Report generiert wird, der räumlich das Stadtgebiet, alle Functional Road Classes und alle Werktage des Monats umfasst. Der Report wird dann exportiert als Shapefile oder JSON-Datensatz, wodurch er z.B. in freie GIS-Werkzeuge (z.B. QGIS) eingelesen oder mit Python-Skripten weiterverarbeitet werden kann.

Anwendung von Störungsmaßen auf Link-Ebene

Als Beispiel für eine Anwendung auf Link-Ebene wird das Störungsmaß SI , das in Kapitel 6.1.3 für Streckenzüge anhand von Simulation und synthetischen FCD entwickelt wurde, auf die einzelnen Links übertragen. Der Störungsindikator ist so konstruiert, dass es eine Störung anzeigt, wenn auf einer Strecke sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten gefahren werden oder wenn die gefahrenen Geschwindigkeiten deutlich unter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegen. Er wird auf der Basis von drei Perzentilen der Geschwindigkeitsverteilung (10 %, 50 %, 90 %) und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach der Formel

$$SI = \frac{p90 - p10}{p50} \cdot \frac{v_{zul}}{p50}$$

berechnet. (Dieser Störungsindex ist hier nur beispielhaft zu verstehen; die Aufbereitungs- und Auswertemethodik ist von der konkreten Ausprägung unabhängig, solange keine weiteren Informationen als die Fahrzeitverteilung benötigt werden.)

Die Anwendung auf Link-Ebene liefert für die Gesamtstadt zunächst ein überraschendes Bild, zu erkennen in Bild 7-2. Im Beispiel Karlsruhe wird die Südtangente, eine autobahnartig ausgebaute Ost-West-Verbindung, durchgängig grün (kaum Störungen) dargestellt, wohingegen die ganzen Wohngebiete orange (mittlere Störungen) eingefärbt werden. Mikroskopisch betrachtet funktioniert das Störungsmaß aber richtig, denn z. B. Links vor Signalanlagen werden rot dargestellt (starke Störungen). Der Grund für das Ansprechen der Störungsindikation ist bei den Wohngebieten, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit insbesondere in Tempo-30-Zonen in der Regel nicht erreicht wird und eigentlich auch nicht die planerisch angemessene Geschwindigkeit ist. Falls tatsächlich auch Aussagen auf den niedrigen Straßenkategorien (Wohnstraßen etc.) generiert werden sollen, muss entweder die zulässige Höchstgeschwindigkeit durch eine planerisch angemessene Geschwindigkeit ersetzt werden, was dann aber zusätzlichen Versorgungsaufwand darstellt, oder es wird eine Variation des Störungsindikators verwendet, bei der das Verhältnis von zulässiger Geschwindigkeit zu Median weggelassen wird. Das Ergebnis dieser Variation ist in Bild 7-3 dargestellt.

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden nur noch die höher kategorisierten Straßen berücksichtigt, da typischerweise eine Mängelanalyse für diese Straßen besonders interessant ist.



Bild 7-2: Störungsindikator aus Geschwindigkeitsverteilungen auf Linkbasis für Karlsruhe mit Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. (grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)



Bild 7-3: Störungsindikator aus Geschwindigkeitsverteilungen auf Linkbasis für Karlsruhe ohne Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. (grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)

Übergang von der Link-Ebene zu Netzabschnitten

Die meisten Störungsindikatoren erfordern die Kenntnis bestimmter Perzentile der Fahrzeit- oder Geschwindigkeitsverteilung. Wie oben dargestellt, werden bei aggregierten FC-Daten diese Perzentile vom FCD-Anbieter bereitgestellt, in der Regel für jeden einzelnen gelieferten Link.

Bei der Zusammenfassung der für einzelnen Links vorliegenden Informationen zu einer Aussage für einen Netzausschnitt, der sich aus diesen Links zusammensetzt, treten zwei methodische Probleme auf:

Das erste Problem entsteht durch die Vermischung von verschiedenen Abbiegeströmen vor Knotenpunkten in einem Link. Abhängig von der im Netzmodell hinterlegten Topologie kann es sein, dass zum Beispiel rückgestaute Abbieger und staufreie Geradeausfahrer auf einer mehrstreifigen Zufahrt in eine gemeinsame Erfassung der Fahrzeiten eingehen. Beim Versuch, die Fahrzeiten eines Netzabschnitts aus den Linkfahrzeiten zusammenzusetzen, kann dann der Anteil der zum Netzabschnitt gehörenden Abbiegeströme nicht mehr von den anderen getrennt werden.

Das zweite Problem besteht darin, dass zwar die Mittelwerte der Link-Fahrzeiten zum Mittelwert der Fahrzeit für den Netzabschnitt addiert werden können, das aber nicht für die Perzentile der Verteilung möglich ist. Um die resultierende Fahrzeitverteilung über zwei Links hinweg zu berechnen, für die jeweils die individuelle Fahrzeitverteilung bekannt ist, könnte eine Faltung der beiden Verteilungen berechnet werden. Die Faltung ist aber nur dann die theoretisch richtige Lösung, wenn die beiden Ausgangsverteilungen unabhängig voneinander sind. Das ist bei Fahrzeitverteilungen hintereinanderliegender Straßenabschnitte sicher nicht gegeben, da Verkehrsbelastungen räumlich und zeitlich korreliert sind und sich Stauereignisse systematisch über Links hinweg ausbreiten.

Beim FCD-Anbieter 4, der Fahrzeitverteilungen aus aggregierten FC-Daten anbietet, bietet es sich deshalb an, bei einer zu analysierenden Streckenfolge zu wählen zwischen individuellen Fahrzeitverteilungen der Links und einer Fahrzeitverteilung aus nur den Fahrten, die die gesamte Streckenfolge durchfahren haben. Auch im ersten Fall wird eine Fahrzeitverteilung über die gesamte Streckenfolge ausgegeben, deren Berechnungsgrundlagen allerdings unklar sind. In Bild 7-4 sind die beiden Verteilungen für die Streckenfolge entlang der Untersuchungsstrecke Kriegsstraße in Karlsruhe gegenübergestellt, wobei deutliche Unterschiede zu erkennen sind.

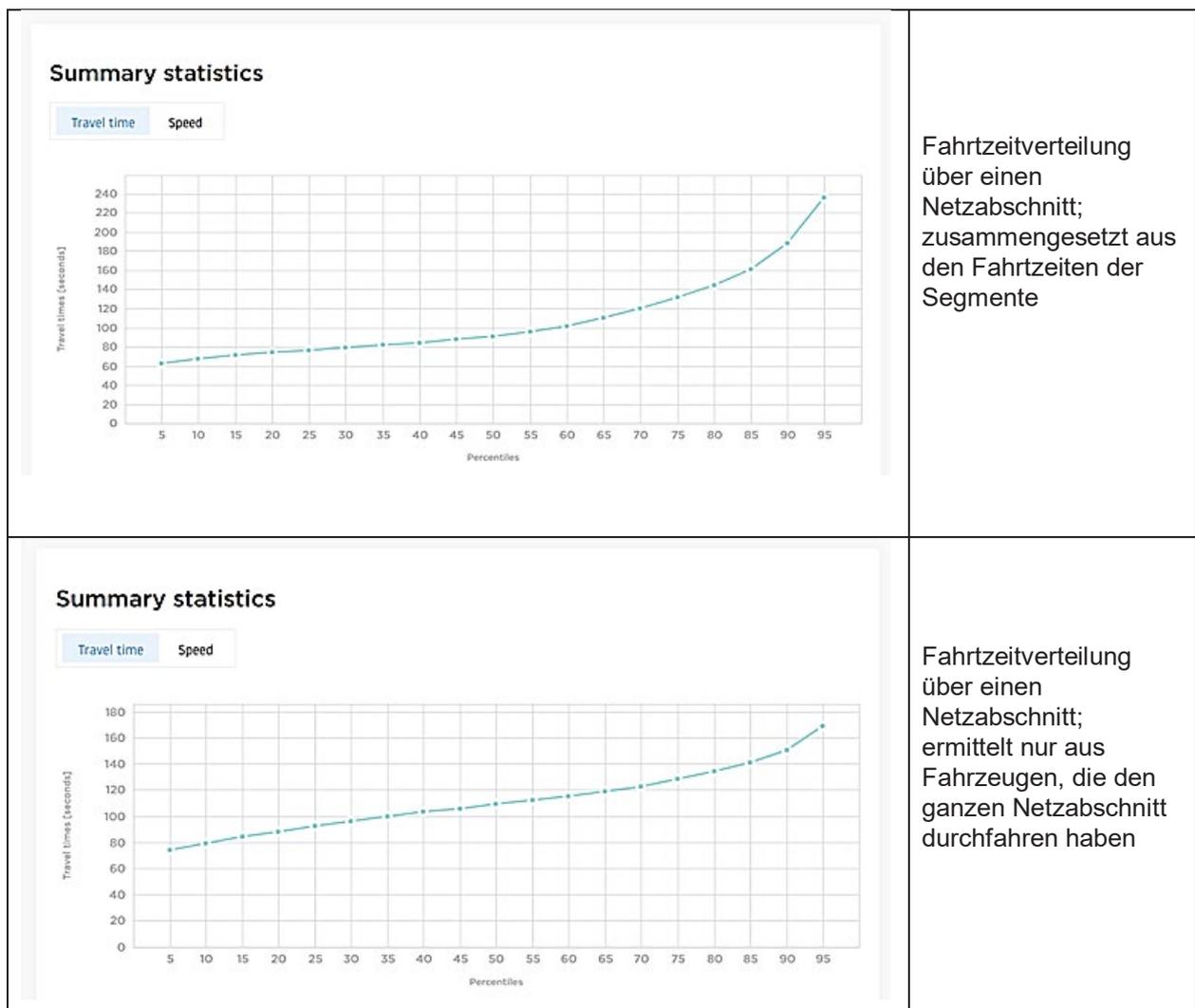


Bild 7-4: Vergleich unterschiedlich ermittelter Fahrtzeitverteilungen für einen Netzausschnitt.
(Quelle: Screenshot Auswertewerkzeug Anbieter 4)

Soll auf der Basis von Netzabschnitten statt von einzelnen Links eine stadtweite Mängelanalyse durchgeführt werden, besteht bei aggregierten FCD das Problem, dass vom Anbieter für viele Netzabschnitte einzeln die Fahrtzeitverteilungen abgerufen werden müssten. Das ist zwar technisch denkbar, allerdings sind die FCD-Anbieter eher darauf eingerichtet, für ein Stadtgebiet die Fahrtzeitinformation für alle enthaltenen Links bereit zu stellen. Die Benutzeroberfläche bei Anbieter 4 erfordert zum Beispiel, für jeden Netzabschnitt einen Report manuell zu definieren und abzurufen; der Abruf der Information für alle Links eines Gebiets kann dagegen in einem gemeinsamen Report geschehen.

Es ist von großer Bedeutung, hier festzuhalten, dass ein naives Zusammenrechnen von Fahrtzeitverteilungen einzelner Links zu einer Fahrtzeitverteilung eines Netzabschnitts bei Indikatoren, die auf Perzentilen der Fahrtzeitverteilung beruhen, zu falschen Ergebnissen führt.

7.4.2 Fahrtzeiten aus FC-Rohdaten (FCD-Anbieter 3 und 6)

Wie im vorhergehenden Abschnitt zur Nutzung aggregierter FC-Information erläutert wird, kann die Fahrtzeitverteilung für einen Netzabschnitt nicht aus den Fahrtzeitverteilungen der Straßenabschnitte berechnet werden, aus denen er sich zusammensetzt. Die korrekte Verteilung kann nur ermittelt werden, in dem die Fahrtzeiten von Fahrzeugen betrachtet werden, die den Netzabschnitt vollständig durchfahren haben. Bei der Nutzung von FC-Rohdaten ist diese Filterung einfach möglich, weil die Trajektorien der Fahrzeuge individuell vorliegen.

