

**Entwicklung
eines aktuellen,
echtzeit-verfügbaren
Key Performance
Indicator (KPI) Systems
für das deutsche
Autobahnnetz**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 342

bast

Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz

von

Lars Peter
Josef Janko
Norbert Schick

PTV Planung Transport Verkehr AG

Volker Waßmuth

PTV Transport Consult GmbH

Markus Friedrich
Jürgen Bawidamann

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 342

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 21.0059
Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz

Fachbetreuung
Kerstin Lemke

Referat
Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-575-0

Bergisch Gladbach, Mai 2021



Kurzfassung – Abstract

Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz

Zu den zentralen Aufgaben eines Verkehrsinfrastrukturbetreibers gehört neben der Gewährleistung einer hohen Verkehrssicherheit auch die Sicherung einer angemessenen Verkehrsablaufqualität. Ziel des Forschungsvorhabens war es, unter Berücksichtigung verschiedener Datenerfassungsmethoden ein System von Key-Performance-Indikatoren (KPI) zu entwickeln, das die kontinuierliche Bewertung der Verkehrsablaufqualität und der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur für ausgewählte Anwendungsfelder ermöglicht. Als Ergebnis wird ein Konzept für KPI-basierte Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität auf Autobahnen und ggf. auch Bundesstraßen entwickelt und eine Empfehlung für ein praktikables hybrides KPI-System gegeben.

Zunächst werden Kenngrößen zur Bewertung der Verkehrsablaufqualität beschrieben. Dabei werden drei Klassen von Kenngrößen unterschieden:

- Kenngrößen der Fahrtgeschwindigkeit und Fahrtzeit,
- Kenngrößen der Zuverlässigkeit,
- Kenngrößen der Verkehrsnachfrage.

Außerdem werden Methoden und Datenquellen dargestellt, mit denen die Daten erfasst werden können, die für die Ermittlung der KPI erforderlich sind. Dabei wird zwischen Fahrtzeitdaten und Nachfragedaten unterschieden.

Zum Zweck einer differenzierten Bewertung der KPI-Systeme werden mögliche Einsatzfelder untersucht, die sich bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung unterscheiden lassen:

1. Auswertungen zur Verkehrssituation in Eckwerten,
2. Engpassanalyse als Grundlage für die Bedarfsplanerstellung (BVWP),
3. Verfügbarkeitsermittlung,
4. Real-Time-Verkehrsmanagement.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Datenerfassungssysteme werden in der Konzeptentwick-

lung fünf KPI-Systeme beschrieben und bewertet, die jeweils eine primäre Datenquelle (ANPR, Bluetooth, stationäre Detektordaten (mit Modellerweiterung), Mobilfunkdaten, Floating-Car-Daten) nutzen. Dazu werden zunächst allgemeine Anforderungen an ein KPI-System formuliert. Anhand dieser Anforderungen werden die fünf KPI-Systeme dann bewertet. In der Praxis werden von den Verkehrszentralen bereits heute unterschiedliche Datenquellen genutzt, sodass ein hybrider Ansatz zur Bestimmung von KPI sinnvoll ist. Für ein hybrides KPI-System, das mehrere Datenquellen kombiniert, wird ein dreistufiger Ansatz gewählt und ebenfalls anhand der Anforderungen bewertet:

- Stufe 0: KPI-Basissystem mit stationären Detektordaten (SDD) – Basisfall.
- Stufe 1: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD) und Floating-Car-Daten (FCD).
- Stufe 2: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD), Floating-Car-Daten (FCD) und lokalen Erweiterungen.

Für die Bewertung werden die Aufwände der betrachteten KPI-Systeme beispielhaft abgeschätzt und den Nutzen je Anwendungsfall gegenübergestellt. Bei der Nutzenbewertung steht im Vordergrund, inwieweit die diskutierten Einsatzmöglichkeiten durch das jeweilige KPI-System abgedeckt werden. Zur Bewertungssynthese wird für die fünf KPI-Systeme ein Wirksamkeit-Kosten-Quotienten (WKQ) vorgeschlagen. Für die hybriden Systeme sollen dagegen die jeweiligen Zusatznutzen und -kosten im Vergleich zum Basisfall der Stufe 0 ermittelt werden. Im Ergebnis zeigt sich, dass tendenziell FCD die höchste Wirtschaftlichkeit aufweisen. Je nach Anwendungsfall liefern hybride Systeme einen praktikableren und realitätsnahen Ansatz zur Implementierung von KPI-Systemen.

Die Kostenannahmen und die Berechnung der jeweiligen Nutzenpunkte wurden in einer Excel-Mappe zusammengestellt, die als Berechnungswerkzeug im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt und dem Bericht beigelegt wird. Mit diesem Werkzeug lassen sich alle vom Auftragnehmer getroffenen Annahmen zu Kosten und Nutzen und die Gewichtung in Bezug auf die Anwendungsfelder flexibel anpassen, um verschiedene Szenarien zu berechnen. Für die Anwendung in der Praxis sollten die jeweiligen Entscheidungsträger alle Kostenannahmen sowie Gewichtungsfaktoren für die Anforderungserfüllung aus ihrer Sicht prüfen und die

Kostenannahmen durch eigene Kostenkalkulation unter Annahme eines angestrebten Ausbaubedarfs ersetzen.

Der geforderte webbasierte Prototyp zur exemplarischen Umsetzung eines KPI-Systems wurde auf Basis der Software PTV Optima mit dem Autobahnviereck aus A5, A8, A81 und A6 zwischen Heidelberg, Karlsruhe, Stuttgart und Heilbronn realisiert. Mit einer Evaluierung des Prototyps durch den Betreiberkreis wurde abschließend untersucht, wie die Nutzer das System bewerteten.

Development of an up-to-date, real-time available Key Performance Indicator (KPI) system for the German motorway network

In addition to ensuring a high level of traffic safety, the central tasks of a transport infrastructure operator also include ensuring an appropriate traffic flow quality. The aim of the research project was to develop a system of key performance indicators (KPI), taking into account various data collection methods, which allows the continuous evaluation of traffic flow quality and the performance of the traffic infrastructure for selected fields of application. As a result, a concept for KPI-based procedures for the evaluation of traffic quality on motorways and, if necessary, also federal highways is developed and a recommendation for a practicable hybrid KPI system is given.

At first, parameters for the evaluation of traffic flow quality are described. A distinction is made between three classes of parameters:

- Indicators of travel speed and travel time,
- Reliability indicators,
- Indicators of travel demand.

The methods and data sources that can be used to collect the data needed to determine the KPI are presented. A distinction is made between travel time data and demand data. For the purpose of a differentiated evaluation of the KPI systems, possible fields of application are examined, which can be distinguished with regard to their spatial and temporal resolution:

1. Evaluation of the traffic situation in key figures
2. Bottleneck analysis as a basis for the preparation of the network requirement plan (BVWP)

3. Availability analysis

4. Real-Time traffic management

Considering the different data acquisition systems, five KPI systems are described and evaluated in the concept development. Each of these uses a primary data source – ANPR, Bluetooth, stationary detector data (with model extension), mobile phone data or floating car data. For this purpose, general requirements for a KPI system are first formulated. The five KPI systems are then evaluated based on these requirements. In practice, different data sources are already used by regional traffic management centres. Therefore, a hybrid approach to determining KPI is reasonable. For a hybrid KPI system that combines several data sources, a three-step approach is chosen and also evaluated according to the requirements:

- Level 0: KPI base system with stationary detector data (SDD) – base case.
- Level 1: KPI system with stationary detector data (SDD) and floating car data (FCD).
- Level 2: KPI system with stationary detector data (SDD), floating car data (FCD) and local extensions.

For the evaluation, the efforts of the KPI systems under consideration are estimated exemplary and compared with the benefit per application. The benefit assessment focuses on the extent to which the discussed application possibilities are covered by the respective KPI system. For the evaluation synthesis an effectiveness-cost-quotient (Wirksamkeit-Kosten-Quotient – WKQ) is proposed for the five KPI systems. For the hybrid systems, on the other hand, the respective additional benefits and costs are to be determined in comparison to the base case of level 0. The result shows that FCDs tend to have the highest efficiency. Depending on the application, hybrid systems provide a more practical and realistic approach to implementing KPI systems.

The cost assumptions and the calculation of the respective benefit points were compiled in an Excel folder, which was developed as a calculation tool within the framework of this research project and is enclosed with the report. With this tool, all assumptions made by the authors regarding costs and benefits and the weighting in relation to the fields of application can be flexibly adjusted

to calculate different scenarios. For practical application, the decision-makers should check all cost assumptions and weighting factors for the fulfilment of requirements from their point of view and replace the cost assumptions by their own cost calculation assuming a targeted expansion requirement.

The required web-based prototype for the exemplary implementation of a KPI system was realized based on PTV Optima software with the motorway quadrangle consisting of A5, A8, A81 and A6 between Heidelberg, Karlsruhe, Stuttgart and Heilbronn. An evaluation of the prototype by the advisory board was used to find out how the users evaluated the system.

Summary

Development of an up-to-date, real-time available Key Performance Indicator (KPI) system for the German motorway network

1 Task definition

One of the central tasks of a transport infrastructure operator is to ensure a high level of traffic safety and an appropriate traffic flow quality, which enables smooth (ease) and undisturbed progress (availability) in road traffic. While road safety as a performance indicator can be analysed comprehensively in Germany and established assessment methods are available, the properties „ease“ and „availability“ cannot yet be sufficiently assessed. With the HBS (2015) and the RIN (2008), methods are available that assess the quality of traffic flow for a design period (e.g. n^{th} hour or peak traffic time of a typical working day). However, this does not allow any statements to be made on journey time or capacity reliability.

Such statements require comprehensive information on travel speeds and traffic volumes, from which the traffic situation can then be derived. Digitalisation in the traffic sector has opened up new possibilities for data acquisition. In addition to conventional stationary traffic data acquisition systems, the measurement of local speeds and traffic volumes or of section-related travel times with stationary installed infrastructure such as cameras or Bluetooth signal receivers is conceivable. For some years now, so-called floating car data have also been available, which make it possible to determine driving speeds in the entire road network and at all times.

The aim of the research project is to develop a system of key performance indicators – KPI – for the German motorway network, which will allow the continuous evaluation of traffic flow quality and the performance of the traffic infrastructure. The system should allow statements for individual network elements (routes and junctions), for network sections (e.g. stretches between motorway junctions) and for the entire route network. The calculation of KPIs is to be based on traffic-related measured values (speeds, travel times, traffic volumes). The system should be able to support,

among other things, demand planning, concessioning of network elements, planning of operational and maintenance measures as well as traffic management and traffic control measures. The feasibility of the KPI system is to be tested in a feasibility study, which considers the requirements for data availability, data completeness and network coverage as well as benefits and costs.

This results in the following procedure:

- Overview of possible data sources for calculating KPIs.
- Description of the possible applications of KPI-based evaluation systems.
- Development of KPI for the evaluation of traffic flow quality.
- Development of implementation concepts considering the available data sources and the implementation effort.
- Implementation of a web-based prototype interface for the presentation of KPI.
- Development of a system for a cost-benefit analysis to evaluate the concepts and derive recommendations.

2 Research methodology

To date, there is no uniform measure for recording and evaluating the quality of traffic flow in road networks. This lack makes an objective analysis of spatial and temporal disturbances of traffic flow difficult. The central result of this research project is a concept for a KPI-based method for the assessment of traffic quality on motorways and where applicable also on federal roads. The federal government can use such a KPI-based evaluation procedure for more efficient economic planning in various areas of activity. In this way, the system should be able to identify vulnerabilities in the network and thus be used as a basis for target-oriented demand planning. In the area of concessioning network sections within the framework of PPP projects, the system is intended to provide more precise basic information for the tendering process with regard to current network availability and performance, thus enabling better cost and revenue estimates. Furthermore, the system can be used to determine ex-post the realised availability

or ease of use on concessionary network sections. The system can also be used for planning traffic control systems (traffic information, dynamic signposting and similar). Finally, information from the system can be used to improve the planning of construction sites (consideration of weak points or prognosis of capacity bottlenecks) or to identify necessary maintenance measures.

The flow chart in figure 1 provides an overview of the procedure of the investigation and the assignment of the work steps to the chapters of the report.

State of the art (Chapter 2)

In a first step, the state of the art for capturing and evaluating the quality of traffic flow is documented. Characteristic values from literature are compiled, which are basically suitable as KPI for the evaluation of traffic flow quality. These parameters are then examined for their suitability in the subsequent concept development. In addition, methods and data sources are presented with which travel time data and demand data can be collected, which are necessary for the determination of the KPIs.

Possible applications and potential uses of KPI systems (Chapter 3)

In the next step, the catalogue of applications of a KPI system will be developed. The basis for the

compilation are the findings of a literature search and an expert survey aimed at finding ideas and collecting concepts from federal and state authorities. The results of the compilation will be systematically prepared for a catalogue of requirements and compiled into a general catalogue.