Aufwand und Genauigkeit der Fahrzeitbestimmung können noch in bestimmten Grenzen gegeneinander abgewogen werden. Bei FC-Rohdaten ohne Map-Matching kann sehr einfach die Fahrzeit über den Netzabschnitt ermittelt werden, indem wie in Kapitel 2.3.4 dargestellt um den Anfang und das Ende des Netzabschnitts Fangradien angemessener Größe gelegt werden und alle Fahrzeuge in die Fahrzeitauswertung einbezogen werden, die beide Fangradien durchfahren haben. Bei kleinen Fangradien werden bei dieser einfachen Methode nicht alle Fahrzeuge erfasst, die den Netzabschnitt durchfahren, weil insbesondere bei FCD-Anbietern mit niedrigen Meldefrequenzen für manche Fahrzeuge kein Datenpunkt in die Fangradien fällt. Dieser Verlust von Aussagekraft kann vermieden werden, indem man eine etwas aufwändigere Betrachtung der Fahrzeugtrajektorien macht und die FC-Meldepunkte sucht, die am nächsten zum Bezugsquerschnitt (Anfang oder Ende des Netzabschnitts) liegen und eventuell noch dazwischen interpoliert. Solange die FC-Meldepunkte aber nicht auf das Netz gematcht sind, ist bei all diesen einfachen Methoden nicht vollständig sichergestellt, dass ein erfasstes Fahrzeug tatsächlich den Bezugsquerschnitt überfahren hat. Außerdem ist wie bei Erhebungen mit Kennzeichenfassung nicht sichergestellt, dass ein Fahrzeug den Weg über den Netzabschnitt genommen hat, wenn es zwischen den Bezugsquerschnitten mehrere Wege gibt.

Wenn die FC-Rohdaten auf das gleiche Netz gematcht sind, die auch die Basis der Identifikation der Netzabschnitte war, sind beide oben genannten Probleme gelöst. In der gematchten Trajektorie können die Überfahrzeitpunkte der Bezugsquerschnitte relativ genau interpoliert werden. Außerdem kann ein einfacher Filter sicherstellen, dass nur Trajektorien ausgewertet werden, deren Links im Netzabschnitt enthalten sind. Ein Nachteil der Nutzung von Daten mit Map-Matching ist der hohe Rechenaufwand für diese Art der Aufbereitung. Zudem ist auch das Map-Matching nicht frei von Fehlern, d.h. es werden manchmal FC-Meldepunkte nicht auf die tatsächlich befahrenen Links verortet. Dieser Fehler führt bei der Betrachtung von Netzabschnitten aber vor allem dazu, dass einige Trajektorien, die eigentlich den Netzabschnitt überfahren, nicht in die Auswertung einbezogen werden. Der umgekehrte Fall, dass eine Trajektorie fälschlicherweise in die Auswertung fällt, ist bei Netzabschnitten, die aus einer größeren Anzahl von Links bestehen, sehr unwahrscheinlich, weil dazu eine große Anzahl von falsch verorteten Meldepunkten notwendig wäre. Insgesamt betrachtet ist also die Aussagequalität mit Map-Matching höher als ohne, der Aufwand allerdings auch.

Für die in Bild 7-1 beispielhaft dargestellten Netzabschnitte ist die Fahrzeitverteilung aus FC-Rohdaten ohne Map-Matching als kleines Histogramm rechts neben der Karte dargestellt. In Bild 7-5 und Bild 7-6 wird der Störungsindikator SI für alle automatisch erkannten Netzabschnitte in den Städten Karlsruhe bzw. Hannover farblich dargestellt. (Bei Netzabschnitten mit einer Fahrbahn für beide Richtungen wird eine Richtung für die Darstellung zufällig ausgewählt.) Die Berechnung erfolgte dabei auf Basis von FC-Rohdaten ohne Map-Matching von Anbieter 6 für einen Zeitraum von einem Monat.

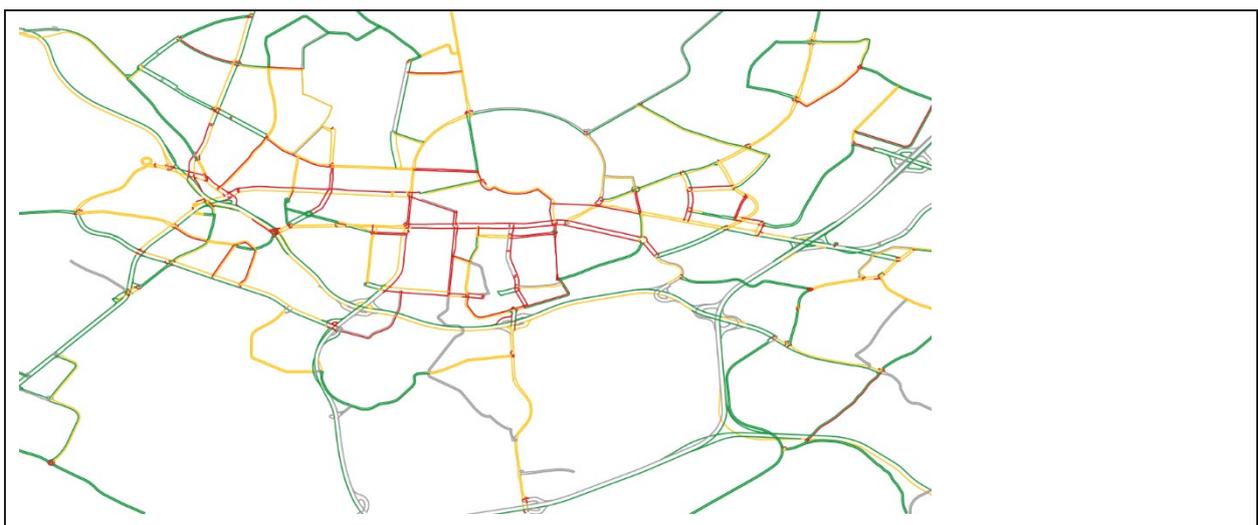


Bild 7-5: Störungsindikator für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Karlsruhe (grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)

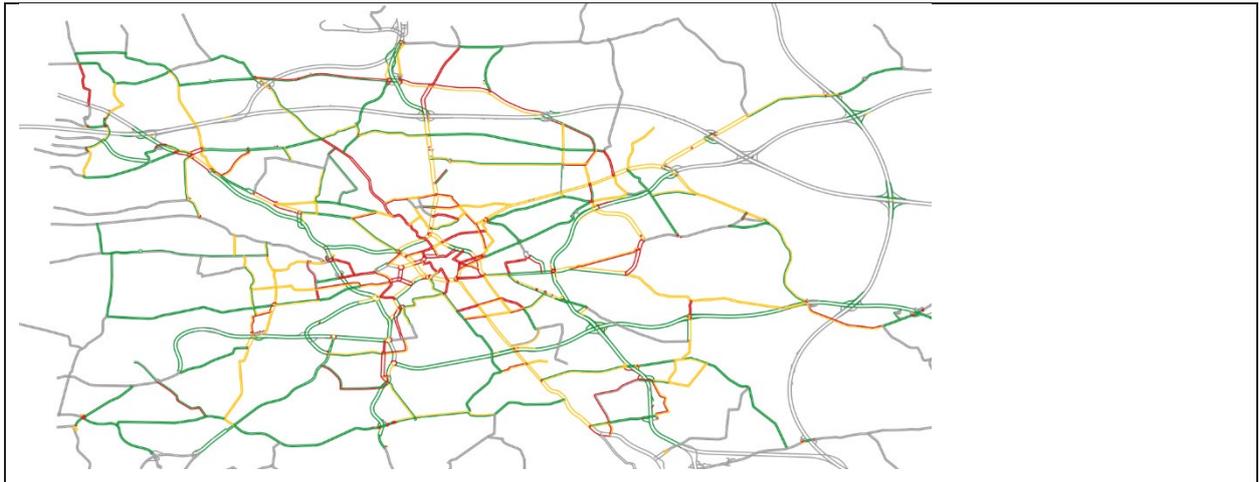


Bild 7-6: Störungsindikator für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Hannover
(grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)

Als weiterer Indikator aus BAWIDAMANN et al. (2020b) wurde der Zuverlässigkeitsindex ZI, bezogen auf das 90 %-Perzentil, für die automatisch identifizierten Netzabschnitte berechnet. Der Zuverlässigkeitsindex ist definiert als Quotient aus dem 90 %- und 50 %-Perzentil der Fahrtzeitverteilung:

$$ZI = \frac{p90}{p50}$$

Schwanken die Fahrtzeiten wenig, d.h. gibt es entweder kaum Störungen ($p90$ und $p50$ sind beide niedrig) oder es gibt dauerhaft Störungen ($p90$ und $p50$ sind beide hoch), so liegt der Zuverlässigkeitsindex nahe eins. Umso höher der Zuverlässigkeitsindex ist, desto stärker schwanken die Fahrtzeiten auf dem Netzabschnitt. Insbesondere stellt der Zuverlässigkeitsindex daher nicht dar, ob es Verkehrsstörungen gibt, sondern ob die Störungen aus Nutzersicht planbar sind. Der Zuverlässigkeitsindex hat dieselbe Aussagekraft wie der von RADDE (2016) verwendete Zeitpufferindex (Buffer Time Index, BTI), normiert mit dem 50 %- Perzentil. Dieser Index basiert auf der Differenz zwischen dem 90 %- und dem 50 %- Perzentil:

$$BTI = \frac{p90 - p50}{p50} = \frac{p90}{p50} - 1 = ZI - 1$$

Bild 7-7 und Bild 7-8 zeigen die Anwendung des Zuverlässigkeitsindex ZI auf die automatisch identifizierten Netzabschnitte der Straßennetze in Karlsruhe und Hannover.

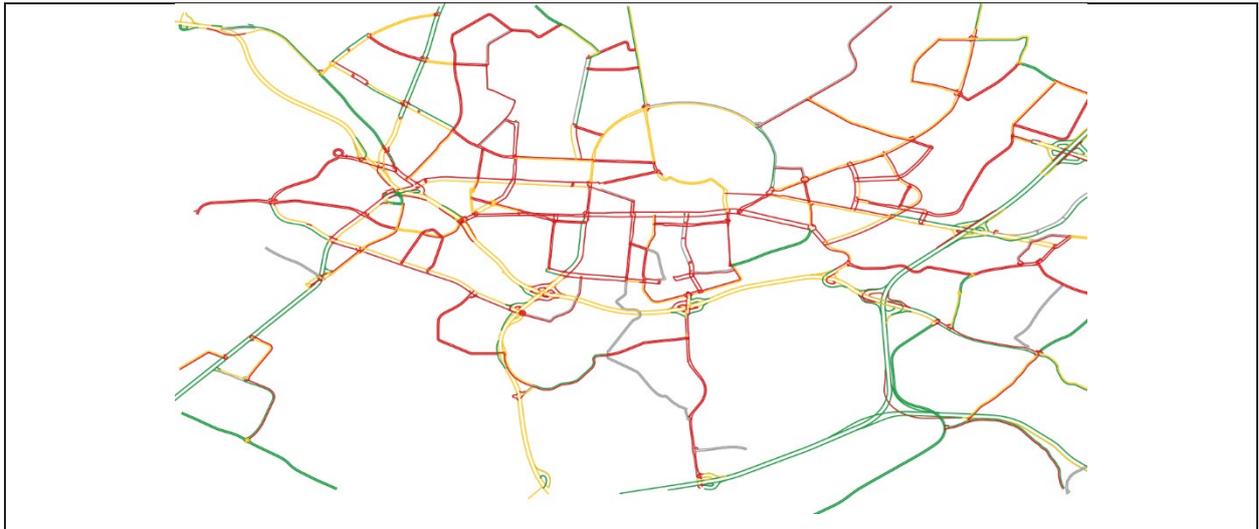


Bild 7-7: Zuverlässigkeitsindex für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Karlsruhe
(grün: $1 \leq ZI \leq 1.5$, gelb: $1.5 < ZI \leq 2$, rot: $ZI > 2$)