Concept development (Chapter 4)

In order to provide KPIs for the evaluation of traffic flow quality and performance, suitable data sources and parameters are required. In this work package five concepts are developed based on the available data collection methods:

- KPI system based on ANPR data,
- KPI system based on Bluetooth data (BT),
- KPI system based on stationary detector data (SDD) with model extensions (e.g. ASDA/ FOTO),
- KPI system based on mobile phone data (FPD),
- KPI system based on Floating Car Data (FCD).

In addition, hybrid systems consisting of a combination of the above concepts are being investigated.

Cost-benefit analysis (Chapter 5)

The developed concepts are to be evaluated according to their effort and overall benefit. When

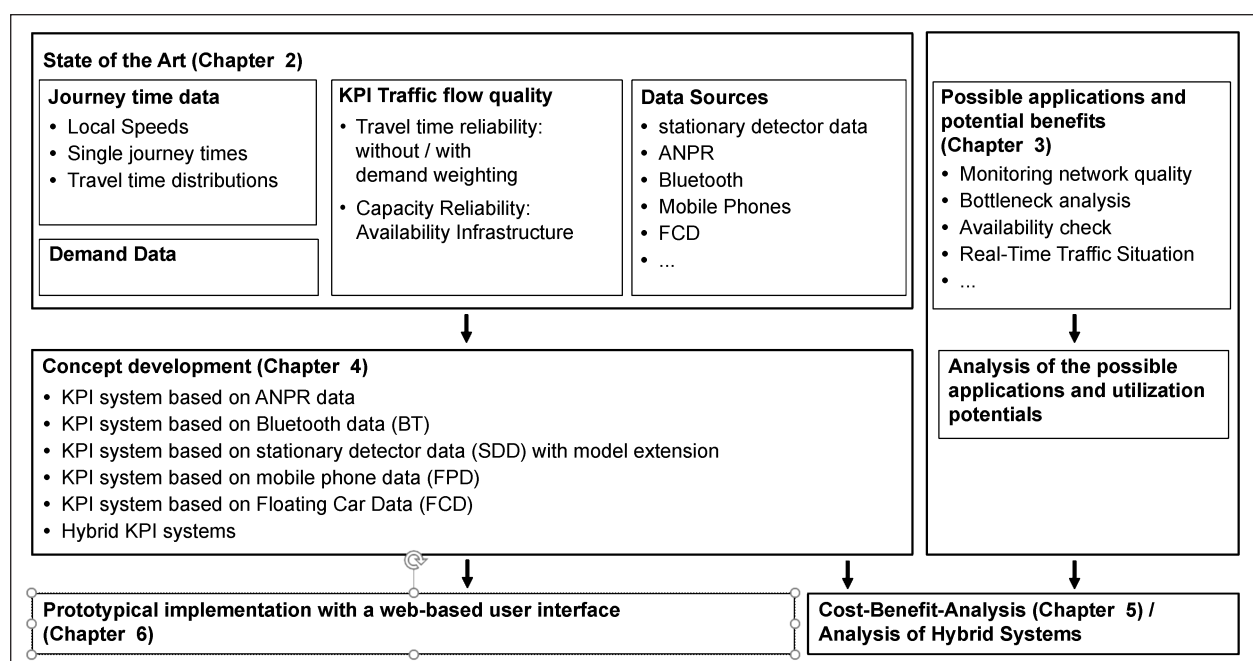


Fig. 1: Procedure

considering the KPIs, the focus is on the extent to which the discussed evaluation methods can be applied to the entire motorway network. The extension to the network of federal highways is also considered.

In order to evaluate the effort required, the costs for setting up and operating the system and for procuring the necessary data must be estimated for each KPI concept. Data procurement can involve the acquisition of commercial data or the costs of setting up and maintaining recording devices. The costs for setting up and operating the KPI systems can be divided into one-off system set-up costs, ongoing operating costs, and recurring maintenance costs. Assumptions must be made regarding the actual condition and the necessary expansion requirements.

In the benefit evaluation, the focus is on the extent to which the requirements of the defined use cases are covered by the respective KPI system. After the evaluation of the costs and the fulfilment of the requirements of each KPI system, the individual concepts are to be compared with each other. From this, a ranking of the concepts can then be created and a concrete recommendation for the system selection can be given. In a second step, an evaluation of the hybrid systems is to be carried out. Here, additional costs or additional benefits compared to a base case should be examined for each hybrid system and the results compared.

Construction of a prototype (Chapter 6)

In order to be able to test the analysis and evaluation possibilities of certain KPI concepts, a demonstrator with a web interface for selected KPI systems is set up. The prototype enables the user to graphically display various parameters in the network and, for example, to visualize quality differences in the route network. In addition to the visualization of real-time data, historical parameters can also be displayed and external data, such as construction site information, can be entered. In order to quickly evaluate traffic quality on larger network sections, spatially and temporally aggregated parameters are calculated and displayed in an overview.

3 Test results and conclusions for practice

The performance characteristics relevant to the research objective, which are basically suitable as key performance indicators for the evaluation of traffic flow quality, can be divided into three classes:

1. Parameters on travel speed and travel time – taking into account the possible levels of aggregation (e.g. temporal or spatial) as well as the possibilities of defining the target travel time (derived from the expected travel time or from a speed that is appropriate for planning purposes).
2. Parameters on reliability (quantification of the deviation of the actual travel time – actual travel time – from a target travel time to be defined).
3. Parameters of transport demand (quantification of the actual performance of a transport service and description of the transport behaviour of the transport users in passenger and freight transport).

The data sources and survey methods required to determine these parameters will be examined with their respective application possibilities and their advantages and disadvantages. In order to consider all relevant aspects of traffic flow quality, a KPI system should show the parameters listed in the table below. The parameters should be differentiated by car and HGV and weighted with demand.

The analysis of the possible applications of KPI-based evaluation systems for traffic flow quality resulted in the following use cases:

- Evaluations of the traffic situation in key data: Regular reports to evaluate the traffic situation based on measured historical traffic data, output in aggregated form, e.g. at federal or state level or for selected motorway sections.
- Bottleneck analysis as a basis for requirements planning: Overview of bottlenecks in the long-distance road network, e.g. for federal traffic route planning.
- Availability analysis as a basis for construction site optimization and maintenance planning or also in the context of the accounting of PPP projects.
- Traffic Management (Real-Time): Provision of up-to-date traffic information as a basis for

KPI	Unit	Calculation rule	Meaning
Total distance travelled	[Veh•km]	$L_{si} = l_s \cdot q_{si}$	quantifies the demand for transport
Total time spent at target speed	[Veh•h]	$T_{si}^{Target} = t_s^{Target} \cdot q_{si}$ $= \text{MIN}_{i \in I} (t_{si}^{P50}) \cdot q_{si}$	quantifies the theoretical time expenditure under normal traffic flow
Total time spent at actual speed	[Veh•h]	$T_{si}^{Curr} = t_{si}^{Curr} \cdot q_{si} = t_{si}^{Mean} \cdot q_{si}$	quantifies the average time expenditure
Total time lost	[Veh•h]	$T_{si}^{Delay} = T_{si}^{Curr} - T_{si}^{Target}$	quantifies the „congestion hours“ (user view)
Lost time per kilometer	[s/km]	$t_{si}^{DelayKm} = \frac{T_{si}^{Delay}}{L_{si}}$	standardizes the loss time for a comparison of traffic installations of different lengths
Travel time index	[-]	$f_{si}^{TTI,P50} = \frac{t_{si}^{P50}}{\text{MIN}_{i \in I} (t_{si}^{P50})}$	describes the extension of travel time usually to be expected in case of regular disturbances „scheduled or regular lost time“
Reliability index related to a percentile	[-]	$f_{si}^{RI,P90} = \frac{t_{si}^{P90}}{t_{si}^{P50}}$	describes the extension of travel time to be expected in case of irregular disturbances „unscheduled lost time“
Reliability index related to the mean value	[-]	$f_{si}^{RI,Mean} = \frac{t_{si}^{Mean}}{t_{si}^{P50}}$	describes the relationship between typical and average driving time
Punctuality index	[-]	$f_{si}^{PI,WT} = \frac{\sum_{i \in I} f(t_{si}^{Curr}, t_s^{Target})}{I}$ $f(t_{si}^{Curr}, t_s^{Target}) = \begin{cases} 1, & \text{if } t_{si}^{Curr} \leq t_s^{Target} \\ 0, & \text{if } t_{si}^{Curr} > t_s^{Target} \end{cases}$	describes the availability of the traffic facilities (operator view)
$i \in I$	Quantity I of periods i of a day, e.g. $I = 96$ for periods of 15 minutes		
$s \in S$	Quantity S of lines (or sections) s of a route S		

Tab. 1: Proposal for the selection of KPIs

traffic control and management, transparent and independent source of real-time data for traffic infrastructure operators.

As a result of the analysis, table 2 compares the individual use cases.

For concept development, the requirements for a KPI system are defined based on the findings on data sources and survey methods and on the analysis of use cases. For each concept the following characteristics are examined:

- Capture of traffic flow quality (spatial and temporal aggregation, differentiation between cars and HGV, etc.).
- Consideration of transport demand (demand weighting of KPIs in relation to persons, vehicles or vehicle classes, etc.).
- Suitability for different conditions of use (usability for road works and special weather events, suitability for integration into hybrid recording systems, suitability for recording places of disruption, suitability for short and medium-term forecasting and for forecasting measures).
- Quality that the concept should provide (accuracy, latency for real-time data, sample size, robustness, etc.).
- Requirements for data preparation and data storage (compliance with data protection, transparency of data preparation, quality of the data collected, procedure and effort for data preparation and data storage).
- Further requirements (recording of routes, recording of sources and destinations, expandability on federal roads, etc.).

	Key figures	Bottleneck analysis	Availability	Real-Time
Examples	Publication of congestion statistics from the public sector	Identification of bottlenecks for requirements planning	Impact of construction sites, accounting PPP, optimization of maintenance planning	Support of traffic management systems, operational service optimization
Data actuality	Historical	Historical	Historical	Real-Time
Temporal resolution of resulting key figures	Monthly to annual values	Annual values	Hourly to daily values	Minute values
Spatial resolution of resulting key figures	Aggregated nationally or on state level	Partial sections or net meshes	ca. 100 m up to sections	ca. 100 m
Interfaces to input data	not required	Construction sites	Construction sites, weather, accidents	Construction sites, weather, accidents
Interface to zu downstream systems	not required	Traffic forecast	May be necessary depending on the intended use	Platform solution incl. short-term forecast if necessary
Demand reference	where appropriate, transport demand	where appropriate, transport demand	Traffic density	Traffic density
Data storage	spatially and temporally aggregated	spatially and temporally aggregated	spatially and temporally differentiated	not required

Tab. 2: Overview of use cases

The five concepts differentiated according to the primary data source (ANPR, Bluetooth, stationary detectors with model extension, mobile radio data, floating car data) were evaluated and compared with regard to these requirements by comparing real measurement data (table 3). In practice, however, different data sources are already being used by traffic control centres, so that a hybrid approach for determining KPIs makes sense for several reasons:

- There is no possibility to record both the number of vehicles and the quality of traffic flow for partial routes in a timely and accurate manner with one data source.
- There are already numerous measuring points at which traffic volumes, speeds and meteorological data are continuously recorded.
- For specific requirements of traffic management, different data sources are already used on several network sections of the BAB network, which can be used for a KPI system.

For a hybrid KPI system that combines several data sources, a three-stage approach is chosen:

- Level 0: KPI base system with SDD – base case
- Level 1: KPI system with SDD and FCD
 - Level 1.1: KPI system for the use cases Key Figures and Requirement Plan – FCD are

procured and evaluated at longer intervals (e.g. annually) for all legs of the journey, aggregated by traffic day types and times of day. The KPIs are calculated at a central point. The statements of the KPIs refer to average annual values differentiated by traffic day and time of day.