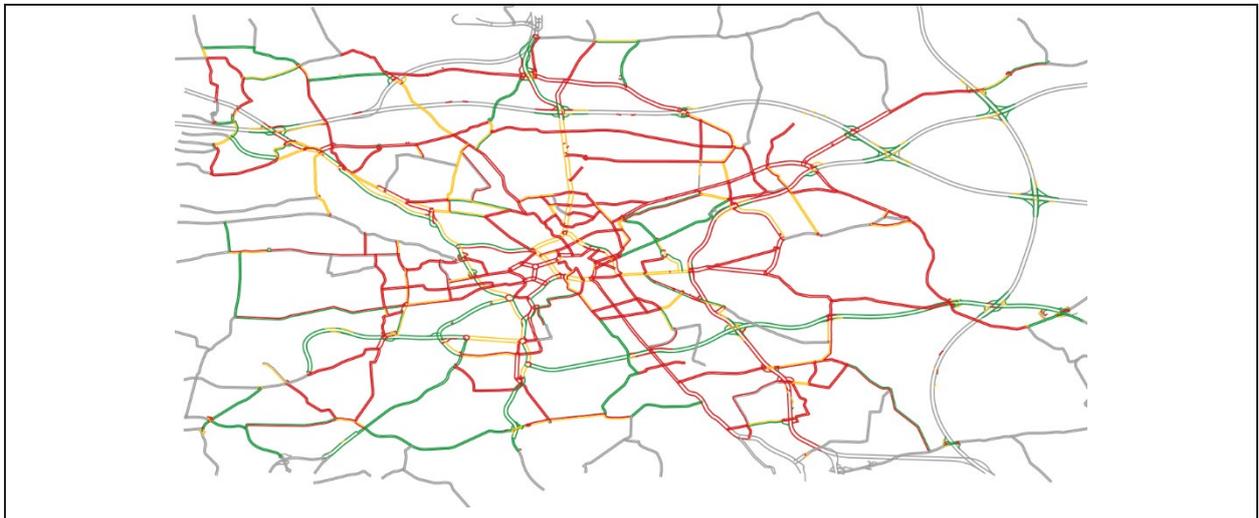


Bild 7-8: Zuverlässigkeitsindex für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Hannover
(grün: $1 \leq ZI \leq 1.5$, gelb: $1.5 < ZI \leq 2$, rot: $ZI > 2$)

Die hier betrachteten Indizes beziehen sich auf Geschwindigkeits- oder Fahrtzeitperzentile, die relativ robuste Größen darstellen. Indizes, die sich nicht nur auf Perzentile beziehen, sondern kleinere Zeitabschnitte betrachten und miteinander ins Verhältnis setzen, können nur verwendet werden, wenn eine ausreichend große Menge an Daten zur Verfügung steht. Das betrifft zum Beispiel den *Kumulierte Differenzen Index (KDI)* aus RADDE (2016):

$$KDI = (n - 1)^{-1} \sum_{t=1}^n |(v_t - v_{t-1})|,$$

wobei n eine betrachtete Anzahl an Tagen und v_t die Durchschnittsgeschwindigkeit zur betrachteten Stunde an Tag t bezeichnet. Dieser Index spiegelt die Nutzererwartung wider, die darauf beruht, dass Fahrtgeschwindigkeiten nicht von Tag zu Tag schwanken. Ein hoher KDI deutet auf eine geringe Zuverlässigkeit des Streckenabschnitts hin. In der von RADDE (2016) betrachteten Situation auf Autobahnen mit hohen Verkehrsstärken liefert der Index gute Ergebnisse, wohingegen er für Stadtstraßen mit wenigen Fahrzeugen pro Stunde bei geringen Durchsetzungsgraden der FCD eher ungeeignet ist.

8 FCD für Fahrradverkehr (Floating-Bike-Daten)

8.1 Radverkehr im HBS

Für den Radverkehr liegt derzeit noch kein Verfahren zur Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten vor. Lediglich in den „Hinweisen zur Anwendung der RIN“ (FGSV 2018) ist ein einfaches Verfahren für die Bewertung der netzabschnittsbezogenen Angebotsqualität enthalten. Für dieses Verfahren wurde auch ein erster Ansatz zur Bestimmung der zu erwartenden mittleren Fahrtgeschwindigkeiten des Radverkehrs auf Netzabschnitten entwickelt. Damit wird ein Vergleich mit den in den RIN (FGSV 2008) vorgegebenen Zielgrößen der angestrebten Fahrtgeschwindigkeiten ermöglicht. Zur Ermittlung der zu erwartenden mittleren Fahrtgeschwindigkeit auf einem Netzabschnitt sind die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten auf den Strecken sowie die mittleren Wartezeiten an Knotenpunkten zu bestimmen. Für die Bestimmung der Fahrtgeschwindigkeit auf einer Strecke können näherungsweise tabellierte, nach Art der Radverkehrsanlage und der Längsneigung (Ebene sowie Steigung und Gefälle in zwei Klassen) differenzierte Werte angesetzt werden. Diese Geschwindigkeitswerte wurden im Rahmen der Untersuchungen von BAIER et al. (2013) abgeleitet. Sie gelten für den Alltagsradverkehr und ausschließlich für Fahrräder. Mit zunehmendem Anteil von Pedelecs und E-Bikes sind die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten des Radfahrerkollektivs vor allem an Steigungsstrecken höher anzusetzen.

In den Untersuchungen zu „Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität“ wurde durch GEISTEFELDT et al. (2021) ein neues Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität des Radverkehrs auf Strecken mit differenzierten q-V-Beziehungen für den Radverkehr auf eigenständigen Anlagen (Radwege, Radfahrstreifen) erarbeitet. Inwieweit dieses Verfahren in das HBS (FGSV 2015) eingehen wird, ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nicht absehbar.

8.2 Ansätze zur Nutzung von FC-Daten aus dem Radverkehr

Zur Erhebung von „Floating Bike Data“ (FBD) bietet sich das GPS-Tracking über eine App auf dem mitgeführten Smartphone an. Diesen Markt bedienen einige Hersteller von Fitness-Apps, welche als Nebenprodukt die durch die App erhobenen GPS-Daten – unter Einhaltung des Datenschutzes – kommerziell vermarkten. Zu diesen Anbietern gehört u.a. das Netzwerk Strava, dessen Angebot in LISSNER & FRANCKE (2017) für die Stadt Dresden genauer untersucht wurde. Initial werden bei der Erhebung in der Datenbank von Strava für jeden Nutzer einzelne GPS-Punkte aufgezeichnet, welche vor der Übergabe an den die Daten beziehenden Kunden jedoch aus Datenschutzgründen aggregiert werden müssen. Die übergebenen Daten beinhalten aggregierte Informationen (Anzahl der Radfahrer, durchschnittliche Verweilzeit der Radfahrer auf dem entsprechenden Netzelement) für verschiedene Netzelemente wie Strecken bzw. Kanten oder Knotenpunkte. Es muss beachtet werden, dass die demografische Zusammensetzung der durch die App erhobenen Stichprobe – bzw. der Nutzer der App – von der demografischen Struktur des Radfahrerkollektivs des Erhebungsraums abweichen kann. Aus den Daten geht nicht hervor, inwiefern Wartezeiten aufgrund von Knotenpunkten oder Lichtsignalanlagen am Ende einer Kante in die Verweilzeit eingehen. Eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit auf der Kante kann deshalb auf Basis der Verweilzeit nicht sicher berechnet werden. Die Autoren empfehlen hier für die Zukunft eine „saubere, methodische Trennung der Parameter Geschwindigkeit und Wartezeit“. Für Knotenpunkte sind zudem die minimale und maximale Wartezeit sowie deren Median gegeben. Aufgrund der Aggregation ist die Erstellung einer Quelle-Ziel-Matrix, welche alle gefahrenen Routen enthält, nicht möglich. Quelle-Ziel-Beziehungen können jedoch auf der Ebene von Blockelementen und Postleitzahlbereichen angegeben werden. Eine explorative Datenanalyse für die Stadt Dresden zeigte, dass alle Fahrbeziehungen in der Stadt von den Nutzern der Strava-App ausreichend abgedeckt werden können. Zudem ließ sich im Stadtkern ein hoher Anteil an Alltagsfahrten ausmachen, während außerhalb des Stadtkerns die Freizeitfahrten überwiegen.

BOSS et al. (2018) nutzten die Daten von Strava für eine Untersuchung in Ottawa (Kanada). Hier wurden die aggregierten GPS-Daten zusätzlich mit stationären Zähldaten aus insgesamt elf Dauerzählstellen verschlüsselt, um diese auf das Gesamttraververkehrsaufkommen der Stadt hochrechnen zu können. Die Hoch-

rechnung ermöglichte für jede Kante im städtischen Straßennetz eine Aussage zum realen Radverkehrsaufkommen. Diese Informationen konnten dazu genutzt werden, über eine bestimmte Zeitperiode die räumliche Verlagerung des Radverkehrsaufkommens auf andere Streckensegmente oder gar Routen zu visualisieren. Die Hochrechnung von aggregierten Daten von Strava mittels Zählstellen aus Dauerzählstellen wurde auch von HEESCH & LANGDON (2016) in Queensland (Australien) und von GRIFFIN & JIAO (2019) in Austin (USA) angewendet und von beiden Quellen als geeignete Methode zur Radverkehrsplanung identifiziert.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich kommerzielle Datenquellen wie Strava, die einem strengen Datenschutz unterliegen, für aggregierte Informationen wie dem Verkehrsaufkommen oder der durchschnittlichen Fahrtzeit auf einem Abschnitt eignen können. Für detaillierte Untersuchungen wie z.B. der Verkehrssicherheit oder des Zustands der Fahrbahn auf bestimmten Streckenabschnitten sind diese Datenquellen jedoch laut HUBER et al. (2019) nicht geeignet. Nach LISSNER & FRANCKE (2017) sind die von Strava „vorhandenen Angebote [...]“ zwar ein erster Einstieg in das Thema, haben jedoch hinsichtlich ihrer Qualität und Darstellung noch nicht das in Deutschland für ein akzeptiertes Planungswerkzeug nötige Niveau“.

Um dieses benötigte Niveau zu gewährleisten, stellen dieselben Autoren in LISSNER & HUBER (2021) einen mehrstufigen Prozess zur Aufbereitung von rohen GPS-Daten vor, die über eine Smartphone-App erhoben wurden. Dieser Aufbereitungsprozess umfasst eine Plausibilisierung, in welcher Wege mit zu hohen Geschwindigkeiten sowie solche mit zu geringer Fahrtzeit entfernt werden. Über die Haversin-Formel aus der Geodäsie wird der Abstand zwischen den einzelnen GPS-Punkten, die mit einer Frequenz von 1 Hz aufgenommen werden, berechnet. Aus diesen Abständen wird die Geschwindigkeit bestimmt, die zusätzlich über eine Gauss-Gewichtung geglättet wird. Weiterhin werden im Rahmen der Aufbereitung die Daten zu Wegen zusammengefasst und der Verkehrsmodus (nicht alle erfassten GPS-Punkte müssen zwangsläufig mit dem Fahrrad zurückgelegt worden sein) sowie der Fahrzustand (Stehen, Beschleunigen, konstante Bewegung, Bremsen) erkannt. In LISSNER et al. (2020) wendeten die Autoren diesen Aufbereitungsprozess auf die erhobenen Daten von insgesamt 200 Fahrradfahrende an. Ziel war es zu untersuchen, ob in den GPS-Daten vorab durch eine Befragung mit insgesamt 10.000 Teilnehmenden identifizierte Typen von Radfahrenden wiedererkannt werden können. Dies war nicht der Fall, jedoch konnte ein starker Einfluss von Alter und Geschlecht der Fahrenden sowie des Fahrtzwecks festgestellt werden.

RUPI et al. (2019) untersuchten mit einer ähnlichen Datengrundlage, inwiefern sich Schwachstellen im Radverkehrsnetz der Stadt Bologna identifizieren und quantifizieren lassen. Insgesamt standen 27.500 GPS-Datensätze von 1.123 Teilnehmenden zur Verfügung, welche im Rahmen der „European Cycling Challenge“ (ECC) erhoben wurden. Die Teilnehmeranzahl entsprach etwa 0,3 % der Bevölkerung von Bologna, weshalb eine Methode entwickelt wurde, um die erhobenen GPS-Daten derart hochzurechnen, dass der gesamte Radverkehr der Stadt repräsentativ abgebildet werden kann. Diese Hochrechnung wurde anhand der Zählstellen von insgesamt 23 in der Stadt verteilten Zählstellen verglichen und validiert. Um Schwachstellen im Radverkehrsnetz identifizieren zu können, wurde pro Kante ein „Umfangfaktor“ berechnet, der die Abweichung vom kürzesten Weg beschreibt. Dieser ist umso höher, je mehr Umwege in Kauf genommen wurden, anstatt über diese Kante zu fahren, und konnte aufgrund der sehr detaillierten Datengrundlage – jede gefahrene Route ist bekannt – berechnet werden. Anhand dieser Kenngröße ließen sich beliebte und unbeliebte Strecken identifizieren. Weiterhin konnten auf Basis dieses Wissens Attribute unbeliebter Strecken ermittelt werden. Eine ähnliche Untersuchung wurde von STRAUSS & MIRANDA-MORENO (2017) in Montreal (Kanada) durchgeführt. Über eine Smartphone-App wurden ebenfalls GPS-Daten erhoben und einem Verfahren ähnlich dem oben Erläuterten von LISSNER & HUBER (2021) aufbereitet. Für jedes Straßensegment wurden Geschwindigkeit und Verlustzeit berechnet und mittels linearer Regression bauliche Faktoren wie beispielsweise die Straßengeometrie identifiziert, welche einen Einfluss auf die gefahrene Geschwindigkeit haben. KNAPEN & HOLMGREN (2020) kombinierten GPS-Daten mit einem unabhängigen Datensatz bestehend aus gefährlichen Stellen im Straßennetz, welche von Radfahrenden mit Hilfe einer Smartphone-App gemeldet wurden. Die GPS-Daten lieferten hierbei die Informationen, welche Straßensegmente stark und welche weniger stark belastet sind. Daraus wurde eine Optimierungsfunktion abgeleitet, welche unter einem gegebenen Budget zur Ausbesserung der gefährlichen Stellen jene Stellen empfiehlt, deren Ausbesserung unter dem gegebenen Budget den meisten Nutzen erbringt.

Eine weitere Datenquelle abseits des GPS-Trackings von Smartphones bieten Bike-Sharing-Systeme, da hier in der Regel alle Fahrräder mit einem GPS-Tracker ausgestattet sind. POGODZINSKA et al. (2020) untersuchten in Krakau (Polen), ob sich aus den Bike-Sharing-Daten das gesamte Radverkehrsaufkommen der Stadt hochrechnen lässt. Hierzu wurde insbesondere betrachtet, inwieweit die Bike-Sharing-Nutzenden in gewissen Bereichen der Stadt oder an bestimmten Wochentagen überrepräsentiert sind. Dieser Abgleich erfolgte anhand von fünf automatischen Dauerzählstellen. Ein Einfluss des Wochentages konnte nicht festgestellt werden, die örtliche Lage hat jedoch einen Einfluss. Insgesamt kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass sich aus Bike-Sharing-Systemen gewonnene GPS-Daten in Kombination mit automatischen Dauerzählstellen dazu eignen, das gesamte Radverkehrsaufkommen der Stadt Krakau abzubilden.

Ebenfalls auf der Grundlage von Daten aus einem Bike-Sharing-System haben WU et al. (2019) in Shenzhen (China) untersucht, inwieweit durch Bike-Sharing zur Erschließung der „letzten Meile“ der Erreichbarkeitsradius von Metro-Stationen erweitert werden kann. Insgesamt standen Daten von 20 Millionen Trips aus einem Zeitraum von 14 Tagen zur Verfügung. Diese wurden auf die Start- und Zielkoordinaten sowie die dazugehörigen Zeitpunkte reduziert. Die zurückgelegte Distanz wurde vereinfachend als euklidische Distanz zwischen den Koordinaten berechnet. Es wurden alle Trips betrachtet, deren Start- oder Zielkoordinate in einem Radius von 100 m um eine Metro-Station liegen. Für das jeweils andere Ende eines Trips wurde überprüft, welche Art von Aktivitätenelegenheit in der Nähe liegt und auf dieser Basis der Fahrtzweck bestimmt. Insgesamt kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass ein Bike-Sharing-System den Erreichbarkeitsradius einer Metro-Station um 800 m bis 1.500 m erweitern kann.

8.3 Erkennung von Störungen im Radverkehr

Für das hier beschriebene Projekt wurden beispielhaft Floating Bike Data untersucht, die im Rahmen des Projekts SimRa aufgenommen wurden. SimRa steht für „Sicherheit im Radverkehr“ und wurde am Einstein Center Digital Future (ECDF) in Berlin durchgeführt. Teilnehmende konnten ihre Routen mithilfe einer Smartphone-App aufzeichnen, die dann mithilfe der Beschleunigungssensoren und GPS-Informationen Gefährdungssituationen erkennen konnte. Diese konnten dann durch eine zusätzliche Annotation der Nutzenden ergänzt oder präzisiert werden. Die so erhobenen Daten sind als Open Data zur weiteren Nutzung verfügbar.

Im Rahmen der Mängel- und Störstellenerkennung wurde auf Daten von Januar bis September 2021 im Stadtbereich Berlin zurückgegriffen. Dabei wurden nur die reinen GPS-Tracks verwendet. Die Daten enthalten etwa 4.700 aufgezeichnete Fahrten mit über 2 Mio. Sendepunkten in kleinen Sendeintervallen von meist 3 Sekunden. Daraus konnten Fahrtgeschwindigkeiten berechnet werden. Anders als bei motorisiertem Verkehr ist die gefahrene Geschwindigkeit ohne Störstellen nicht abhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, sondern es liegen sehr heterogene Freifahrtgeschwindigkeiten vor. Diese sind abhängig vom Radfahrenden und der vorliegenden Geometrie, z.B. starken Steigungen.

Um die individuell unterschiedlichen Freifahrtgeschwindigkeiten auszugleichen, wurde für jede Fahrt die individuelle Freifahrtgeschwindigkeit bestimmt als 90 %-Perzentil aller während der Fahrten aufgezeichneten Geschwindigkeiten. In der folgenden Auswertung wurden dann nicht die Absolutgeschwindigkeiten betrachtet, sondern die Verhältnisse zur Freifahrtgeschwindigkeit. Nicht behandelt wurden Steigungen und andere Geschwindigkeitsschwankungen, z.B. durch zeitweises Schieben des Rads oder längere Unterbrechungen. Trotzdem kann man an den Geschwindigkeitsverläufen gut erkennen, dass die wesentlichen Störungsstellen die Knotenpunkte sind. Betrachtet man die Sendepunkte mit einer Geschwindigkeit von 0 km/h, können damit die Wartezeiten geschätzt werden, was eine gute Grundlage für die Bestimmung der Verkehrsqualität ist.

Bild 8-1 zeigt die aufgezeichneten GPS-Tracks für Januar 2021. Die Sendepunkte sind nach der normierten Geschwindigkeit eingefärbt. Erkennbar ist zunächst, dass eine gute Abdeckung des Stadtgebiets Berlins vorliegt. Bei der detaillierteren Betrachtung einzelne Straßenzüge wie in Bild 8-2 kann gesehen werden, dass auch mikroskopisch eine hohe Abdeckung vorhanden ist und die Datenpunkte durch das kleine Sendeintervall von drei Sekunden eng beieinander liegen. Die durch Knotenpunkte verursachten Störungen im Fahrtablauf sind aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten in den Knotenpunktbereichen gut erkennbar. Besonders deutlich wird das durch die Betrachtung von Stillständen, d.h. Sendepunkten mit Geschwindigkeit von 0 km/h, die meistens in der Nähe von Knotenpunkten liegen, wie in Bild 8-3 zu sehen ist.

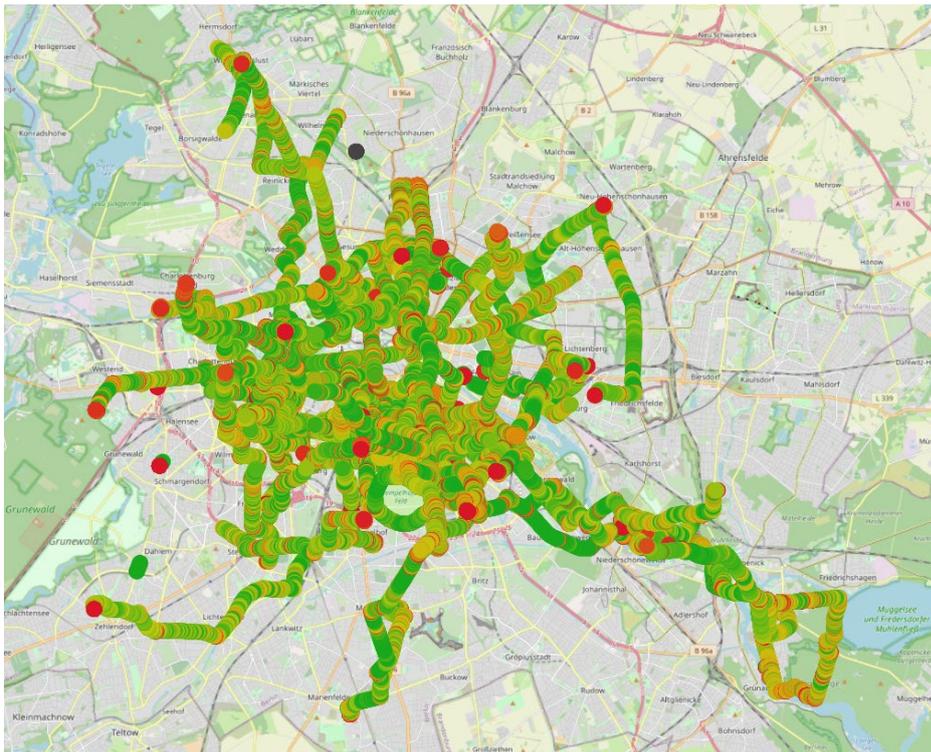


Bild 8-1: Aufgezeichnete GPS Tracks aus dem Projekt SimRa in Berlin aus dem Januar 2021, eingefärbt nach normierter Geschwindigkeit (kontinuierlicher Farbverlauf von rot nach grün, beginnend mit 0 km/h (rot)) (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)



Bild 8-2: Ausschnitt aus den aufgezeichneten GPS-Tracks im Januar 2021 in Berlin, eingefärbt nach normierter Geschwindigkeit (kontinuierlicher Farbverlauf von rot nach grün, beginnend mit 0 km/h (rot)), Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

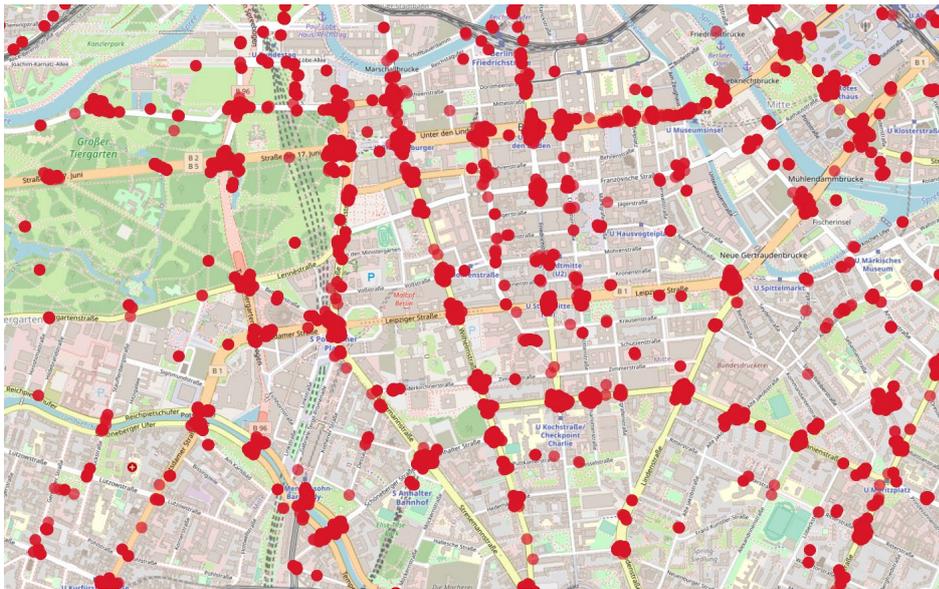


Bild 8-3: Sendepunkte mit einer Geschwindigkeit von 0 km/h,
(Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Über Smartphone-Apps aufgenommene GPS-Tracks von Fahrrädern bieten eine gute technische Basis, die Verkehrsqualität für den Radverkehr zu bestimmen. Das heterogene Geschwindigkeitsniveau kann über eine Skalierung der Geschwindigkeiten innerhalb zusammenhängender Fahrten kompensiert werden; Wartezeiten an Knotenpunkten können direkt aus dem Fahrtverlauf abgeleitet werden. Beabsichtigte Fahrtunterbrechungen müssen erkannt und gefiltert werden, was bei einer ausreichenden Abdeckung durch Vergleich mit anderen, parallelen Fahrtverläufen voraussichtlich gut machbar ist. Für die praktische Anwendbarkeit besteht gegenüber dem Kfz-Verkehr aber noch der bedeutende Nachteil, dass es kaum kommerzielle Anbieter von Floating-Bike-Daten gibt.