- Level 1.2: KPI system for the use case Availability – FCD are procured at larger intervals (e.g. annually) for all legs of the journey as hourly values or more detailed. The evaluation uses mean trajectories, which are generated for the entire year and allow statements on percentiles. They can also be blended with construction site data. The KPIs are calculated at a central point. The statements of the KPIs refer to mean values and percentiles for any period of time.
- Level 1.3: KPI system for use case Real-Time Management – FCD are procured continuously (online) for all sections. The data are used decentralised for traffic management and operational service optimisation. In addition, large-scale KPI are calculated at a central point. The current KPI values can be compared with historical KPI values. Statements of the KPIs refer to mean values and percentiles for any period of time.
- Level 2: KPI system with SDD, FCD and local extensions

Requirement	Fulfilment of requirements				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Requirements to record the traffic flow quality					
KPI for all spatial reference levels					
link section	-	-	+	-	+
link	+	+	+	0	+
network section/parts of the network	+	+	0	+	+
KPI for all temporal aggregations	+	+	+	+	+
KPI based on travel time distributions					
mean	+	+	+	+	+
percentile	+	+	0	+	0
Classified by passenger cars and HGV	-	-	-	-	0
Requirements to consider travel demand					
KPI unweighted	+	+	+	+	+
KPI weighted with volume vehicles	+	+	+	0	+
KPI weighted with volume by vehicle class	0	0	-	0	0
KPI weighted with volume persons	-	-	-	-	-
Distance travelled vehicles	0	-	+	-	-
Distance travelled by vehicle class	-	-	+	-	-
Distance travelled persons	-	-	-	-	-
Traffic volume (Number of individual vehicles)	+	-	0	-	-
Requirements for specific applications					
Suitability for road works	-	+	-	+	+
Suitability for extreme weather events	0	+	+	+	+
Suitability for hybrid recording with other travel time sources	+	+	+	+	+
Suitability for fusion with road work data and accident data	0	0	-	0	+
Suitability for recording turning movements	0	0	0	-	-
Suitability for identifying the location of a disturbance	-	-	0	-	+
Suitability for a short-term forecast	0	0	+	0	0
Suitability for a middle-term forecast	+	+	+	+	+
Suitability for a forecast of measures	-	-	0	-	-
Requirements concerning quality					
Transparency of the data processing steps	+/0	+/0	0	+/0	-
High accuracy of travel times (raw data)	+	+	0	0	+
High accuracy of travel time distributions	+	0	0	+	+
High accuracy of the disturbance location	-	-	0	0	+
Low latency for online use	0	0	+	0	+
Robustness in case of data source failure	+	+	0	-	-
Representativity of the sample	+	0		0	+
Evidence on sample size	+	+		+	+

Tab. 3: Comparison of requirements and fulfilment of requirements for the five KPI systems based on a primary data source (ANPR, Bluetooth (BT), stationary detector data (SDD) with model extension, mobile phone data (FPD), floating car data (FCD))

Requirement	Fulfilment of requirements				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Requirements concerning data processing and storage					
Central calculation of KPI at a central federal office	+	+	0	+	+
Decentralized calculation of KPI following a uniform standard in the traffic control centres	0	0	0	-	+
Low effort to determine the KPI from the data source	0	0	0	-	+
Compliance with data protection requirements	0	0	+	0	+
Further requirements					
Recording of routes/through traffic	+	0	-	+	-
Recording of origins and destinations	+	0	-	+	-
Extension to federal roads	-	-	-	+	+

Tab. 3: Continuation

- Level 2.0: KPI system with SDD and model-based journey time determination – Level 2.0 builds directly on Level 0 and does not use FCD. The SDD are used for model-based travel time determination. The focus is on the application case of traffic management. Level 2.0 is used on network sections with a high probability of congestion.
- Level 2.1: KPI system with SDD and FCD and model-based driving time determination – This extension uses the additional analysis and forecasting possibilities of model-based driving time determination. It is used on network sections with a high probability of congestion.
- Level 2.2: KPI system with SDD and FCD and ANPR/Bluetooth – This extension uses ANPR or Bluetooth data to make statements about route selection, turn percentages and compliance rates of traffic control systems. It can be limited to subnetworks with alternative routes and network control.

For these hybrid systems, too, the fulfilment of requirements is examined and evaluated for each application (table 4).

For the evaluation of KPI system concepts with the help of cost-benefit analysis, the degree of fulfilment of requirements is to be translated into benefit points on a scale of 0 to 100 points. The evaluation system developed for this purpose allows an individual weighting of the requirements as well as the use cases to be able to configure the evaluation

procedure adapted to the respective problem and to carry out sensitivity analyses.

For the evaluation of the efforts, the costs for each of the KPI concepts have to be estimated for each of the above-mentioned cost types. An effectiveness/cost ratio (WKQ) is then to be determined for the evaluation synthesis. This will include the benefits derived from the fulfilment of the requirements and the estimated annuitized costs. The result of the WKQ is to be understood as a value that indicates how many benefit points the individual concepts achieve per unit of cost used (in millions of Euros per year).

The cost assumptions and the calculation of the respective benefit points were compiled in an Excel folder, which was developed as a calculation tool within the framework of this research project and is enclosed with the report. With this tool, all the assumptions made on costs and benefits and the weighting in relation to the fields of application can be flexibly adjusted to calculate different scenarios. Since the assumptions, especially with regard to costs, are qualified but simplified estimates, the respective decision-maker should check all assumptions for the implementation of the cost-benefit analysis and replace them with his own cost calculations assuming a targeted expansion requirement.

Based on the exemplary calculations, however, trends can already be derived. Due to the much higher costs of the other collection methods, the best results tend to be obtained when considering both a primary data source and hybrids using FCD. However, the WKQ is not determined for the hybrid sys-

	Fulfilment of requirements						
	Level 0	Level 1.1	Level 1.2	Level 1.3	Level 2.0	Level 2.1	Level 2.2
Requirement to measure quality of traffic flow							
KPI for all spatial reference levels							
link section	-	+	+	+	0	+	+
link	+	+	+	+	+	+	+
network section/parts of the network	+	+	+	+	-	+	+
KPI for all temporal aggregations	+	-	+	+	+	+	+
KPI based on travel time distributions – mean	(+)	+	+	+	+	+	+
KPI based on travel time distributions – percentile	(+)	-	+	+	+	+	+
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	(+)	0	0	0	0	0	0
Requirements to consider travel demand							
KPI unweighted	+	+	+	+	+	+	+
KPI weighted with volume vehicles	+	+	+	+	+	+	+
KPI weighted with volume by vehicle class	(+)	0	0	0	0	0	0
KPI weighted with volume persons	-	-	-	-	-	-	-
Distance travelled vehicles	+	+	+	+	+	+	+
Distance travelled by vehicle class	+	+	+	+	+	+	+
Distance travelled persons	-	-	-	-	-	-	-
Traffic volume (Number of individual vehicles)	-	-	-	-	+	+	+
Requirement for different operating conditions							
Suitability for road works	-	+	+	+	-	+	+
Suitability for extreme weather events	+	+	+	+	+	+	+
Suitability for fusion with road work data and accident data	(+)	-	+	+	+	+	+
Suitability for recording turning movements	-	-	-	-	-	-	0
Suitability for identifying the location of a disturbance	-	-	+	+	+	+	+
Suitability for a short-term forecast	-	-	-	0	+	+	0
Suitability for a middle-term forecast	+	-	0	+	+	+	+
Suitability for a forecast of measures	-	-	-	-	0	0	-
Requirements concerning quality							
Transparency of the data processing steps	+	0	0	+/0	+/0	+/0	+
High accuracy of travel times (raw data)	-/0*	+	+	+	0/+	+	+
High accuracy of travel time distributions	-	0	+	+	0/+	+	+
High accuracy of the disturbance location	-	+	+	+	0/+	+	+
Low latency for online use	+			+	+	+	+
Robustness in case of data source failure	0	+	+	+	0	+	+
Representativity of the sample	+	+	+	+	+	+	+
Evidence on sample size	+	+	+	+	+	+	+
<p>Explanations</p> <p>(+) Statement is only valid to a limited extent, as travel time data derived directly from SDD are not of sufficient quality</p> <p>* The quality of travel time data from SDD can be influenced by the detector density</p>							

Tab. 4: Requirements fulfilment for six expansion stages of a hybrid KPI system

	Fulfilment of requirements						
	Level 0	Level 1.1	Level 1.2	Level 1.3	Level 2.0	Level 2.1	Level 2.2
Requirements concerning data processing							
Low effort to determine the KPI from the data source	o	+	o	o	o	o	o
Compliance with data protection requirements	+	+	+	+	+	+	o
Further requirements							
Recording of routes/through traffic	-	-	-	-	-	-	+
Recording of origins and destinations	-	-	-	-	-	-	+
Extension to federal roads	-	+	+	+	-	-	-
Comparability on a national level	+/o	+	+	+	o	+	+
Explanations (+) Statement is only valid to a limited extent, as travel time data derived directly from SDD are not of sufficient quality * The quality of travel time data from SDD can be influenced by the detector density							

Tab. 4: Continuation

tems, but rather the respective additional benefits and costs compared to the base case of level 0.

The result shows the tendency that the hybrid systems of levels 1.1 and 1.2, have a high additional benefit for the applications for which they were designed despite comparatively low costs. Regarding the benefits, this statement also applies to level 1.3, but this is counteracted by the higher additional costs. Levels 2.1 and 2.2 show clear additional benefits in comparison to Level 0, but these are associated with very high additional costs, especially for Level 2.2. However, it must be taken into account that these hybrid systems with local extension would only be used on those parts of the network where a closer look at the traffic situation (e.g. by ANPR or modelled journey time calculation) is useful and justifies the additional costs. Level 2.0 consistently shows a lower additional benefit compared to the hybrid systems using FCD, which is partly due to the fact that this system does not allow nationwide comparison analyses. However, since the additional costs are very low and high-quality KPIs are, so to speak, dropped as a by-product, Level 2.0 certainly has a regional right to exist.

The required web-based prototype for the exemplary implementation of a KPI system was realized on the basis of the PTV Optima software. The software can collect (real-time) input data from various sources, locate them geographically, save them in a (GIS) database and merge them, calculate characteristic quantities (KPI) and display them in a clear and concise manner. In addition, the chosen variant

simulates real-time operation based on historical data, so that data that is not available in real-time can also be used. The study area was the motorway quadrangle consisting of the A5, A8, A81 and A6 between Heidelberg, Karlsruhe, Stuttgart and Heilbronn. In addition to a route network and historical FCD speed data from TomTom, counting point data and construction site information from BAST were used in the prototype. In order to be able to calculate traffic weighted KPIs for the entire network used, the sample sizes supplied by TomTom are extrapolated as a lump sum using the counter values. Based on the existing data, the prototype allows the creation of different KPIs with spatial or temporal aggregation. Some KPIs are provided predefined, such as traffic volume weighted travel time losses or a travel time index calculated from the ratio of the travel time of TomTom to the travel time at free traffic flow. An evaluation of the prototype by the group of supervisors investigated how users evaluate the system.

Inhalt

Glossar	17	2.4.5 Vergleich der Fahrzeitermittlungs- verfahren	54
Formeln	19	2.5 Datenquellen für Verkehrsnachfrage- daten	57
1 Aufgabenstellung und Vorgehens- weise	21	2.6 Ergänzende Datenquellen	59
1.1 Aufgabenstellung	21	2.7 Integriertes System zur Bewertung der Zuverlässigkeit	59
1.2 Vorgehensweise	21	2.8 KPI-Systeme in der Qualitäts- sicherung	60
2 Stand der Technik zur Erfassung und Bewertung der Verkehrs- ablaufqualität	24	2.9 KPI-Systeme im Verkehrsmanage- ment	61
2.1 Kenngrößen der Fahrtgeschwindigkeit und Fahrtzeit	25	3 Anwendungsmöglichkeiten und Nutzenpotenziale von KPI- Systemen	62
2.1.1 Einzelfahrtzeiten und Fahrtzeitvertei- lungen	25	3.1 Mögliche Anwendungstypen von KPI-Systemen	62
2.1.2 Zeitliche Aggregation von Fahrtzeit- daten	26	3.2 Auswertungen zur Verkehrssituation in Eckwerten	63
2.1.3 Räumliche Aggregation von Fahrt- zeitdaten	26	3.3 Engpassanalyse als Grundlage für die Bedarfsplanerstellung	64
2.1.4 Soll-Fahrtzeit, Ist-Fahrtzeit und Verlustzeit	28	3.4 Verfügbarkeitsermittlung	65
2.1.5 Repräsentative Fahrtzeiten	29	3.5 Real-Time Verkehrsmanagement	67
2.2 Kenngrößen der Zuverlässigkeit	30	3.6 Zusammenfassung der Anwendungsfälle	67
2.2.1 Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten	33	4 Konzeptentwicklung	68
2.2.2 Zuverlässigkeit aus der Ausfall- sicherheit	38	4.1 Anforderungen an ein KPI-System zur Erfassung der Verkehrsablauf- qualität	69
2.2.3 Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit	40	4.2 KPI-System basierend auf ANPR- Daten	74
2.3 Kenngrößen der Verkehrsnachfrage	41	4.2.1 Systemaufbau	74
2.4 Datenquellen für Geschwindigkeits- und Fahrtzeitdaten	44	4.2.2 Testdaten	74
2.4.1 Fahrzeitermittlung mit verkehrsnach- fragebasierter Fahrtzeitmodellierung	44	4.2.3 Anforderungserfüllung	77
2.4.2 Fahrzeitermittlung mit verkehrs- zustandsbasierter Fahrtzeitmodel- lierung	48	4.3 KPI-System basierend auf Bluetooth-Daten (BT)	79
2.4.3 Fahrzeitermittlung mit raumdiskreter Fahrtzeitmessung	49	4.3.1 Systemaufbau	79
2.4.4 Fahrzeitermittlung mit raumkonti- nuierlicher Fahrtzeitmessung	53	4.3.2 Testdaten	79
		4.3.3 Anforderungserfüllung	80