9 Zusammenfassung und Fazit

Die zentrale Frage des vorgestellten Projekts war, ob kommerziell verfügbare Floating-Car-Daten (FCD) bei der Bestimmung der Angebotsqualität von Netzabschnitten gewinnbringend eingesetzt werden können. Die Projektergebnisse geben hierauf eine klare Antwort: Die Nutzung von FCD ist sogar die überlegene Methode, Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten und damit die Angebotsqualität zu bestimmen.

Kontrollmessungen durch Kennzeichenerfassung haben bestätigt, dass selbst bei geringen Durchdringungsraten die durch Floating-Car-Daten bestimmten Fahrtzeiten das Verkehrsgeschehen gut wiedergeben. Die Bestimmung der Angebotsqualität durch FCD erfordert keine Arbeiten vor Ort; die notwendigen Daten können direkt von verschiedenen Anbietern bezogen und ausgewertet werden. Ein weiterer Vorteil im Bemessungskontext ist die einfache Aggregation von FCD über längere Zeiträume hinweg, was eine vergleichbare Repräsentativität durch traditionelle Verkehrsmessungen nur mit aufwändigen Langzeitmessungen erreichen könnte.

Während des Projektzeitraums (im Wesentlichen 2021 und 2022) war der Markt für Floating-Car-Daten in Bewegung. Es gab mehrere Anbieter unterschiedlicher Größe, bei denen FCD in verschiedenen Aufbereitungsstufen erhältlich waren. Für verkehrstechnische Analysen sind FC-Rohdaten, also die Einzelmeldungen der Fahrzeuge mit Zeitstempel, Position und Geschwindigkeit, am flexibelsten einsetzbar. Wenn es um die Bestimmung der Angebotsqualität einzelner Netzabschnitte geht, sind auch aggregierte FCD gut geeignet, auch wenn die Art der Vorverarbeitung je nach Anbieter nicht vollständig transparent ist.

Das bestehende Bewertungsverfahren im HBS (FGSV 2015) für innerstädtische Netzabschnitte bestimmt die Angebotsqualität auf der Basis der Schätzung von Fahrtzeiten auf den einzelnen Strecken des Netzabschnitts und berücksichtigt dabei Einflussgrößen wie Parkvorgänge, Haltestellen und Fußgängerquerungen. Die im Projekt durchgeführten Simulationsrechnungen, die auch solche potenziellen Störungsquellen beinhalteten, zeigen deutlich, dass deren Einfluss gegenüber Wartezeiten an Knotenpunkten im Lauf des Netzabschnitts gering ist. Deshalb könnte die Notwendigkeit, solche Faktoren im HBS-Bewertungsverfahren zu berücksichtigen, überdacht werden. Durch FCD werden alle Fahrzeitverluste, unabhängig von ihrer Ursache, automatisch erfasst.

Das im Projekt für städtische Netzabschnitte erprobte Verfahren zur Bestimmung der Angebotsqualität kann ohne Änderungen auf jede andere Bewertungssituation übertragen werden, bei der die mittlere Fahrtgeschwindigkeit die maßgebende verkehrstechnische Kenngröße ist. Das ist im HBS insbesondere der Fall bei der Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten auf Landstraßen nach HBS-Kapitel L7 und auf Autobahnen nach HBS-Kapitel A5. Bei Landstraßen werden FCD bereits als alternatives Verfahren im HBS-Abschnitt 7.6 erwähnt; das im Projekt erarbeitete Verfahren ist insofern eine Konkretisierung dieser Hinweise. Bei Autobahnen werden FCD im HBS-Abschnitt 5.6 bisher nicht als alternatives Verfahren genannt, aber es wird mikroskopische Simulation zur Ermittlung der Fahrtzeiten als Alternative zur Bestimmung aus den q-v-Beziehungen aus HBS-Kapitel A3 zugelassen. Damit ist auch sinnvoll, die Bestimmung der Fahrtzeiten durch FCD als alternatives Verfahren aufzunehmen. Die Nutzung von FCD im Kontext von Landstraße oder Autobahn wird in der Regel erfordern, mehr Daten einzukaufen, weil man größere Entfernungen als bei der Anwendung in der Stadt abdecken muss.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den Radverkehr kann zunächst festgestellt werden, dass durch Smartphone-Apps aufgenommene GPS-Tracks von Fahrrädern eine gute technische Basis bieten, die Verkehrsqualität für den Radverkehr zu bestimmen. Das heterogene Geschwindigkeitsniveau kann über eine Skalierung der Geschwindigkeiten innerhalb zusammenhängender Fahrten kompensiert werden; Wartezeiten an Knotenpunkten können direkt aus dem Fahrtverlauf abgeleitet werden. Beabsichtigte Fahrtunterbrechungen müssen erkannt und gefiltert werden, was bei einer ausreichenden Abdeckung durch Vergleich mit anderen, parallelen Fahrtverläufen gut machbar ist. Für die praktische Anwendbarkeit besteht gegenüber dem Kfz-Verkehr aber noch der bedeutende Nachteil, dass es derzeit keine kommerziellen Anbieter von flächendeckenden Floating-Bike-Daten gibt.

Ein großer Teil der Anwendungen der Bewertungsverfahren des HBS bezieht sich auf zukünftige Situationen. Für einen Prognosezustand kann es naturgemäß noch keine Floating-Car-Daten geben. FCD können aber indirekt nützlich sein, indem sie zur Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells für den Analysezustand verwendet werden. Mit dem Simulationsmodell können dann Aussagen

zum Prognosezustand gemacht werden. Im hier vorgestellten Projekt wurde demonstriert, wie Floating-Car-Daten für die Kalibrierung der Simulation verwendet werden können. Sie erlauben insbesondere nicht nur eine Kalibrierung anhand der mittleren Fahrtzeit über den ganzen Netzabschnitt, sondern geben detailliert Hinweise auf die Stellen, an denen es zu Unterschieden bei den Fahrtgeschwindigkeiten zwischen Realität und Simulation kommt.

Auch zur netzweiten Mängelanalyse sind Floating-Car-Daten gut geeignet. Im vorgestellten Projekt wurde ein Verfahren entwickelt, wie auf der Basis frei verfügbarer digitaler Straßenkarten ein städtisches Straßennetz automatisch in Netzabschnitte unterteilt wird. Für diese Netzabschnitte können dann verschiedene Performance-Indikatoren bestimmt werden, die sich an Perzentilen der Fahrtzeitverteilungen orientieren. Die dazu notwendigen Fahrtzeitverteilungen können aus FCD bestimmt werden. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass bei der Bestimmung der Fahrtzeitverteilung nur Fahrzeuge berücksichtigt werden, die den Netzabschnitt komplett durchfahren haben. Ein Zusammensetzen der Fahrtzeitverteilung des Netzabschnitts aus den Verteilungen der einzelnen Strecken ist mathematisch nicht möglich, weil die Fahrtzeiten auf den Strecken nicht unabhängig voneinander sind. Für diesen Anwendungsfall müssen also entweder FC-Rohdaten zur Verfügung stehen oder aggregierte Daten, wenn der Anbieter eine Option bietet, nur vollständige Durchfahrten einzubeziehen. Denkbar wäre es auch, einen methodischen Standard für solche netzweiten Analysen zu etablieren, die dann von den Datenanbietern als Dienstleistung angeboten werden könnten.

Ohnehin war bei den Anbietern kommerziellen Floating-Car-Daten die Tendenz zu erkennen, statt der reinen FC-Daten eher Verkehrsanalysen als Dienstleistung zu verkaufen. Das könnte schließlich dazu führen, dass in Zukunft die Verfügbarkeit kommerzieller FCD eher schlechter wird. Eventuell könnte diese Lücke gefüllt werden durch Floating-Car-Daten, die von kooperativen intelligenten Verkehrssystemen (C-ITS) bereitgestellt werden. Die Zahl von Fahrzeugen auf den Straßen, die mit Kommunikationstechnik nach dem C-ITS-Standard ausgerüstet sind, nimmt stetig zu. Diese Fahrzeuge senden kontinuierlich und unverschlüsselt Positionsmeldungen, wenn auch nur kurze Strecken unter der gleichen Fahrzeug-Identifikation. Es wäre naheliegend, in einem Folgeprojekt zu untersuchen, wie diese C-ITS-Daten z.B. von Kommunen gesammelt und ausgewertet werden können.

Literatur

- AMBÜHL, L.; MENENDEZ, M.: Data fusion algorithm for macroscopic fundamental diagram estimation. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 71 (2016), S. 184–197
- ARGOTE-CABAÑERO, J.; CHRISTOFA, E.; SKABARDONIS, A.: Connected vehicle penetration rate for estimation of arterial measures of effectiveness. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 60 (2015), S. 298–312
- AXER, S.; FRIEDRICH, B.: Level of Service Estimation based on Low-frequency Floating Car Data. In: *Transportation Research Procedia* Bd. 3 (2014), S. 1051–1058
- AXER, S.; PASCUCCI, F.; FRIEDRICH, B.: Estimation of traffic signal timing data and total delay for urban intersections based on low frequency floating car data. In: *mobil.TUM 2015*, 2015
- BAIER, M. M.; KATHMANN, T.; BAIER, R.; SCHÄFER, K. H.: Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 108. Bergisch Gladbach, 2003.
- BAIER, M. M.: Qualitätsstufenkonzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs auf Streckenabschnitten von vierstreifig befahrenen Hauptverkehrsstraßen. In: *Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau*. Aachen: Isac, 2006. — ISBN 978-3-925163-36-4.
- BAIER, M. M.; SCHUCKLIESS, W.; MAIER, R.; SCHMOTZ, M.: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 264. Bergisch Gladbach, 2015.
- BAIER, M. M.; HARTKOPF, G.: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 266. Bergisch Gladbach, 2015.
- BAIER, R.; SCHUCKLIESS, W.; JACHTMANN, Y.; DIEGMANN, V.; MAHLAU, A.; GÄSSLER, G.: Radpotenziale im Stadtverkehr. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 227. Bergisch Gladbach, 2013.
- BAWIDAMANN, J., FRIEDRICH, M. PETER, L., WASSMUTH, V. (2020a) Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen. Forschungsprojekt FE 01.0197/2016/FRB, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- BAWIDAMANN, J., FRIEDRICH, M. JANKO, J., PETER, L., SCHICK, N., WASSMUTH, V. (2020b) Entwicklung eines aktuellen, echtzeitverfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz. Forschungsprojekt 21.0059/2017, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- BENNECKE, A.; LOHMILLER, J.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.: *Zeitabhängige Verbindungsqualität in Straßennetzen* (Forschungsbericht FE Nr. 18.0019/2007). Bergisch-Gladbach : Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011
- BOSS, D.; NELSON, T.; WINTERS, M.; FERSTER, C. J.: Using crowdsourced data to monitor change in spatial patterns of bicycle ridership. In: *Journal of Transport & Health* Bd. 9 (2018), S. 226–233
- BRENNAN, T. M.; REMIAS, S. M.; MANILI, L.: Performance Measures to Characterize Corridor Travel Time Delay Based on Probe Vehicle Data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Bd. 2526 (2015), Nr. 1, S. 39–50