4.4	KPI-System basierend auf stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung	83	5.4	Bewertung der hybriden KPI-Systeme	120
4.4.1	Systemaufbau	83	5.4.1	Kosten hybrider Lösungen	120
4.4.2	Testdaten	83	5.4.2	Nutzen hybrider Lösungen	126
4.4.3	Anforderungserfüllung	85	5.4.3	Vergleich der hybriden Lösungen	130
4.5	KPI-System basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)	87	6	Prototypische Umsetzung mit einer webbasierten Benutzeroberfläche	130
4.5.1	Systemaufbau	87	6.1	Aufbau des Prototyps	130
4.5.2	Testdaten	87	6.2	Inhalt des Prototyps – zugrundeliegende verkehrliche Daten	131
4.5.3	Anforderungserfüllung	87	6.2.1	Streckennetz und Floating-Car-Data von TomTom	131
4.6	KPI-System basierend auf Floating-Car-Data (FCD)	91	6.2.2	Zählstellendaten	132
4.6.1	Systemaufbau	91	6.2.3	Hochrechnung von Verkehrsstärken	132
4.6.2	Testdaten	91	6.2.4	Baustelleninformationen	133
4.6.3	Anforderungserfüllung	91	6.3	Erstellung von KPI im Prototyp	133
4.7	Vergleich der KPI-Systeme	95	6.4	Zur Bereitstellung des Prototyps	136
4.8	Einsatz hybrider KPI-Systeme	97	6.5	Nutzungsbedingungen der beschafften Daten	137
4.8.1	Stufe 0: KPI-Basissystem mit stationären Detektordaten (SDD)	97	6.6	Bewertung des Prototyps	137
4.8.2	Stufe 1: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD) und Floating-Car-Data (FCD)	98	6.7	Fazit zur prototypischen Umsetzung	141
4.8.3	Stufe 2: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD), Floating-Car-Data (FCD) und lokalen Erweiterungen	99	7	Zusammenfassung und Fazit	141
4.8.4	Anforderungserfüllung eines mehrstufigen KPI-Systems	100	Literatur	142	
4.9	Empfehlungen für KPI	102	Bilder	144	
5	Kosten-Nutzen-Analyse	103	Tabellen	146	
5.1	Kosten der untersuchten Erfassungsmethoden	104	Das Excel-Tool ist über das elektronische BAST-Archiv ELBA unter https://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.		
5.1.1	Angaben zum Autobahnnetz und zur Anzahl der Erhebungsquerschnitte	104			
5.1.2	Kosten der untersuchten Datenerfassungssysteme	107			
5.1.3	Zusammenstellung der Kosten	115			
5.2	Nutzen der untersuchten Erfassungsmethoden	115			
5.3	Wirksamkeits-Kosten-Analyse der Erfassungsmethoden	118			

Glossar

API	Application Programming Interface. Eine API ist eine Programmierschnittstelle, mit der Daten zwischen Softwareanwendungen ausgetauscht werden können. Anbieter von Fahrzeitdaten stellen die Daten zum Teil über eine API bereit.	FPD (netFCD)	Floating Phone Daten. Positionsbestimmung von Mobiltelefonen werden über die Mobilfunkzelle oder den Mobilfunkzellenverbund vorgenommen.
ANPR	Automated Number Plate Recognition. ANPR-Systeme ermöglichen eine automatische Erkennung von Kfz-Kennzeichen.	FSD	Floating-Smartphone-Daten. Positions- und Zeitdaten, die mit einem in einem Smartphone eingebauten GNSS erfasst werden.
ASDA-FOTO	Automatische Staudynamikanalyse – Forecasting of Traffic Objects	GIS	Geografisches Informationssystem
BT	Bluetooth ist eine Methode zur Übertragung von Daten zwischen Geräten über kurze Distanz	GNSS	Globales Navigationssatellitensystem. Vorhandene und geplante GNSS sind GPS, Galileo, GLO-NASS und Beidou.
Datumsbereich	Ein Datumsbereich umfasst eine Menge von Kalendertagen. Ein Datumsbereich ist für die Festlegung der Tage erforderlich, für die historische Fahrzeiten analysiert werden.	HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS (2015)
Fahrtgeschwindigkeit	Mittlere Geschwindigkeit zwischen zwei Punkten im Netz	Heatmap	(Konturplot, Weg-Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm) Bezeichnet eine Darstellung, in der Geschwindigkeiten abhängig von Ort und Zeit eingetragen werden.
Fahrzeit	Zeitaufwand für eine Ortsveränderung in einem Fahrzeug zwischen zwei Punkten im Netz	Kenngröße (Indikator)	Eine Kenngröße ist ein Maß, das den Zustand eines Systems durch einen Kennwert quantifiziert. Beispiel für Kenngrößen sind die Fahrzeit, die Verlustzeit oder die Verkehrsleistung. Eine Kenngröße kann eine Eingangsgröße für eine Bewertung sein.
FCD	Floating-Car-Daten. Positions- und Zeitdaten, die mit einem im Fahrzeug eingebauten GNSS erfasst werden.	KPI	Key-Performance-Indikator. Eine Kenngröße, die besonders geeignet ist, um einen Zustand (z. B. die Verkehrsablaufqualität) zu beschreiben.
FRC	Functional Road Class oder Straßenfunktionsklasse. Die Straßenfunktionsklasse klassifiziert die Strecken eines Straßennetzes. Die Klassifizierung orientiert sich dabei an der Bedeutung der Straße. Die Klassifizierung erfolgt so, dass das Netzmodell auch dann routingfähig bleibt, wenn Straßen einer untergeordneten Straßenfunktionsklasse (z. B. Erschließungsstraßen) aus dem Netz entfernt werden. Eine FRC entspricht nicht genau der in Deutschland verwendeten Straßenklassen.	Luftlinienverbindung	Eine Luftlinienverbindung ist die geradlinige Verbindung von einer Quellzelle zu einer Zielzelle. Eine Menge ausgewählter Luftlinienverbindungen wird in einer Luftlinienmatrix abgelegt.
		Netzabschnitt	Ein Netzabschnitt ist eine Folge von Netzelementen auf einem Verkehrsweg mit gleicher Verbin-

	dungsfunktionsstufe und gleicher Kategoriengruppe, also gleicher Kategorie.	Teilstrecke	Teil einer Strecke. Kommerzielle Anbieter von FCD unterteilen Strecken in Abschnitte, um so Geschwindigkeitsdaten räumlich differenzierter bereit stellen zu können.
MQ	Messquerschnitt. Ort im Straßennetz, an dem Messdaten erfasst werden. Dieser Ort kann je nach Art der Erfassung Daten einer Richtung oder beider Richtungen erfassen	Trajektorie – Einzelfahrzeug	Eine Trajektorie beschreibt den Zeit-Weg-Verlauf eines einzelnen Fahrzeugs
Ort, Punkt, Verkehrszelle	Jede Ortsveränderung hat einen Start und ein Ziel. In einem Routensuchalgorithmus sind Start und Ziel immer als ein Punkt (Knoten) im Raum definiert. Bei Verkehrsmodellen wird dieser Punkt durch eine Verkehrszelle definiert. Bei Orten (z. B. Gemeinden oder POI) wird jedem Ort genau ein Punkt zugeordnet.	Trajektorie – mittlere	Eine Trajektorie, die aus einer Heatmap abgeleitet wird, wird als mittlere Trajektorie bezeichnet. Sie ergibt sich aus einer dynamischen Fahrzeitermittlung. Hierfür werden für alle überfahrenen Strecken die Fahrzeiten zum Zeitpunkt der Durchfahrt verwendet.
POI	Point of Interest. Allgemeine Bezeichnung für einen Punkt im Raum, der über eine Bezeichnung (z. B. Flughafen X) referenziert wird. POI können in POI-Kategorien gegliedert werden.	Untersuchungsraum	Ein Untersuchungsraum definiert den Raum, für den die KPI ermittelt werden. Er kann eine Strecke, einen Streckenzug, einen Netzabschnitt, ein Teilnetz oder das Gesamtnetz umfassen.
qHits	Stichprobengröße, die von TomTom zusammen mit historischen Geschwindigkeitsdaten (TomTom Stats) geliefert werden.	Untersuchungszeitraum (Analysezeitraum)	Ein Untersuchungszeitraum definiert eine längere Zeitspanne, die sich aus einer Menge (elementarer) Zeiträume gleicher Dauer zusammensetzt. Der Untersuchungszeitraum kann sich je nach der Aufgabenstellung auf unterschiedliche Zeitspannen beziehen. Typische Untersuchungszeiträume sind ein Tag, eine Woche, ein Monat oder ein Jahr.
RIN	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN, 2008)		Um die Kenngrößen eines Untersuchungszeitraums zu bestimmen, werden die Kenngrößen der Zeiträume auf geeignete Weise aggregiert.
Route	Eine Route setzt sich aus mehreren Strecken oder Netzabschnitten zusammen, die den räumlichen Verlauf einer Ortsveränderung von einem Quellort zu einem Zielort beschreibt. Zwischen zwei Orten kann es mehr als eine Route geben.	Verbindung (Relation, Quelle-Ziel-Beziehung)	Eine Verbindung ist eine gerichtete Verknüpfung zweier Orte bzw. Verkehrszellen.
SDD	Stationäre Detektor-Daten. Daten zum Verkehrszustand, die mit stationären Detektoren ermittelt werden. Typische SDD umfassen die Verkehrsstärke und die lokale Geschwindigkeit.	Verbindungsfunktionsstufe (VFS)	Die Verbindungsfunktionsstufe kennzeichnet die Bedeutung einer Verbindung von einer Quellzelle zu einer Zielzelle. Sie ergibt sich aus der Bedeutung der verbindenden Zellen gemäß dem
Strecke	Eine Strecke ist ein Verkehrsweg zwischen zwei Knotenpunkten.		
Streckenzug	Ein Streckenzug ist eine Folge von Strecken. Er kann kürzer oder länger sein als ein Netzabschnitt		

t_{gSDi}	Fahrtzeit für Fahrzeugklasse g auf dem Streckenzug S im Untersuchungszeitraum D bei Abfahrt am Start des Streckenzugs im Tageszeitraum i [min]	q_{gsi}	Verkehrsstärke der Verkehrselemente g auf der Strecke s im Zeitraum i [Verkehrselemente/Zeitraum] Mögliche Indizes: g, G, s, d, D, i, I
	$t_{SDi} = \sum_{s \in S} t_{sDi}$		$q_{gsi} = \sum_{g \in G} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} \sum_{s \in r_{mn}} d_{gmni}$
t_{gSDI}	mittlere Fahrtzeit für Fahrzeugklasse g über alle Zeiträume I eines Tages auf dem Streckenzug S im Untersuchungszeitraum D [min]	T_{si}	Verkehrszeitaufwand einer Strecke s im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, s, d, D, i, I
			$T_{si} = t_{si} \cdot q_{si}$
t_i^{Curr}	Ist-Fahrtzeit im Tageszeitraum i [min] Mögliche Indizes: g, s, S, d, D, i, I	T_{Si}	Verkehrszeitaufwand eines Streckenzug S im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, S, d, D, i, I
t_i^{Delay}	Verlustzeit im Tageszeitraum i [min] Mögliche Indizes: g, s, S, d, D, i, I		$T_{Si} = \sum_{s \in S} t_{si} \cdot q_{si}$
t^{Target}	Soll-Fahrtzeit [min] Mögliche Indizes: g, s, S	L_{si}	Verkehrsleistung einer Strecke s im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, s, d, D, i, I
t_i^P	Perzentil der Fahrtzeit im Zeitraum i [min] Mögliche Indizes: g, s, S, d, D, i, I		$L_{si} = l_s \cdot q_{si}$
t_i^{Mean}	Mittlere Fahrtzeit im Zeitraum i [min] Mögliche Indizes: g, s, S, d, D, i, I	L_{Si}	Verkehrsleistung eines Streckenzug S im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, S, d, D, i, I
v_i	Fahrtgeschwindigkeit im Zeitraum i [km/h]		$L_{Si} = \sum_{s \in S} l_s \cdot q_{si}$
l	Länge, auf die sich die Fahrtzeit bezieht Mögliche Indizes: s, S		
d_{gmni}	Verkehrsnachfrage der Verkehrselemente g zwischen den Knoten n und m eines Streckenzugs im Zeitraum i [Verkehrselemente/Zeitraum] Mögliche Indizes: g, G, m, n, d, D, i, I		
d_{gSi}	Verkehrsaufkommen eines Streckenzug S im Zeitraum i , d. h. die Anzahl der an den Knoten m des Streckenzugs einfahrenden Verkehrselemente Mögliche Indizes: g, G, S, d, D, i, I		
	$d_{gSi} = \sum_{m \in N} d_{gmni}$		

1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

1.1 Aufgabenstellung

Zu den zentralen Aufgaben eines Verkehrsinfrastrukturbetreibers gehört die Gewährleistung einer hohen Verkehrssicherheit und einer angemessenen Verkehrsablaufqualität, die ein flüssiges Vorankommen (Leichtigkeit) und ein ungestörtes Vorankommen (Verfügbarkeit) im Straßenverkehr ermöglicht. Während die Verkehrssicherheit als Leistungsgröße in Deutschland flächendeckend analysiert werden kann und etablierte Bewertungsmethoden vorliegen, können die Eigenschaften „Leichtigkeit“ und „Verfügbarkeit“ noch nicht ausreichend beurteilt werden. Mit dem HBS (2015) und den RIN (2008) stehen Verfahren zur Verfügung, die die Angebotsqualität des Verkehrsablaufs für einen Bemessungszeitraum (z. B. n-te Stunde oder Hauptverkehrszeit eines typischen Werktags) bewerten. Damit sind jedoch keine Aussagen zur Fahrtzeitzuverlässigkeit oder zur Kapazitätsszuverlässigkeit möglich.

Solche Aussagen erfordern umfassende Informationen zu Fahrtgeschwindigkeiten und Verkehrsstärken, aus denen dann die Verkehrslage abgeleitet werden kann. Durch die Digitalisierung im Verkehrsbereich haben sich neue Möglichkeiten der Datenerfassung entwickelt. Neben den konventionellen stationären Verkehrsdatenerfassungssystemen stehen seit einigen Jahren auch sogenannte Floating-Car-Daten zur Verfügung. Die Lokalisierung und Verfolgung von Fahrzeugen mit GNSS-Geräten oder über Sim-Karten im Mobilfunknetz ermöglichen es, Fahrtgeschwindigkeiten im gesamten Straßennetz und zu allen Zeiten zu ermitteln. Die Verfügbarkeit dieser Floating-Car bzw. Floating-Device-Daten ermöglicht eine kontinuierliche Erfassung der „Leichtigkeit“ und „Verfügbarkeit“ im Straßennetz. Denkbar ist aber auch die Messung von lokalen Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken oder von abschnittsbezogenen Fahrtzeiten mit stationär installierter Infrastruktur wie Kameras oder Bluetooth-Signal-Empfängern.

Daten aus kontinuierlichen Geschwindigkeitsmessungen haben zur Entwicklung verschiedener Kenngrößen (Indikatoren) geführt. So veröffentlichten z. B. die Firmen TomTom und INRIX jährlich Kenngrößen, mit denen sie den Verkehrsablauf in Städten qualifizieren. Diese Kenngrößen liefern in der Tendenz ähnliche Aussagen, unterscheiden

sich aber bei den Berechnungsvorschriften. Außerdem stehen den Firmen keine Verkehrsnachfragedaten zur Verfügung, sodass fundierte Aussagen zu Verlustzeitstunden nicht möglich sind.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, ein System von Key-Performance-Indikatoren (KPI) für das deutsche Autobahnnetz zu entwickeln, das die kontinuierliche Bewertung der Verkehrsablaufqualität und der Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht. Das System soll Aussagen für einzelne Netzelemente (Strecken und Knotenpunkte), für Netzabschnitte (z. B. Streckenzüge zwischen Autobahnkreuzen) und für das gesamte Streckennetz erlauben. Die Berechnung der KPI soll auf der Basis verkehrstechnischer Messwerte (Geschwindigkeiten, Fahrtzeiten, Verkehrsstärken) erfolgen. Das System soll unter anderem die Bedarfsplanung, die Konzessionierung von Netzteilen, die Planung von betrieblichen Maßnahmen und Unterhaltungsmaßnahmen sowie auch Maßnahmen des Verkehrsmanagements und der Verkehrssteuerung unterstützen können. Die Umsetzbarkeit des KPI-Systems soll in einer Machbarkeitsstudie überprüft werden, welche die Anforderungen an Datenverfügbarkeit, Datenvollständigkeit und Netzabdeckung sowie das Kosten-Nutzen-Verhältnis berücksichtigt.

Daraus ergibt sich folgendes Vorgehen:

- Überblick über mögliche Datenquellen zur Berechnung von KPI.
- Beschreibung der Anwendungsmöglichkeiten KPI-basierter Bewertungssysteme.
- Erarbeitung von KPI zur Bewertung der Verkehrsablaufqualität.
- Erarbeitung von Implementierungskonzepten unter Berücksichtigung der verfügbaren Datenquellen und des Umsetzungsaufwands.
- Umsetzung einer webbasierten prototypischen Oberfläche zur Darstellung von KPI.
- Aufbau einer Systematik für eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Bewertung der Konzepte und Ableitung von Empfehlungen

1.2 Vorgehensweise

Bisher existiert kein einheitliches Maß zur Erfassung und Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs in Straßennetzen. Dieser Mangel erschwert

eine objektive Analyse von räumlichen und zeitlichen Störungen des Verkehrsablaufs.

Zentrales Ergebnis dieses Forschungsvorhabens soll ein Konzept für ein KPI-basiertes Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität auf Autobahnen und ggf. auch Bundesstraßen sein. Der Bund kann ein solches KPI-basiertes Bewertungsverfahren für eine effizientere wirtschaftliche Planung in verschiedenen Aufgabenbereichen nutzen. So soll das System Schwachstellen im Netz identifizieren und somit für eine zielgerichtete Bedarfsplanung eingesetzt werden können. Im Bereich der Konzessionierung von Netzabschnitten im Rahmen von ÖPP-Projekten soll das System genauere Basisinformationen für die Ausschreibung bezüglich der heutigen Netzverfügbarkeit und Leistungsfähigkeit liefern und so bessere Kosten- und Erlösabschätzungen ermöglichen. Außerdem kann das System verwendet werden, um ex-post die realisierte Verfügbarkeit bzw. Leichtigkeit auf konzessionierten Netzabschnitten zu ermitteln. Auch der Einsatz im Bereich der Planung von Anlagen der Verkehrssteuerung ist denkbar (Verkehrsinformation, Wechselwegweisung und ähnliches). Schließlich können Informationen aus dem System zur Verbesserung bei der Baustellenplanung (Berücksichtigung von Schwachstellen bzw. Prognose von Kapazitätsengpässen) oder auch zur Identifikation notwendiger Unterhaltsmaßnahmen eingesetzt werden.

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

Stand der Technik zur Erfassung und Bewertung der Verkehrsablaufqualität (Kapitel 2)

In einem ersten Arbeitsschritt wird der Stand der Technik zur Erfassung und Bewertung der Verkehrsablaufqualität dokumentiert. Es werden Kenngrößen aus der Literatur zusammengestellt, die grundsätzlich als KPI für die Bewertung der Verkehrsablaufqualität in Frage kommen. Diese Kenngrößen werden dann bei der nachfolgenden Konzeptentwicklung auf ihre Eignung untersucht. Außerdem werden Methoden und Datenquellen dargestellt, mit denen Fahrzeitdaten und Nachfragedaten erfasst werden können, die für die Ermittlung der KPI erforderlich sind.

Anwendungsmöglichkeiten und Nutzungspotenziale von KPI-Systemen (Kapitel 3)

In einem nächsten Schritt wird der Anwendungskatalog eines KPI-Systems aufgebaut. Grundlage für die Zusammenstellung sind die Erkenntnisse der Literaturrecherche und eine Expertenbefragung zur Ideenfindung und zum Zusammentragen von Konzepten bei Bundes- und Landesbehörden. Die Ergebnisse der Zusammenstellung werden für ei-

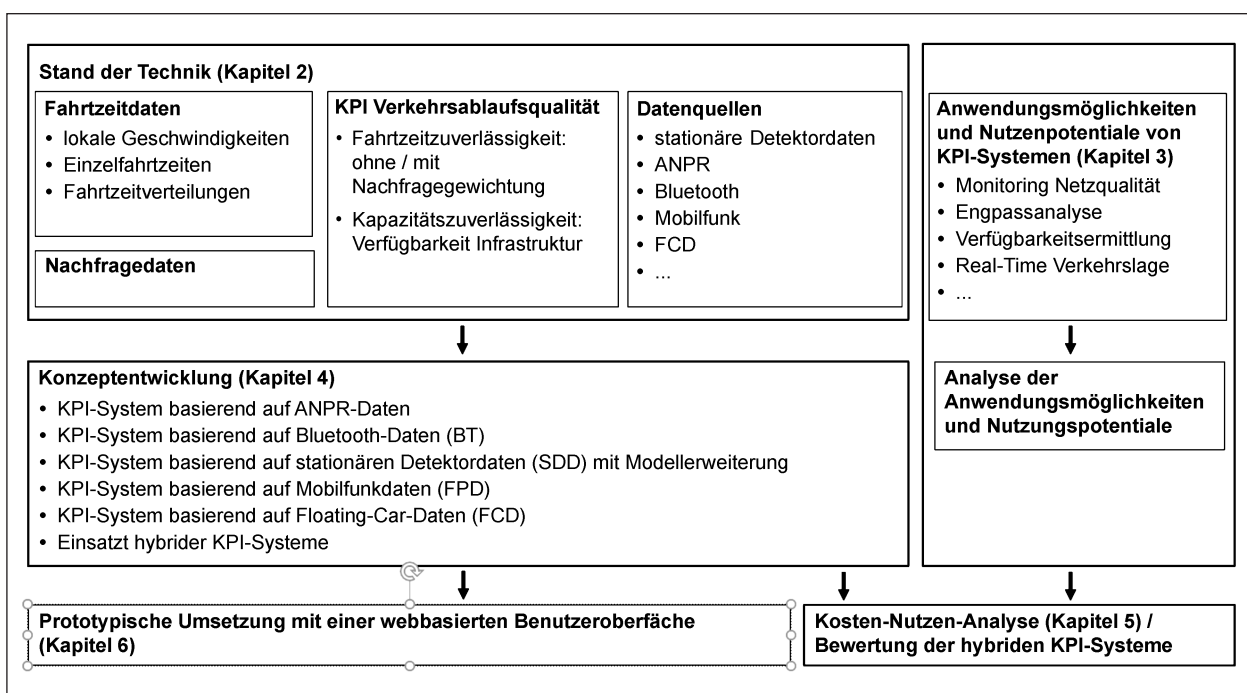


Bild 1-1: Vorgehensweise

nen Anforderungskatalog systematisch aufbereitet und zu einem Gesamtkatalog zusammengefasst.

In diesem Umfeld sind verschiedene Anwendungen möglich. Das BMVI benötigt für die Bedarfsplanung eine Übersicht über Engstellen im Fernstraßennetz, die über ein KPI-System zur Verfügung gestellt werden kann. Auch die Bereitstellung von aktuellen Verkehrslageinformationen, die von verschiedenen kommerziellen Anbietern im Internet angeboten werden, ist ein möglicher Anwendungsfall. Eine transparente und unabhängige Informationsquelle für Echtzeitdaten kann hier für Verkehrsinfrastrukturbetreiber von großem Interesse sein. Darüber hinaus können auch gemessene historische Verkehrsdaten zur Bewertung der Verkehrssituation beispielsweise in Form monatlicher Berichte herangezogen werden. Dabei könnten Werte auf Bundes- oder Landesebene aggregiert ausgegeben oder auch differenzierte Auswertungen zu ausgewählten Autobahnstrecken durchgeführt werden.

Auch die Verfügbarkeitsberechnung im Rahmen von ÖPP-Projekten kann als Anwendungsmöglichkeit genannt werden. Gemäß der aktuellen Abrechnungsregelung für private Investoren erfolgt die Vergütung nach der Verfügbarkeit der konzessionierten Teilstrecken (als Nachfolge des belastungsabhängigen A-Modells nach Bundesfernstraßenfinanzierungsgesetz). Ein KPI-System ist prinzipiell in der Lage, die erforderlichen Grundlagen zu ermitteln.

Konzeptentwicklung (Kapitel 4)

Um KPI zur Bewertung der Verkehrsablaufqualität und Leistungsfähigkeit bereitstellen zu können, sind geeignete Datenquellen und Kenngrößen erforderlich. In diesem Arbeitspaket werden fünf Konzepte aufbauend auf den verfügbaren Datenerfassungsmethoden entwickelt:

- KPI-System basierend auf ANPR-Daten,
- KPI-System basierend auf Bluetooth-Daten (BT),
- KPI-System basierend auf stationären Detektordaten (SDD),
- KPI-System basierend auf Mobilfunkdaten (FPD) und
- KPI-System basierend auf Floating-Car-Daten (FCD).