- BOLTZE, M.; BUSCH, F.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.; KOHOUTEK, S.; LÖHNER, H.; LÜSSMANN, J.; OTTERSTÄTTER, T.: AMONES: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen. In: *Straßenverkehrstechnik* Bd. 55 (2011), Heft 5, S. 293–300; Heft 6, S. 374–381; Heft 7, S. 451–455.
- BRILON, W.; SCHNABEL, W.: Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen. In: *Straßenverkehrstechnik* Bd. 47 (2003), Heft 1, S. 21–26.
- BRILON, W.; WIETHOLT, T.; WU, N.: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 163. Bergisch Gladbach, 2007.
- BRILON, W.; HOHMANN, S.; GIULIANI, S.: Verkehrsadaptive Netzsteuerung. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 230. Bergisch Gladbach, 2013.
- BSV BÜRO FÜR STADT- UND VERKEHRSPANUNG GMBH: Machbarkeitsstudie zum Ausbau der Kufsteiner Straße, im Auftrag der Stadt Rosenheim. Aachen, 2016.
- BSV BÜRO FÜR STADT- UND VERKEHRSPANUNG GMBH: Verkehrsplanerische Beratung „Quartiersentwicklung Am Römerhof“ in Frankfurt am Main, im Auftrag der ABG Frankfurt Holding Wohnungsbau- und Beteiligungsgesellschaft mbH. Aachen, 2019a.
- BSV BÜRO FÜR STADT- UND VERKEHRSPANUNG GMBH: Verkehrssimulation zur Bewertung der Auswirkungen der signalisierten Fußgängerquerungen an der Elberfelder Straße auf den Kfz-Verkehr, im Auftrag der Stadt Remscheid. Aachen, 2019b.
- BUNDESAMT FÜR STRASSEN DES EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION: *Verkehrsqualität von Streckenabschnitten auf Hauptverkehrsstrassen innerorts*. Forschungsprojekt VSS 2017/624 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2022)
- BUSCH, F.; GRIGOROPOULUS, G.; KATHS, H.; BAIER, M. M.; REINARTZ, A.; SCHUCKLISS, L.; JUNG-HANS, M.; LÜCKEN, L.; LEONHARDT, A.: Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen, In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 369. Bergisch Gladbach, 2023.
- CAO, P.; MIWA, T.; YAMAMOTO, T.; MORIKAWA, T.: Estimation of Dynamic Link Flows and Origin-Destination Matrices from Lower Polling Frequency Probe Vehicle Data, Eastern Asia Society for Transportation Studies (2013)
- CETIN, M.: Estimating Queue Dynamics at Signalized Intersections from Probe Vehicle Data: Methodology Based on Kinematic Wave Model. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Bd. 2315 (2012), Nr. 1, S. 164–172
- CHENG, Y.; QIN, X.; JIN, J.; RAN, B.; ANDERSON, J.: Cycle-by-Cycle Queue Length Estimation for Signalized Intersections Using Sampled Trajectory Data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Bd. 2257 (2011), Nr. 1, S. 87–94
- CHRYSOSTOMOU, K.; PETROU, A.; AIFADOPOULOU, G.; MORFOULAKI, M.: Microsimulation Modelling of the Impacts of Double-Parking Along an Urban Axis. In: NATHANAIL, E. G. ; KARAKIKES, I. D. (Hrsg.): *Data Analytics: Paving the Way to Sustainable Urban Mobility*. Bd. 879. Cham : Springer International Publishing, 2019 — ISBN 978-3-030-02304-1, S. 164–171
- COHN, N.; KOOLS, E.; MIETH, P.: The TomTom Congestion Index. In: *19th ITS World Congress*, 2012

- COMERT, G.; CETIN, M.: Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size. In: *European Journal of Operational Research* Bd. 197 (2009), Nr. 1, S. 196–202
- DAY, C. M.; EMTENAN, T.: Trajectory-Based Performance Measures for Interrupted-Flow Facilities. In: *Straßenverkehrstechnik* Bd. 63(9) (2019), S. 647–653
- DIEPENDAELE, K.; RIGUELLE, F.; TEMMERMAN, P.: Speed Behavior Indicators Based on Floating Car Data: Results of a Pilot Study in Belgium. In: *Transportation Research Procedia* Bd. 14 (2016), S. 2074–2082.
- DINH, T.-U. J.; BILLOT, R.; PILLET, E.; FAOUZI, N.-E. E.: Real-Time Queue-End Detection on Freeways with Floating Car Data. In: *Transportation Research Record* (2014), S. 11
- DU, J.; RAKHA, H.; GAYAH, V. V.: Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe data: Issues and proposed solutions. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 66 (2016), S. 136–149
- EDIE, L. C.: Discussion of traffic stream measurements and definitions. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 1963, S. 139–154
- ESTEL, A.: Differenzierte Bewertung des Verkehrsablaufs auf Straßenverkehrsanlagen im Bereich der Überlastung, Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen (34) (2009)
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: Global Positioning System Standard Positioning Service. Atlantic City, Januar 2021 (Satellite Navigation Branch, Report Nr. 112). — Forschungsbericht.
- FELLENDORF, M.; VORTISCH, P.: Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM, 2010
- FGSV: Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2002.
- FGSV: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2006.
- FGSV: Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2008.
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS 2015. Teil S: Stadtstraßen. Ausgabe 2015. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2015.
- FGSV: Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen (BBSV). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2020.
- FOURATI, W.; DABBAS, H.; FRIEDRICH, B.: Estimation of Penetration Rates of Floating Car Data at Signalized Intersections. In: *Transportation Research Procedia* Bd. 52 (2021), S. 228–235
- FOURATI, W.; FRIEDRICH, B.: A Method for Using Crowd-Sourced Trajectories to Construct Control-Independent Fundamental Diagrams at Signalized Links, Unpublished (2021)
- GEISTEFELDT, J.; VORTISCH, P.; BAIER, M. M.; BUCK, S.; BRANDENBURG, A.; ZEIDLER, V.: Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität. FE 3.539 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlichter Schlussbericht, 2021. Bochum/Karlsruhe/Aachen.
- GEROLIMINIS, N.; DAGANZO, C. F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. In: *Transportation Research Part B: Methodological* Bd. 42 (2008), Nr. 9, S. 759–770

- GRASER, A.; PONWEISER, W.; DRAGASCHNIG, M.; BRANDLE, N.; WIDHALM, P.: Assessing traffic performance using position density of sparse FCD. In: *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Anchorage, AK, USA : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4673-3063-3, S. 1001–1005
- GRIFFIN, G.; JIAO, J.: *Crowdsourcing Bicycle Volumes: Exploring the role of volunteered geographic information and established monitoring methods* (preprint) : SocArXiv, 2019
- HASPEL, U.; VON DOBSCHÜTZ, A.; KRAMPE, S.: *Nutzung von Floating-Car-Daten zur Verbesserung der Verkehrslage im Freistaat Bayern*. DE : Wichmann Verlag, 2015 — ISBN 978-3-87907-557-7
- HEESCH, K. C.; LANGDON, M.: The usefulness of GPS bicycle tracking data for evaluating the impact of infrastructure change on cycling behaviour: GPS bicycle tracking data in evaluating cycling behaviour. In: *Health Promotion Journal of Australia* Bd. 27 (2016), Nr. 3, S. 222–229
- HELLINGA, B.; FU, L.: Assessing Expected Accuracy of Probe Vehicle Travel Time Reports. In: *Journal of Transportation Engineering* Bd. 125 (1999), Nr. 6, S. 524–530
- HELLINGA, B. R.; FU, L.: Reducing bias in probe-based arterial link travel time estimates. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 10 (2002), Nr. 4, S. 257–273
- HUBER, S.; LIßNER, S.; FRANCKE, A.: Utility of GPS data for urban bicycle traffic planning in germany: Potentiality, limitations and prospects. In: *International Journal of Transport Development and Integration* Bd. 3 (2019), Nr. 1, S. 1–14
- JENELIUS, E.; KOUTSOPOULOS, H. N.: Travel time estimation for urban road networks using low frequency probe vehicle data. In: *Transportation Research Part B: Methodological* Bd. 53 (2013), S. 64–81
- KESTING, A.; TREIBER, M.: Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen; In: *Straßenverkehrstechnik*, 1. 5-11.(2010)
- KNAPEN, L.; HOLMGREN, J.: Identifying bicycle trip impediments by data fusion. In: *Procedia Computer Science* Bd. 170 (2020), S. 195–202
- KNOOP, V. L.; MERMYGKA, M.; VAN LINT, H.: Estimating the urban traffic state with limited traffic data using the MFD (2020)
- KO, J.; HUNTER, M.; GUENSLER, R.: Measuring Control Delay Components Using Second-by-Second GPS Speed Data. In: *Journal of Transportation Engineering* Bd. 134 (2008), Nr. 8, S. 338–346
- KRAMPE, S.; TRUPAT, S.; WAHLE, J.: Qualitätsbewertung von FC-Daten zur Verkehrslageermittlung in Niedersachsen. In: *Tagung HEUREKA – Optimierung in Transport und Verkehr der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen*. Stuttgart, 2014
- LANK, C.; SÜMMERMANN, A.; STEINAUER, B.; BAUR, O.; KEMPER, D.; PROBST, D.; BAIER, M. M.; BAIER, R.: Bewertungsverfahren für Verkehrs- und Angebotsqualitäten von Hauptverkehrsstraßen. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 183. Bergisch Gladbach, 2009.
- LECLERCQ, L.; CHIABAUT, N.; TRINQUIER, B.: Macroscopic Fundamental Diagrams: A cross-comparison of estimation methods. In: *Transportation Research Part B: Methodological* Bd. 62 (2014), S. 1–12
- LISSNER, S.; FRANCKE, A.: *Big Data im Radverkehr*, Bericht der TU Dresden, 2017

- LISSNER, S.; HUBER, S.: Facing the needs for clean bicycle data – a bicycle-specific approach of GPS data processing. In: *European Transport Research Review* Bd. 13 (2021), Nr. 1, S. 8
- LISSNER, S.; HUBER, S.; LINDEMANN, P.; ANKE, J.; FRANCKE, A.: GPS-data in bicycle planning: “Which cyclist leaves what kind of traces?” Results of a representative user study in Germany. In: *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* Bd. 7 (2020), S. 100192
- LIU, K.; YAMAMOTO, T.; MORIKAWA, T.: Estimating delay time at signalized intersections by probe vehicles. In: *Proceedings of ICTTS*, 2006
- LODER, A.; AMBÜHL, L.; AXHAUSEN, K. W.: Wie viel Verkehr für eine Stadt? Ein makroskopischer Ansatz. In: *Straßenverkehrstechnik* (2020), Nr. 09.2020
- LOHMILLER, J.: *Qualität des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten von Autobahnen: Bewertung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Analyse von Einflussfaktoren*. Stuttgart, Inst. für Straßen- und Verkehrswesen, 2014
- MADUSHANKA, P. H. S.; JAYARATNE, D. N. D.; PASINDU, H. R.: Study of the Impact Roadside Parking has on Traffic Flow Characteristics - A VISSIM Simulation Based Approach. In: *2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*. Moratuwa, Sri Lanka : IEEE, 2020 — ISBN 978-1-72819-975-7, S. 419–424
- MOUSA, R. M.: Analysis and Modeling of Measured Delays at Isolated Signalized Intersections. In: *Journal of Transportation Engineering* Bd. 128 (2002), Nr. 4, S. 347–354
- MORI, U.; MENDIBURU, A.; ÁLVAREZ, M.; LOZANO, J. A.: *A Review of Travel Time Estimation and Forecasting for Advanced Traveller Information Systems*. In: *Transportmetrica A: Transport Science* Bd. 11 (2015), S. 119–157
- NAGLE, A. S.; UGAYAH, V. V.: Accuracy of Networkwide Traffic States Estimated from Mobile Probe Data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Bd. 2421 (2014), Nr. 1, S. 1–11
- NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. 2020. *Performance-Based Management of Traffic Signals*. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/25875>
- NEUHOLD, R.; FELLENDORF, M.; NINDL, E.: *Reisezeitschätzung auf Autobahnen mittels rekonstruierter Einzelfahrzeugtrajektorien* (2014)
- NEUMANN, T.: *Rückstaulängenschätzungen Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten*, 2011
- NEUMANN, T.; BROCKFELD, E.; SOHR, A.: Computing turn-dependent delay times at signalized intersections based on floating car data. In: *European Transport Conference 2010*. Glasgow, Scotland, UK, 2010
- NEWSON, P.; KRUMM, J.: Hidden Markov map matching through noise and sparseness. In: *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems - GIS '09*. Seattle, Washington : ACM Press, 2009 — ISBN 978-1-60558-649-6, S. 336
- NGUYEN-PHUOC, D. Q.; CURRIE, G.; DE GRUYTER, C.; KIM, I.; YOUNG, W.: Modelling the net traffic congestion impact of bus operations in Melbourne. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* Bd. 117 (2018), S. 1–12