Zusätzlich werden hybride Systeme untersucht, die aus einer Kombination der genannten Konzepte bestehen.

Die Erfahrung bei der Aufbereitung und Analyse von Messdaten und der Ableitung von Kenngrößen aus den Messdaten zeigt, dass die Nutzung realer Daten im Rahmen einer Konzeptentwicklung wichtige Hinweise auf die Umsetzbarkeit bzw. auf die Spezifikation eines Konzepts liefern kann. Jede Datenquelle hat Besonderheiten, die bei der Datenaufbereitung berücksichtigt werden müssen und die auch die Nutzbarkeit einer Datenquelle für ein KPI-System einschränken können. Deshalb werden für die Konzeptentwicklung – soweit wie möglich – reale Daten herangezogen. Mit diesen Daten werden für jedes Konzept folgende Eigenschaften untersucht:

- Eignung für die Bereitstellung von räumlich und zeitlich differenzierten KPI der Verkehrsablaufqualität,
- Eignung für die Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage durch eine Nachfragegewichtung der KPI,
- Nutzbarkeit für verschiedene Einsatzbedingungen (Nutzbarkeit bei Baustellen und besonderen Wetterereignissen, Eignung zur Integration in hybride Erfassungssysteme, Eignung für eine Erfassung von Störungsorten, Eignung für eine Kurz- und Mittelfristprognose und eine Maßnahmenprognose),
- Transparenz der Datenaufbereitung und Qualität der erfassten Daten,
- Vorgehensweise und Aufwand bei der Datenaufbereitung und Datenhaltung und
- Erfüllung weitergehender Anforderungen (Erfassung von Routen, Erfassung von Quellen und Zielen, Erweiterbarkeit auf Bundesstraßen).

Kosten-Nutzen-Analyse (Kapitel 5)

Die entwickelten Konzepte werden nach ihren Aufwänden und gesamtheitlichen Nutzen bewertet. Bei der Betrachtung der KPI steht im Vordergrund, inwieweit die diskutierten Bewertungsverfahren auf dem gesamten Autobahnnetz eingesetzt werden können. Hierbei wird auch die Erweiterung auf das Netz der Bundesstraßen mitberücksichtigt.

Für die Bewertung der Aufwände werden für jedes geeignete KPI-System die Kosten für die Beschaf-

fung und die Speicherung der Daten abgeschätzt. Bei der Datenbeschaffung kann es sich um den kommerziellen Datenerwerb handeln oder aber auch um die Kosten für Aufstellung und den Unterhalt von Erfassungsgeräten. Aufgrund des Umfangs der zu verarbeitenden Daten dürfen die Kosten der Datenspeicherung nicht vernachlässigt werden. Hierbei werden die Kosten von Cloudlösungen einer Speicherung der Daten in eigenen Serverzentren gegenübergestellt. Die Kosten für den Aufbau und Betrieb der KPI-Systeme lassen sich in einmalige Systemaufbaukosten, laufende Betriebskosten und wiederkehrende Wartungskosten aufteilen und werden in einer übersichtlichen tabellarischen Darstellung erfasst.

Bei der Nutzenbewertung steht im Vordergrund, inwieweit die Anforderungen der definierten Anwendungsfälle durch das jeweilige KPI-System abgedeckt werden. Nach der Bewertung der Kosten und der Anforderungserfüllung jedes KPI-Systems werden die einzelnen Konzepte gegenübergestellt und untereinander verglichen. Hieraus wird dann eine Rangordnung der Konzepte erstellt und eine konkrete Empfehlung zur Systemauswahl gegeben. In einem zweiten Schritt wird eine Bewertung der hybriden Systeme durchgeführt. Dabei werden Zusatzkosten bzw. zusätzliche Nutzen gegenüber einem Basisfall für jedes hybride System untersucht und die Ergebnisse gegenübergestellt.

Prototypische Umsetzung mit einer webbasierten Benutzeroberfläche (Kapitel 6)

Um die Analyse und Auswertemöglichkeiten von bestimmten KPI-Konzepten testen zu können, wird ein Demonstrator mit Weboberfläche für ein oder mehrere KPI-Systeme aufgebaut. Der Prototyp wird es dem Nutzer ermöglichen, verschiedene Kenngrößen im Netz grafisch darzustellen und beispielsweise Qualitätsunterschiede im Streckennetz zu visualisieren. Neben der Visualisierung von Echtzeitdaten können auch historische Kennwerte dargestellt werden und externe Daten, wie Baustelleninformationen, eingepflegt werden. Um die Verkehrsqualität auf größeren Netzabschnitten schnell bewerten zu können, werden räumlich und zeitlich aggregierte Kenngrößen berechnet und in einer Übersicht dargestellt.

2 Stand der Technik zur Erfassung und Bewertung der Verkehrsablaufqualität

In diesem Kapitel werden zuerst Kenngrößen beschrieben, die grundsätzlich als Key-Performance-Indikator für die Bewertung der Verkehrsablaufqualität in Frage kommen. Dabei werden drei Klassen von Kenngrößen unterschieden:

- Kenngrößen der Fahrtgeschwindigkeit und Fahrtzeit: Fahrtgeschwindigkeiten bzw. Fahrtzeiten sind elementare Kenngrößen zur Beschreibung der Verkehrsablaufqualität aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden.
- Kenngrößen der Zuverlässigkeit: aus beobachteten Fahrtzeitverteilungen können Kenngrößen abgeleitet werden, die Aussagen zur Zuverlässigkeit machen.
- Kenngrößen der Verkehrsnachfrage: bei einer Bewertung der Verkehrsablaufqualität beschreibt die Verkehrsnachfrage die Zahl der betroffenen Verkehrsteilnehmenden. Die Nachfrage dient der Gewichtung einzelner Verkehrszustände.

Danach werden Methoden und Datenquellen dargestellt, mit denen die Daten erfasst werden können, die für die Ermittlung der KPI erforderlich sind. Dabei wird zwischen Fahrtzeitdaten und Nachfragearten unterschieden.

Im letzten Teil des Kapitels wird eine in der Literatur dokumentierte Vorgehensweise zur Entwicklung von Zuverlässigkeitsindikatoren dargestellt.

Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität haben eine räumliche und eine zeitliche Dimension. Räumlich beschreiben sie die Verkehrsablaufqualität in einem Untersuchungsraum, der unterschiedliche Ausprägung haben kann:

- Strecke zwischen zwei Knotenpunkten bzw. Anschlussstellen,
- Streckenzug oder Netzabschnitt als Menge von Strecken einer Straße, z. B. einer Autobahn und
- Teilnetz oder Gesamtnetz, das mehrere oder alle Netzabschnitte umfasst.

Zeitlich bezieht sich die Verkehrsablaufqualität auf eine gewisse Zeitspanne. In diesem Bericht werden zwei Arten von Zeitspannen unterschieden:

- **Zeitraum:** Ein Zeitraum definiert einen Teil eines Tages. Er unterteilt einen Tag in eine Menge elementarer Zeiträume gleicher Dauer. Die Dauer des Zeitraums definiert die zeitliche Auflösung, in der die Kenngrößen für die Ermittlung der Verkehrsablaufqualität erfasst werden. Geeignete Dauern sind 3 Minuten, 5 Minuten, 15 Minuten und 60 Minuten.
- **Untersuchungszeitraum:** Ein Untersuchungszeitraum definiert eine längere Zeitspanne, die sich aus einer Menge elementarer Zeiträume gleicher Dauer zusammensetzt. Der Untersuchungszeitraum kann sich je nach der Aufgabenstellung auf unterschiedliche Zeitspannen beziehen. Typische Untersuchungszeiträume sind ein Tag, eine Woche, ein Monat oder ein Jahr. Um die Kenngrößen eines Untersuchungszeitraums zu bestimmen, werden die Kenngrößen der Zeiträume auf geeignete Weise aggregiert.

2.1 Kenngrößen der Fahrtgeschwindigkeit und Fahrtzeit

Grundlage aller Kenngrößen zur Beschreibung der Verkehrsablaufqualität sind Geschwindigkeits- bzw. Fahrtzeitdaten für Abschnitte des Straßennetzes. Die Fahrtzeit ist allgemein die Zeit, die für eine Ortsveränderung mit einem Verkehrsmittel zwischen zwei beliebigen Punkten im Netz zu einem Zeitpunkt oder in einem Zeitraum benötigt wird. Die Fahrtzeit kann sich je nach Lage der betrachteten Punkte auf verschiedene Teile im Netz beziehen. Dabei können die folgenden räumlichen Bezugsebenen unterschieden werden:

1. Die Fahrtzeit einer Teilstrecke.
 2. Die Fahrtzeit einer Strecke zwischen zwei Knotenpunkten des Verkehrsnetzes.
 3. Die Fahrtzeit eines Streckenzugs oder Netzabschnitts.
 4. Die Fahrtzeit einer Route.
 5. Die Fahrtzeit einer Relation. Sie kann sich aus der Fahrtzeit einer oder mehrerer Routen ergeben, die die Quelle und das Ziel der Relation verbinden.
- Gegenstand dieses Forschungsprojektes ist das Netz der Bundesautobahnen und der Bundesstraßen, sodass die Bezugsebenen 1 bis 3 von

Bedeutung sind. Die Aussagen in diesem Abschnitt beziehen sich meist auf Fahrtzeiten, sie gelten aber analog für Geschwindigkeiten.

2.1.1 Einzelfahrtzeiten und Fahrtzeitverteilungen

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

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

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

1. **Vorgabe von äquidistanten Perzentilklassen:** Es werden die Fahrtzeiten angegeben, die die Fahrzeuge eines Perzentils erreichen.
2. **Vorgabe von äquidistanten Fahrtzeiten:** Es werden die Anteile der Fahrzeuge angegeben, die in eine vorgegebene Fahrtzeitklasse fallen.

Kommerzielle Datenanbieter verwenden die erste Methode und stellen Fahrtzeitdaten (bzw. Geschwindigkeitsdaten) als Perzentilklassen von 5 % zur Verfügung. Vorteil der ersten Methode ist, dass die Klassenanzahl unabhängig von der Streckenlänge ist. Nachteil der ersten Methode ist, dass sich

zwei Fahrtzeitverteilungen nicht aufsummieren lassen. Bei der zweiten Methode können die Fahrtzeitverteilungen zweier Zeiträume durch Aufsummieren zu einer Fahrtzeitverteilung aggregiert werden, wenn für jeden Zeitraum nicht nur der Anteil, sondern auch die Zahl der Fahrzeuge bekannt ist.

2.1.2 Zeitliche Aggregation von Fahrtzeitdaten

Wird eine Fahrtzeitverteilung für einen Zeitraum aus einer zufälligen Stichprobe von Einzelfahrtzeiten ermittelt, ist die Verteilung immer nachfragegewichtet, d. h. Fahrtzeit- und Nachfrageschwankungen innerhalb des Zeitraums werden berücksichtigt.

Liegen Fahrtzeitverteilungen als Perzentile für mehrere Zeiträume vor, können die Fahrtzeitverteilungen der Zeiträume nicht aggregiert werden. Bild 2-1 zeigt für ein Beispiel, in dem Fahrtzeitverteilungen für drei Zeiträume aus den Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen abgeleitet werden. Die Verteilungen der elementaren Zeiträume 06:00 – 07:00 und 07:00 – 08:00 lassen sich nicht zu einer Verteilung für den aggregierten Zeitraum 06:00 – 08:00 zusammenfassen.

Anders als die Perzentile einer Verteilung können die Mittelwerte zweier Verteilungen zu einem Mittelwert aggregiert werden, wenn die Zahl der Beobachtungen für jede Verteilung bekannt ist.

2.1.3 Räumliche Aggregation von Fahrtzeitdaten

Fahrtzeitdaten für längere Entfernungen können direkt aus Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen abgeleitet werden, wenn die Zahl der beobachteten Fahrzeuge ausreichend hoch ist. Hinweise zur Stichprobengröße für Fahrtzeitmessungen finden sich in OTTERSTÄTTER und FRIEDRICH (2011). Auf Autobahnen ist der Anteil des Fernverkehrs in der Regel ausreichend, sodass Fahrtzeiten über Entfernungen von 100 km und mehr direkt gemessen werden können, sofern alle oder fast alle Fahrzeuge erfasst werden. Dies ist bei einer Erfassung mit ANPR gegeben.

Die räumliche Aggregation der Fahrtzeitdaten von Teilstrecken zu längeren Entfernungen ist für mittlere Fahrtzeiten durch einfache Aufsummierung möglich. Fahrtzeitverteilungen können jedoch nur dann aufsummiert werden, wenn sich die beobachteten

Häufigkeitsverteilungen durch eine geeignete mathematische Funktion beschreiben lassen. Bei Annahme einer Normalverteilung gilt Folgendes:

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

Allerdings ist die Annahme einer Normalverteilung bei Fahrtzeitverteilungen in der Regel nicht gegeben. Eine Aufsummierung von Perzentilen der Fahrtzeit über mehrere Teilstrecken liefert deshalb keine korrekten Ergebnisse. Vermutlich ist der Fehler bei hohen Perzentilen (lange Fahrtzeit, z. B. P90%) höher als bei niedrigen Perzentilen (kurze Fahrtzeit, z. B. P10%). Auf einem Streckenzug, auf dem sich Fahrzeuge im Verkehrszustand „Stop-and-Go“ bewegen, wird sich ein Fahrzeug auf einer Teilstrecke relativ lange aufhalten und deshalb dem Perzentil P90% zugeordnet. Sobald das Fahrzeug im Stau aufrückt, wird es die folgende Teilstrecke mit einer etwas höheren Geschwindigkeit befahren und deshalb einem Perzentil zugeordnet, das unterhalb des Perzentils P90% liegt. Es ist deshalb unwahrscheinlich, dass ein Fahrzeug auf einem Streckenzug bei gestauten Verkehrszuständen immer einem hohen Perzentil zugeordnet wird. Bei freiem Verkehrsfluss kann das anders sein, da hier die Fahrzeugführer die Geschwindigkeit entsprechend ihren individuellen Präferenzen wählen können.

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

- Statische Fahrtzeit
ist die Fahrtzeit auf einem Netzabschnitt oder einer Route, die sich bei einer Fahrt zu einem bestimmten Zeitpunkt oder Zeitraum ergibt. Hierfür werden für alle überfahrenen Strecken die Fahrtzeiten des gleichen Zeitpunkts oder Zeitraums verwendet.

- Dynamische Fahrtzeit ist die Fahrtzeit auf einem Netzabschnitt oder einer Route, die sich für einen bestimmten Abfahrzeitpunkt ergibt. Hierfür werden für alle überfahrenen Strecken die Fahrtzeiten zum Zeitpunkt der Durchfahrt verwendet.

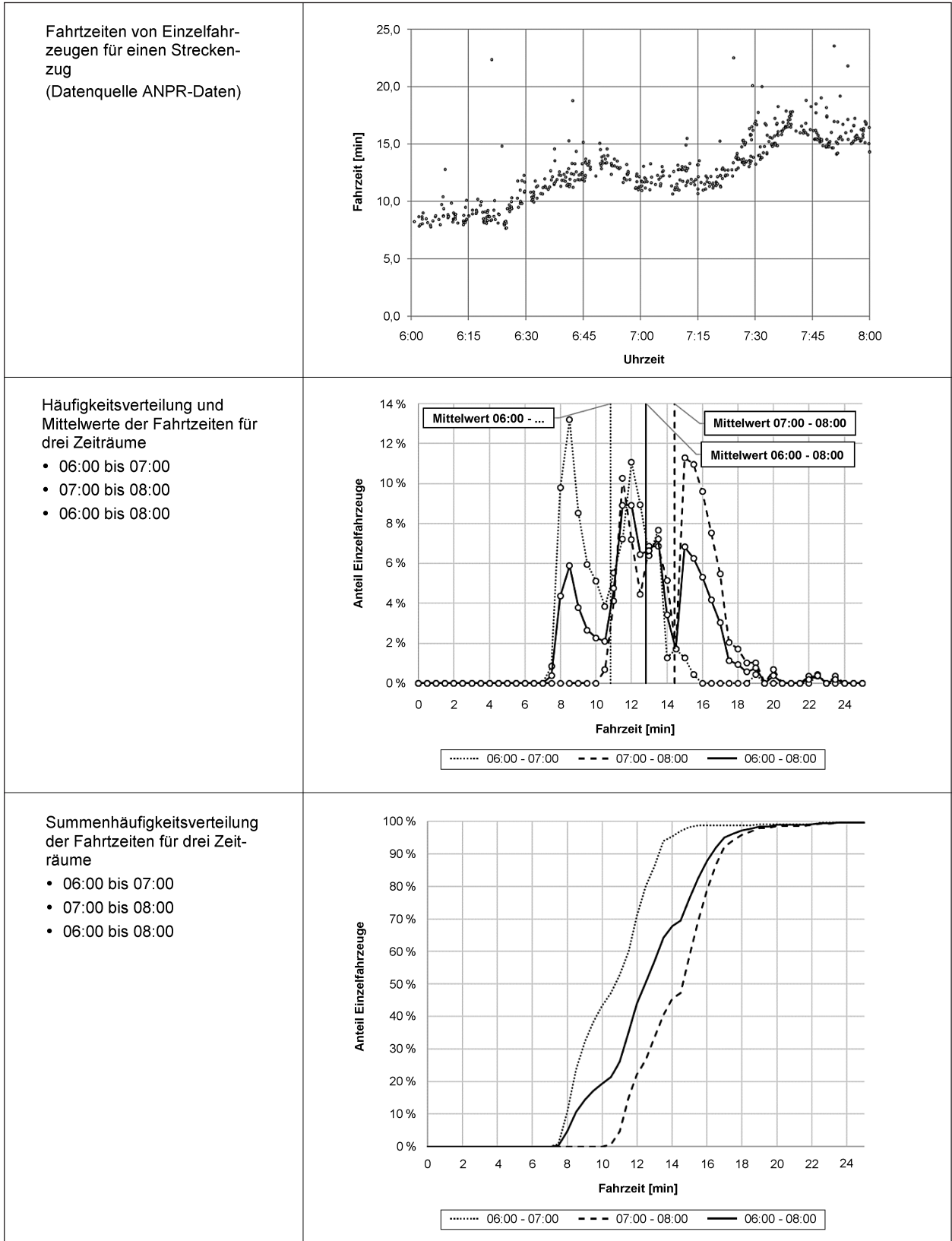


Bild 2-1: Ableitung von Fahrtzeitverteilungen aus Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen

2.1.4 Soll-Fahrtzeit, Ist-Fahrtzeit und Verlustzeit

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

- Soll-Fahrtzeit aus der zu erwartenden Fahrtzeit
Die Soll-Fahrtzeit ergibt sich aus der üblicherweise zu erwartenden Fahrtzeit. Sie kann aus Fahrtzeitverteilungen abgeleitet werden. Kenngrößen, die sich auf die zu erwartende Fahrtzeit beziehen, bewerten den Betrieb einer Straße, der von der Nachfrage und zufälligen Störungen beeinflusst wird.
- Soll-Fahrtzeit aus einer planerisch angemessenen Geschwindigkeit
Die Soll-Fahrtzeit ergibt sich aus einer Mindestgeschwindigkeit, mit der eine Straßenkategorie aufgrund verkehrsplanerischer Vorstellungen befahren werden soll. Aussagen zur Pkw-Mindestgeschwindigkeit finden sich u. a. in den RIN (RIN, 2008). Kenngrößen, die sich auf eine planerisch angemessene Geschwindigkeit beziehen, bewerten die Qualität absolut, d. h. bezogen auf einen angestrebten Zustand des Straßennetzes. Das HBS (2015) bezieht sich bei der Bewertung von Netzabschnitten auf diese Soll-Fahrtzeiten.

Soll-Fahrtzeiten können sich als konstanter Wert t^{Target} auf alle Zeiträume eines Tages beziehen oder als tageszeitabhängiger Wert t_i^{Target} für einen Zeit-

raum i definiert werden. Die Verwendung eines tageszeitabhängigen Wertes ist dann sinnvoll, wenn Ist-Fahrtzeiten einer Hauptverkehrszeit mit den üblicherweise in dieser Hauptverkehrszeit zu erwartenden Fahrtzeiten verglichen werden sollen.

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

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

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

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

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Bezeichnung von Fahrtzeiten, die in dieser Untersuchung verwendet werden. In der Tabelle wird bei tageszeitabhängigen Fahrtzeiten ein Index i verwendet, der den Zeitraum des Tages angibt, auf den sich die Fahrtzeiten beziehen. Zur Definition einer Fahrtzeit sind in der Regel weitere Indizes möglich, die angeben, worauf sich die Fahrtzeit bezieht:

- Fahrtzeit einer Teilstrecke, einer Strecke oder eines Netzabschnitts,
- Fahrtzeit eines bestimmten Kalendertags oder eines Untersuchungszeitraum (z. B. alle Werk-tage eines Jahres).

Kategorie	Formelbezeichner	Bezeichnung der Fahrtzeit	Definition
Soll-Fahrtzeit	t^{Target}	Soll-Fahrtzeit	Üblicherweise zu erwartende Fahrtzeit in einem Zustand ohne Störungen: $t^{Target} = MIN_{i \in I} (t_i^{P50})$
	$t_{i=HVZ}^{Target}$	Soll-Fahrtzeit in der Hauptverkehrszeit	Üblicherweise in der Hauptverkehrszeit zu erwartende Fahrtzeit, die regelmäßige Störungen umfasst: $t_{i=HVZ}^{Target} = t_{i=HVZ}^{P50}$
$i \in I$ Menge I der Zeiträume i eines Tages (oder eines längeren Untersuchungszeitraums)			
Weitere Indizes zur Bezeichnung von Fahrtzeiten siehe unter Formeln.			

Tab. 2-1: Bezeichnung von Fahrtzeiten

Kategorie	Formelbezeichner	Bezeichnung der Fahrtzeit	Definition
Ist-Fahrtzeit	t^{Free}	Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss	Fahrtzeit in einem Zustand ohne Störungen und geringer Verkehrsnachfrage. Verkehrsteilnehmende können die Geschwindigkeit frei wählen. Beispiel für die Definition der Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss: $t^{Free} = t_I^{P15}$ Fahrtzeit aus dem Perzentil P15 eines Untersuchungszeitraums $t^{Free} = \underset{i \in I}{MIN}(t_i^{P50})$ Fahrtzeit aus dem Zeitraum mit der geringsten Median-Fahrtzeit
	t_i^{Mean}	mittlere Fahrtzeit	Arithmetisches Mittel der Fahrtzeit über alle Fahrzeuge in einem Zeitraum i .
	t_i^{Curr}	Ist-Fahrtzeit	Ist-Fahrtzeit in einem Zeitraum i . Die Ist-Fahrtzeit muss in Abhängigkeit der Fragestellung definiert werden: $t_i^{Curr} = t_i^P$
Verlustzeit	$t_i^{Delay,P50}$	planmäßige Verlustzeit (regelmäßige oder systematische Verlustzeit)	Verlustzeit, die in einem Zeitraum i aufgrund regelmäßiger Störungen erwartet werden kann: $t_i^{Delay,P50} = MAX(t_i^{P50} - t^{Target}, 0)$
	$t_i^{Delay,Mean}$	mittlere Verlustzeit	Verlustzeit aus dem arithmetischen Mittel der Fahrtzeit über alle Fahrzeuge in einem Zeitraum i : $t_i^{Delay,Mean} = MAX(t_i^{Mean} - t^{Target}, 0)$
	$t_i^{Delay,P90}$	unplanmäßige Verlustzeit	Verlustzeit, die in einem Zeitraum i aufgrund regelmäßiger und unregelmäßiger Störungen erwartet werden kann: $t_i^{Delay,P90} = MAX(t_i^{P90} - t_{i=HVZ}^{Target}, 0)$
$i \in I$ Menge I der Zeiträume i eines Tages (oder eines längeren Untersuchungszeitraums)			
Weitere Indizes zur Bezeichnung von Fahrtzeiten siehe unter Formeln.			

Tab. 2-1: Fortsetzung

2.1.5 Repräsentative Fahrtzeiten

Für den Begriff der repräsentativen Fahrtzeit gibt es keine verbindliche Definition. Allgemein kann man für eine repräsentative Fahrtzeit Folgendes fordern:

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

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

- Repräsentative Fahrtzeiten für die Ermittlung von Verlustzeiten und Verlustzeitkosten
Für die Ermittlung von realitätsnahen Verlustzeiten (Stauzeiten) und Verlustzeitkosten (Staukosten) müssen mittlere Fahrtzeiten verwendet werden, die mit der Zahl der Fahrzeuge gewichtet wurden.
- Repräsentative Fahrtzeiten für die Ermittlung der zu erwartenden Soll-Fahrtzeit
Wird die Soll-Fahrtzeit als ein konstanter Wert für den gesamten Tag definiert, soll die Soll-Fahrtzeit den Zeitaufwand beschreiben, der in einem Zustand ohne Störungen und mit geringer Verkehrsnachfrage zu erwarten ist. Soll-Fahrtzeiten werden deshalb in diesem Fall in der Schwach-

verkehrszeit ermittelt. Durch die Wahl eines geeigneten Perzentils und durch den Abgleich mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit werden sehr schnelle Fahrzeuge nicht berücksichtigt. FRIEDRICH et al. (2015) schlagen für die Ermittlung der Fahrtzeit eines Zeitraums den Median der Fahrtzeitverteilung vor.