- NGUYEN-PHUOC, D. Q.; CURRIE, G.; YOUNG, W.; DE GRUYTER, C.: Modelling the Direct Impact of Tram Operation on Traffic. In: *23rd ITS World Congress, Melbourne, Australia, 10–14 October 2016* (2016)
- PAN, Y.; CAO, Z.: Simulation Research on Traffic Flow Characteristics of Bus Stop Area Based on VISSIM Software. In: *2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*. Chongqing : IEEE, 2018 — ISBN 978-1-5386-5380-7, S. 1325–1330
- POGODZINSKA, S.; KIEC, M.; D'AGOSTINO, C.: Bicycle Traffic Volume Estimation Based on GPS Data. In: *Transportation Research Procedia* Bd. 45 (2020), S. 874–881
- PTV AG: *PTV Vissim 2021 Benutzerhandbuch*, 2020
- QUIROGA, C. A.; BULLOCK, D.: Measuring Control Delay at Signalized Intersections. In: *Journal of Transportation Engineering* Bd. 125 (1999), Nr. 4, S. 271–280
- RADDE, M.; LEERKAMP, B.; KLEMMER, T. (2016): „Messung der Zuverlässigkeit von Straßennetzen mit Floating Car Data“. *Straßenverkehrstechnik* Heft 11/2016, S. 741-750, Kirschbaum Verlag, Bonn
- RUPI, F.; POLIZIANI, C.; SCHWEIZER, J.: Data-driven Bicycle Network Analysis Based on Traditional Counting Methods and GPS Traces from Smartphone. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* Bd. 8 (2019), Nr. 8, S. 322
- SCHÄFER, R.-P.; GÜHNEMANN, A.; THIESSENHUSEN, K.-U.: Neue Ansätze im Verkehrsmonitoring durch Floating Car Daten (2003)
- SCHLAICH, J.; OTTERSTÄTTER, T.; FRIEDRICH, M.; IMMISCH, K.; PROKOP, J.: Mobilfunkdaten im Verkehrswesen Bd. *Straßenverkehrstechnik* (2011), Nr. Heft 2 oder Heft 3, S. 65–74 oder 152–158
- SCHNABEL, W.; RINGEL, R.; LÄTZSCH, L.; KNOTE, T.: Die Qualität des Verkehrsablaufs auf städtischen Hauptverkehrsstraßen. In: *Straßenverkehrstechnik* Bd. 42 (1998), Heft 12, S. 635–643.
- SCHNABEL, W.; LÄTZSCH, L.; BRÜCKNER, N.: Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr. In: *Straßenverkehrstechnik* Bd. 45 (2001), Heft 12, S. 584–595.
- SCHNEIDER, B.; SEIVERT, V.; HEIPP, G.: Beschleunigung auf dem Prüfstand – Qualitätssicherung des ÖPNV an Lichtsignalanlagen. In: *Straßenverkehrstechnik* Bd. 62 (2018), Heft 4, S. 243–250.
- SCHÖBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A.: Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. In: *Anesthesia & Analgesia* Bd. 126 (2018), Nr. 5, S. 1763–1768.
- SCHRANK, D.; EISELE, B.; LOMAX, T.; BAK, J.: 2015 Urban Mobility Scorecard. Herausgegeben gemeinsam vom Texas A&M Transportation Institute und INRIX. College Station, TX: Texas A&M Transportation Institute, The Texas A&M University System und INRIX, Inc., August 2015.
- SCHREITER, T.; LINT, J.W.C.; TREIBER, M.; HOOGENDOORN, S.: Two fast implementations of the Adaptive Smoothing Method used in highway traffic state estimation. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1202–1208. 2010.
- SEN, A.; THAKURIAH, P. (VONU); ZHU, X.-Q.; KARR, A.: Frequency of Probe Reports and Variance of Travel Time Estimates. In: *Journal of Transportation Engineering* Bd. 123 (1997), Nr. 4, S. 290–297
- SIMRA: SimRa – Sicherheit im Radverkehr. Online-Dashboard. URL: <https://simra-project.github.io/dashboard/> (letzter Zugriff: 12.11.2024).

- SPANGLER, M.: *Reisezeitbasierte Verfahren für die Verkehrszustandsanalyse von städtischen Hauptverkehrsstraßen, Schriftenreihe / Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München*. München : Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Techn. Univ, 2009 — ISBN 978-3-937631-11-0
- STRAUSS, J.; MIRANDA-MORENO, L. F.: Speed, travel time and delay for intersections and road segments in the Montreal network using cyclist Smartphone GPS data. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* Bd. 57 (2017), S. 155–171
- SUGIARTO, S.; LIMANOOND, T.: Impact of On-street Parking on Urban Arterial Performance: A Quantitative Study on Travel Speed and Capacity Deterioration. In: *Aceh International Journal of Science and Technology* Bd. 2 (2013), Nr. 2
- TAO, S.; MANOLOPOULOS, V.; RODRIGUEZ, S.; RUSU, A.: Real-Time Urban Traffic State Estimation with A-GPS Mobile Phones as Probes. In: *Journal of Transportation Technologies* Bd. 02 (2012), Nr. 01, S. 22–31
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD: *Highway Capacity Manual*, 2006
- TREIBER, M.; KESTING, A.; WILSON, R. E.: Reconstructing the Traffic State by Fusion of Heterogeneous Data: Reconstructing the Traffic State by Fusion of Heterogeneous Data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 2011, 26 (6), 408–419.
- TSUBOTA, T.; BHASKAR, A.; CHUNG, E.: Macroscopic Fundamental Diagram for Brisbane, Australia: Empirical Findings on Network Partitioning and Incident Detection. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Bd. 2421 (2014), Nr. 1, S. 12–21
- U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION: *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*, 2019
- VAN AERDE, M.; HELLINGA, B.; YU, L.; RAKHA, H.: Vehicle probes as real-time ATMS sources of dynamic O-D and travel time data (1993), S. 207–230
- VORTISCH, P.; BUCK, S.; LEYN, U.: *Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA*, 2020
- WIEDEMANN, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses* Bd. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsweisen der Universität Karlsruhe (1974), Nr. Heft 8
- WOLFERMANN, A.; ALHAJYASEEN, W. K.; NAKAMURA, H.: Modeling speed profiles of turning vehicles at signalized intersections. In: *3rd International Conference on Road Safety and Simulation RSS2011, Transportation Research Board TRB, Indianapolis*, 2011, S. 1–17
- WU, X.; LU, Y.; LIN, Y.; YANG, Y.: Measuring the Destination Accessibility of Cycling Transfer Trips in Metro Station Areas: A Big Data Approach. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* Bd. 16 (2019), Nr. 15, S. 2641
- WÜNSCH, G.; BÖLLING, F.; VON DOBSCHÜTZ, A.; MIETH, P.: Bavarian Road Administration's use of Probe Data for Large-Scale Traffic Signal Evaluation Support. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Bd. 2487 (2015), Nr. 1, S. 88–95
- YANG, X.; STEWART, K.; TANG, L.; XIE, Z.; LI, Q.: A Review of GPS Trajectories Classification Based on Transportation Mode. In: *Sensors* Bd. 18 (2018), Nr. 11, S. 3741
- ZHENG, F.; VAN ZUYLEN, H.: Urban link travel time estimation based on sparse probe vehicle data. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 31 (2013), S. 145–157

VAN ZUYLEN, H. J.; ZHENG, F.; CHEN, Y.: Using Probe Vehicle Data for Traffic State Estimation in Signalized Urban Networks. In: BARCELÓ, J. ; KUWAHARA, M. (Hrsg.): *Traffic Data Collection and its Standardization, International Series in Operations Research & Management Science*. Bd. 144. New York, NY : Springer New York, 2010 — ISBN 978-1-4419-6069-6, S. 109–127

Bilder

Hinweis: Auszüge aus dem FGSV-Regelwerk sind mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesselinger Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

- Bild 2-1: Funktionsweise der Datenerfassung mit FCD (Eigene Darstellung)
- Bild 2-3: Darstellung eines Map-Matching-Prozesses von GPS-Positionen (schwarz) um einen Fahrtverlauf (grau) zu replizieren (NEWSON & KRUMM, 2009)
- Bild 2-4: Räumliche Definition der Untersuchungsstrecke (grün umrandet) im fansi-tool am Beispiel Braunschweig
- Bild 2-5: Fahrtzeitmessung ohne Map-Matching: Erfasste Fahrzeugmeldungen in den Start- und Ziel-Fangradien (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 2-6: FC-Meldungen aus Rohdaten mit farbcodierter Geschwindigkeit im Koordinatensystem. Oben ein Dienstag im September 2021, unten alle Werktage im September 2021
- Bild 2-7: Scatter-Plot für die Untersuchungsstrecke Hannover in Fahrtrichtung Nord-Süd mit FCD aus 2021
- Bild 2-8: Kontur-Plot für die Untersuchungsstrecke Hannover in Fahrtrichtung Nord-Süd mit FCD aus 2021
- Bild 2-9: Boxplot und Violinplot der Geschwindigkeitsverteilungen entlang einer Strecke
- Bild 2-10: Beispiel eines Violinplots einer Strecke mit einer großen und einer kleineren Störungsstelle
- Bild 2-11: Meldefrequenzen in den Rohdaten eines Anbieters
- Bild 2-12: Häufigkeitsverteilung des Positionsfehlers (US FEDERAL AVIATION AGENCY, 2021, links) und Fehler durch Offset (rechts) (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 2-13: Gegenüberstellung realer und synthetischer FCD (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-1: Übersichtskarte zum Straßenzug Kriegsstraße in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-2: Übersichtskarte zum Straßenzug Fiduciastraße in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-3: Übersichtskarte zum Straßenzug Vahrenwalder Straße, Arndtstraße und Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-4: Übersichtskarte zum Straßenzug Celler Straße – Langer Straße – Hagenbrücke in Braunschweig (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-5: Übersichtskarte zum Straßenzug Frankenforster Straße und Kölner Straße in Bergisch Gladbach (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-6: Übersichtskarte zur Indestraße (L 223) in Eschweiler (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-7: Übersichtskarte zur Verler Straße (L 757) in Gütersloh (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

- Bild 4-8: Übersichtskarte zur Elberfelder Straße, Wansbeckstraße und Nordstraße in Remscheid (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-9: Beispiel für den Aufbau der ANPR-Messgeräte
- Bild 4-10: Übersichtskarten des Messaufbaus Kriegsstraße in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-11: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße West in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-12: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße Mitte-West in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-13: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße Mitte-Ost in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-14: Detailkarten des Messaufbaus Kriegsstraße Ost in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-15: Übersichtskarten des Messaufbaus Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-16: Detailkarte Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße Nord in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-17: Detailkarte Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße Mitte in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-18: Detailkarte Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße Süd in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-19: Übersichtskarte des Messaufbaus Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-20: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 1 Vahrenwalder Straße - Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-21: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 2 Untersuchungsstrecke Vahrenwalder Straße - Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-22: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 3 Untersuchungsstrecke Vahrenwalder Straße - Schloßwender Straße in Hannover (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-23: Übersichtskarte des Messaufbaus Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-24: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 1 Untersuchungsstrecke Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-25: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 2 Untersuchungsstrecke Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-26: Detailkarte ANPR-Messquerschnitt 3 Untersuchungsstrecke Celler Straße – Hagenmarkt in Braunschweig (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 4-27: Interquartilsabstand bei Boxplots

- Bild 4-28: Fahrtzeiten Kriegsstraße stadteinwärts (Karlsruhe)
- Bild 4-29: Fahrtzeiten Kriegsstraße stadtauswärts (Karlsruhe)
- Bild 4-30: Fahrtzeiten Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße stadtauswärts (Karlsruhe)
- Bild 4-31: Fahrtzeiten Fiduciastraße – Killisfeldstraße – Ernst-Friedrich-Straße stadteinwärts (Karlsruhe)
- Bild 4-32: Fahrtzeiten Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße am 04.10.2021 (Hannover)
- Bild 4-33: Fahrtzeiten Vahrenwalder Straße – Schloßwender Straße am 11.10.2021 (Hannover)
- Bild 4-34: Fahrtzeiten Celler Straße – Hagenmarkt am 13.10.2021 (Braunschweig)
- Bild 4-35: Fahrtzeiten Celler Straße – Hagenmarkt am 18.10.2021 (Braunschweig)
- Bild 4-36: Vergleich von aufgezeichneten Fahrtzeiten mittels ANPR (oben) und FCD (unten)
- Bild 4-37: Korrelation zwischen FCD- und ANPR-Fahrtzeit
- Bild 4-38: Zusammenhang zwischen SQV-Wert und Anzahl erfasster Floating Cars pro Stunde
- Bild 4-39: Korrelationsdiagramm der Fahrtzeiten aller Stunden mit mehr als fünf aufgezeichneten Trajektorien
- Bild 5-1: Überlagerung von Nutzungsansprüchen (BAIER et al., 2003, BAIER, 2006)
- Bild 5-2: q-V-Beziehungen für Teilstrecken angebauter Hauptverkehrsstraßen mit einem normalbreiten Fahrstreifen im HBS (FGSV 2015)
- Bild 5-3: Histogramm (linke Achse) und Dauerlinie (rechte Achse) der Fahrtgeschwindigkeiten auf der Untersuchungsstrecke Hannover
- Bild 5-4: Reale FCD, die in den Fangradien zur Fahrtzeitberechnung liegen am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 5-5: Vergleich der Fahrtzeiten aus realen und synthetischen FCD vor der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd
- Bild 5-6: Vergleich der Fahrtzeiten aus realen und synthetischen FCD vor der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Süd-Nord
- Bild 5-7: Heatmaps der realen (oben) und simulierten (unten) FCD am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd
- Bild 5-8: Violinplots der realen (oben) und simulierten (unten) FCD am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd
- Bild 5-9: Übersichtskarten mit Streckenmeterangaben an wichtigen Punkten am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 5-10: Vergleich der Fahrtzeiten aus realen und simulierten FCD nach der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Nord-Süd
- Bild 5-11: Vergleich der Fahrtzeiten aus realen und simulierten FCD nach der Kalibrierung am Beispiel einer Untersuchungsstrecke in Karlsruhe, Fahrtrichtung Süd-Nord
- Bild 5-12: Verkehrszustände an der Zufahrt eines signalisierten Knotenpunktes (FOURATI & FRIEDRICH, 2021)
- Bild 6-1: Vissim-Modelle der Laborbeispiele
- Bild 6-2: Beispieldiagramme (Scatter-Plots), Laborbeispiel Knotenpunkt mit LSA, verschiedene Parameter
- Bild 6-3: Beispieldiagramme (Violin-Diagramme), Laborbeispiel Knotenpunkt mit LSA, verschiedene Parameter

- Bild 6-4: Visuelle Erkennbarkeit von Störungen in verschiedenen Diagrammarten bei verschiedenen Durchdringungsgraden und Meldeintervallen (grün = gut erkennbar, orange = im Ansatz erkennbar, rot = nicht erkennbar)
- Bild 6-5: Farbcodierte Darstellung der Störfallkennzahl entlang der Strecken der Laborbeispiele (bis Streckenmitte)
- Bild 7-1: Ergebnisse der automatischen Netzabschnitts-Erkennung am Beispiel Karlsruhe. Oben: erkannter Netzabschnitt Kriegsstraße - Ludwig-Erhardt-Allee; Mitte: erkannter Netzabschnitt Brauerstraße; rechts jeweils Liste der zum Netzabschnitt gehörenden Strecken und Histogramm der FC-Fahrtzeiten Unten: Karte als Orientierungshilfe (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 7-2: Störungsindikator aus Geschwindigkeitsverteilungen auf Linkbasis für Karlsruhe mit Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. (grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)
- Bild 7-3: Störungsindikator aus Geschwindigkeitsverteilungen auf Linkbasis für Karlsruhe ohne Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. (grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)
- Bild 7-4: Vergleich unterschiedlich ermittelter Fahrzeitverteilungen für einen Netzausschnitt. (Quelle: Screenshot Auswertewerkzeug Anbieter 4)
- Bild 7-5: Störungsindikator für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Karlsruhe (grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)
- Bild 7-6: Störungsindikator für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Hannover (grün $SI < 1$, gelb $1 \leq SI < 2$, rot $SI \geq 2$)
- Bild 7-7: Zuverlässigkeitsindex für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Karlsruhe (grün: $1 \leq ZI \leq 1.5$, gelb: $1.5 < ZI \leq 2$, rot: $ZI > 2$)
- Bild 7-8: Zuverlässigkeitsindex für automatisch identifizierte Netzabschnitte am Beispiel Hannover (grün: $1 \leq ZI \leq 1.5$, gelb: $1.5 < ZI \leq 2$, rot: $ZI > 2$)
- Bild 8-1: Aufgezeichnete GPS Tracks aus dem Projekt SimRa in Berlin aus dem Januar 2021, eingefärbt nach normierter Geschwindigkeit (kontinuierlicher Farbverlauf von rot nach grün, beginnend mit 0 km/h (rot)) (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 8-2: Ausschnitt aus den aufgezeichneten GPS-Tracks im Januar 2021 in Berlin, eingefärbt nach normierter Geschwindigkeit (kontinuierlicher Farbverlauf von rot nach grün, beginnend mit 0 km/h (rot)), Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)
- Bild 8-3: Sendepunkte mit einer Geschwindigkeit von 0 km/h, (Kartengrundlage: OpenStreetMap unter der Open Database License, © OpenStreetMap contributors)

Tabellen

Hinweis: Auszüge aus dem FGSV-Regelwerk sind mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

Tabelle 2.1: Vereinheitlichtes Format der FCD vor der Weiterverarbeitung

Tabelle 4.1: Auswertung Fahrtgeschwindigkeiten und SQV für Untersuchungsstrecke Braunschweig

Tabelle 4.2: SQV-Auswertung für alle Abschnitte der Erhebung

Tabelle 5.1: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs auf Strecken von Hauptverkehrsstraßen in Abhängigkeit der fahrtrichtungsbezogenen Kfz-Verkehrsdichte gemäß dem HBS (FGSV 2015)

Tabelle 5.2: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für verschiedene Verkehrsarten an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der mittleren bzw. maximalen Wartezeit gemäß dem HBS (FGSV 2015)

Tabelle 5.3: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für verschiedene Verkehrsarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der mittleren Wartezeit gemäß dem HBS (FGSV 2015)

Tabelle 5.4: Stufen der Angebotsqualität für den Kfz-Verkehr auf Netzabschnitten von Hauptverkehrsstraßen in Abhängigkeit des Fahrtgeschwindigkeitsindex gemäß dem HBS (FGSV 2015)

Tabelle 5.5: Aggregierte FCD-Fahrtgeschwindigkeiten in möglichen Zählzeiten in 15-Minuten-Intervallen

Tabelle 5.6: Vergleich der Fahrtzeiten aus FCD mit Fahrzeiten aus dem Verfahren des HBS (FGSV 2015)

Tabelle 5.7: Vergleich der Angebotsqualität aus Bestimmung durch FCD und Bestimmung durch Kapitel S6 des HBS (FGSV 2015)

Tabelle 7.1: Angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten des Kfz-Verkehrs in Abhängigkeit der Straßenkategorie gemäß den RIN (FGSV 2008)

Tabelle 7.2: Angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten des Kfz-Verkehrs in Abhängigkeit der Straßenkategorie gemäß der Änderung zur RIN (FGSV 2008) vom Mai 2015

Tabelle 7.3: Störungsindikatoren („KPI“ = „Key Performance Indicators“) aus BAWIDAMANN (2020b)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2024

V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen

Geistefeldt, Hohmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 379: Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)

Holldorb, Riel, Wiesler, Cypra, März

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 380: Maßnahmen zum Umgang mit japanischem Staudenknochen

Molder, Gaar, Münch, Alberternst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Lindner, Ruhnau, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 382: Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Ludwig, Tegeler, Schmedes, Tomhave, Hensel, Forster, Kleinhans, Heinrich, John, Schill

€ 19,50

V 383: Analyse und Entwicklung leistungsfähiger Einfahrtstypen ohne Fahrstreifenaddition für Autobahnen

Geistefeldt, Brandenburg, Sauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 384: Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen – Methoden zur Untersuchung und Metaanalyse

Maier, Leonhardt, Ehm

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 385: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstraßen

Geistefeldt, Hohmann, Finkbeiner, Sauer, Vortisch, Buck, Weyland, Weiser, Giuliani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2025

V 386: Pilothafte Anwendung des Bridge-WIM Verfahrens zur Ergänzung des Achslastmessstellennetzes

Firus, Petschacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 387: Akustische Wirksamkeit von Vegetation

Lindner, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 388: Hochaufgelöste multisensorielle Verkehrsdaten in der Streckenbeeinflussung

Schwietering, Löbbeling, Weinreis, Maier, Feldges

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 389: Lärmwetter in der Praxis – Erprobung und Weiterentwicklung der Methodik zur Anwendung meteorologischer Korrekturen auf die Schallausbreitung

Skowronek, Liepert, Müller, Schady, Elsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 390: Wirkung von Fahrstreifenbegrenzungen an Einfahrten von Autobahnen auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit

Geistefeldt, Sauer, Brandenburg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 391: Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien

Oehme, Böhm, Horn, Pourpart, Schweidler, Weinzierl, Fiebig, Schuck

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 392: Evaluierung der Wirksamkeit bestehender Überflughilfen für Fledermäuse an Straßen

Albrecht, Reers, Scharf, Grimm, Radford, Namyslo, Günther, Martin, Behr

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 393: Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

Schwietering, Löbbbering, Abarghooie, Geistefeldt, Marnach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 394: Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)

Schendzielorz, Schneider, Künzelmann, Sautter, Höger

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 395: Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität

Geistefeldt, Brandenburg, Vortisch, Buck, Zeidler, Baier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 396: Wirkung von Behandlungsanlagen der Straßenentwässerung im Hinblick auf AFS63

Rüter, Grotehusmann, Lambert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 397: Gestaltung innerörtlicher Verkehrswegenetze

Friedrich, Wohnsdorf, Gerike, Koszowski, Baier, Wothge

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 398: Verfahren für die Engpass- und Mängelanalyse im städtischen Hauptverkehrsstraßennetz

Vortisch, Buck, Fuchs, Grau, Friedrich, Hoffmann, Lelke, Baier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-855-3
<https://doi.org/10.60850/bericht-v398>

www.bast.de