- Repräsentative Fahrtzeiten für die Ermittlung der Ist-Fahrtzeit

Die Ist-Fahrtzeit soll den tatsächlichen Zeitaufwand in einem Zeitraum beschreiben. Auch hierfür ist der Median eine geeignete Größe. Für Zuverlässigkeitsanalysen ist zusätzlich die Analyse weiterer Perzentile sinnvoll (z. B. P90%). Dabei muss aber sichergestellt sein, dass die so ermittelten Fahrtzeitperzentile – wie im Kapitel „Räumliche Aggregation von Fahrtzeitdaten“ erläutert – nicht das Ergebnis einer einfachen Aufsummierung von Perzentilen einzelner Teilstrecken sind.

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

2.2 Kenngrößen der Zuverlässigkeit

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

- Netz Zuverlässigkeit

Die Netz Zuverlässigkeit (connectivity reliability) gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit es für zwei Punkte im Netz mindestens eine Route gibt, die von den Verkehrsteilnehmenden genutzt werden kann. Dabei geht es um die Verfügbarkeit von Alternativrouten für den Fall, dass ein oder mehrere Strecken im Netz gesperrt werden müssen (Naturkatastrophe, Vollsperrung wegen Baustelle oder Unfall).

- Kapazität zu verlässigkeit

Die Zuverlässigkeit der Kapazität (capacity reliability) gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die komplette Kapazität eines Netzelementes zur Verfügung steht bzw. wie häufig und in welchem Umfang es zu Kapazitätsreduktionen kommt. Kapazitätsreduzierungen können in Straßennetzen beispielsweise durch die Sperrung einzelner Fahrstreifen (Baustelle, Unfall) oder aufgrund von Wetterereignissen auftreten.

- Zuverlässigkeit des Verkehrsverhaltens

Die Zuverlässigkeit des Verkehrsverhaltens (behavioural reliability) beschreibt die Regelmäßigkeit, mit der die Verkehrsteilnehmenden ihre Ortsveränderungen (Anzahl, Ziel-, Verkehrsmittel-, Abfahrtszeit- und Routenwahl) durchführen und die Regelmäßigkeit im Fahrverhalten (Nutzung von Zeitlücken, Fahrzeugfolgeabstand).

- Zuverlässigkeit der Fahrtzeit

Die Zuverlässigkeit der Fahrtzeiten (travel time reliability) berücksichtigt Zeitverluste für die Verkehrsteilnehmenden insbesondere durch hohes Verkehrsaufkommen und wird aus der Verteilung der Fahrtzeiten für eine Strecke, einen Netzabschnitt oder eine Quelle-Ziel-Verbindung abgeleitet.

In diesem Forschungsprojekt geht es um Kenngrößen zur Bewertung der Verkehrsablaufqualität. Deshalb steht die Zuverlässigkeit der Fahrtzeit im Vordergrund. Sie wird aber durch die Kapazität zu verlässigkeit (Verfügbarkeit aller Fahrstreifen) und die Verhaltens zu verlässigkeit (Schwankungen der Verkehrsnachfrage) beeinflusst. Die Netz zu verlässigkeit, d. h. die Verfügbarkeit von Alternativrouten wird nicht betrachtet.

In der Literatur werden Kenngrößen der Fahrtzeit zu verlässigkeit entsprechend ihren Eigenschaften klassifiziert. LOMAX et al. (2003) unterscheiden dabei vier Klassen:

- „Statistical Range Methods“ leiten Kenngrößen aus Fahrtzeitverteilungen ab, z. B. die Standardabweichung oder Fahrtzeitperzentile.
- „Buffer Time Methods“ definieren Kenngrößen, die den zusätzlichen Zeitaufwand quantifizieren, der erforderlich ist, um ein Ziel pünktlich zu erreichen. Sie beziehen sich auf eine Soll-Fahrtzeit bei einem üblichen Verkehrszustand.
- „Tardy Trip Measures“ (tardy = verspätet) unterscheiden sich von den Buffer Time Methods da-

durch, dass sie mit einer erhöhten Soll-Fahrtzeit arbeiten, die noch als akzeptabel angesehen wird.

- „Probabilistic Measures“ beschreiben die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Verspätung bzw. die Wahrscheinlichkeit pünktlich anzukommen.

VAN LINT et al. (2008) erweitern die Klassen um eine Klasse „Skew-Width-Measures“, die die Breite einer Verteilung und Schiefe einer Verteilung betrachten. Die vorgeschlagene Kenngröße „Unreliability-Index“ kann der Klasse statistischer Methoden zugeordnet werden.

FRIEDRICH et al. (2015) greifen diese Klassifizierung auf und reduzieren sie auf drei Klassen zur Quantifizierung der Fahrtzeitzuverlässigkeit. Die ersten drei Klassen (Statistical Range Methods, Buffer Time Methods, Tardy Trip Measures) werden dabei zu einer Klasse „Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten“ zusammengefasst, da sich alle Kenngrößen dieser Klasse direkt aus Fahrtzeitverteilungen ableiten. Die Klasse „Probabilistic Measures“ wird als „Zuverlässigkeit aus der Ausfallsicherheit“ übernommen. Zusätzlich wird eine Klasse „Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit“ eingeführt.

1. Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten

Diese Zuverlässigkeit beschreibt das Ausmaß der Streuung über die Verteilung der Fahrtzeiten. Eine geringe Streuung steht für eine hohe Zuverlässigkeit und eine hohe Streuung für eine geringe Zuverlässigkeit. Die Streuung der Fahrtzeit kann durch verschiedene Kenngrößen beschrieben werden. Beispiele hierfür sind die Standardabweichung, der Variationskoeffizient, der Fahrtzeitindex, die Fahrtzeitunzuverlässigkeit (VAN LINT et al., 2008), der Buffer-Time-Index und der Misery-Index (LOMAX et al., 2003).

Der Fahrtzeitindex quantifiziert die Streuung der Fahrtzeit durch die Angabe einer unteren und einer oberen Grenze für die Fahrtzeit. Die untere Grenze entspricht einer Soll-Fahrtzeit. Die obere Grenze wird durch einen Perzentil-Wert festgelegt. Wird für die Soll-Fahrtzeit nicht die in der Schwachverkehrszeit erwartete Fahrtzeit (z. B. Median der Schwachverkehrszeit) herangezogen, sondern die in der Hauptverkehrszeit erwartete Fahrtzeit (z. B. Median der Hauptverkehrszeit), dann kann der Fahrtzeitindex als Zu-

verlässigkeitsindex bezeichnet werden. Der Zuverlässigkeitsindex gibt an, in welchem Umfang eine zu einer gewissen Tageszeit erwartete Fahrtzeit überschritten wird.

2. Zuverlässigkeit aus der Ausfallsicherheit

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

3. Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit

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

Im Folgenden werden ausgewählte Kenngrößen zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit vorgestellt und beschrieben. Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über diese Kenngrößen. In der Tabelle wird auf die Angabe von weiteren Indizes verzichtet. Zur Definition von Kenngrößen der Fahrtzeitzuverlässigkeit sind in der Regel weitere Indizes erforderlich (siehe auch den Formelbezeichner), die die räumliche und eine zeitliche Dimension der Kenngrößen angeben:

- Zuverlässigkeit einer Teilstrecke, einer Strecke, eines Streckenzugs oder eines Netzabschnitts,
- Zuverlässigkeit eines Zeitraums und
- Zuverlässigkeit eines bestimmten Kalendertags oder eines längeren Untersuchungszeitraums.

In den Tabellen 2-3 bis 2-13 werden die einzelnen Kenngrößen beschrieben. Dabei werden – soweit es für die jeweilige Kenngröße sinnvoll ist – drei Berechnungsvorschriften angegeben:

- Berechnungsvorschrift für einen Zeitraum,
- Berechnungsvorschrift für alle Zeiträume eines Tages, die zeitgewichtet zusammengefasst werden und

Klasse	Formelbezeichner	KenngroÙe Deutsch	KenngroÙe Englisch	ähnliche KenngroÙen	Einheit
Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten	f^{BTI}	Pufferzeitindex	Buffer-Time-Index	Misery-Index	[-]
	f^{TTI}	Fahrtzeitindex	Travel-Time-Index	TomTom-Traffic-Index	[-]
	f^{SI}	Fahrtgeschwindigkeitsindex			[-]
	f^{VI}	Variabilitätsindex	Variability Index		[-]
	f^{TTW}	Fahrtzeitfenster	Travel Time Window		[min]
	f^{Var}	Variationskoeffizient Prozentuale Variation	Variation Coefficient Percent Variation		[-], [%]
	f^{UI}	Unzuverlässigkeitsindex	Unreliability Index		[km ⁻¹]
Zuverlässigkeit aus der Ausfallsicherheit	f^{PI}	Pünktlichkeitsindex	Punctuality Index	Failure/On-Time Performance Florida-Reliability-Index	[-]
	p^{Stau}	Wahrscheinlichkeit eines Stauereignisses			[-], [%]
Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit	$t^{DelayKm}$	Verlustzeit pro Kilometer			[s/km]
	T^{Delay}	Verlustzeitaufwand			[Fz•h]
	k^{Delay}	Verlustzeitdichte			[Fz•h/km]

Tab. 2-2: KenngroÙen der Fahrtzeitzuverlässigkeit

- Berechnungsvorschrift für alle Zeiträume eines Tages, die nachfragegewichtet zusammengefasst werden.

Um die KenngroÙen für einen Streckenzug oder für einen Untersuchungszeitraum von mehreren Tagen zu berechnen, müssen die Berechnungsvorschriften angepasst werden. Eine nachfragegewichtete Zusammenfassung der Fahrtzeiten erfolgt mit der Verkehrsnachfrage d (Sicht der Verkehrsteilnehmenden) bzw. mit der Verkehrsstärke q (realisierte Nachfrage auf einem Netzelement). Bei der Darstellung der Berechnungsvorschrift in den Tabellen 2-3 bis 2-13 wird angenommen, dass $q=d$ ist. Diese Annahme gilt für eine Strecke zwischen zwei Knoten, da sich hier die Nachfrage nicht ändert. Sie gilt außerdem für größere Untersuchungsräume, wenn die betrachteten Zeiträume so lang sind, dass alle Verkehrsteilnehmenden ihr Ziel erreichen. Dann kann der Verkehrszeitaufwand mit zwei Ansätzen ermittelt werden:

1. Verkehrszeitaufwand aus der Summe über alle Strecken

$$T_{R,I} = \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} t_{si} \cdot q_{si}$$

2. Verkehrszeitaufwand aus der Summe über alle Relationen

$$T_{R,I} = \sum_{i \in I} \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} t_{odi} \cdot d_{odi}$$

mit

$T_{R,I}$ Verkehrszeitaufwand im Untersuchungsraum R im Untersuchungszeitraum I

t_{si} Fahrtzeit auf Strecke s im Zeitraum i

t_{odi} Fahrtzeit zwischen Quelle o und Ziel z bei Abfahrt im Zeitraum i

q_{si} Verkehrsstärke auf Strecke s im Zeitraum i

d_{odi} Verkehrsnachfrage auf der Relation von Quelle o zum Ziel z im Zeitraum i

$i \in I$ Menge I der Zeiträume i

$s \in S$ Menge S der Strecken (oder Teilstrecken) s im Untersuchungsraum

2.2.1 Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten

Buffer-Time-Index und Misery-Index

Bezeichnung der Kenngröße	Buffer-Time-Index [-] Misery-Index [-]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten
Beschreibung	Der Buffer-Time-Index beschreibt den Anteil der Fahrtzeit, der bezogen auf die mittlere Fahrtzeit zusätzlich benötigt wird, um das Ziel mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 %) pünktlich zu erreichen. Der Misery-Index entspricht dem Buffer-Time-Index, nutzt als Ist-Fahrtzeit jedoch kein Perzentil, sondern den Mittelwert aller beobachteten Zeiten, die langsamer als das Perzentil P=80% sind (LOMAX et al., 2003).
Beurteilung	SHRP (2013a) weist darauf hin, dass der Buffer-Time-Index aufgrund der Benutzung des Mittelwerts ein instabiler Indikator für die Bewertung der Zuverlässigkeit ist. In der Literatur (LOMAX et al., 2003) ist nicht klar formuliert, auf welche Zeiträume sich der Index bezieht.
Berechnungsvorschrift für einen Zeitraum	$f_i^{BTI,P} = \frac{t_i^P - t_i^{Mean}}{t_i^{Mean}}$
Berechnungsvorschrift für mehrere Zeiträume – zeitgewichtet	$f_I^{BTI,P,WT} = \frac{1}{I} \sum_{i \in I} \frac{t_i^P - t_i^{Mean}}{t_i^{Mean}}$
Berechnungsvorschrift für mehrere Zeiträume – nachfragegewichtet	$f_I^{BTI,P,WD} = \frac{\sum_{i \in I} \frac{t_i^P - t_i^{Mean}}{t_i^{Mean}} \cdot d_i}{\sum_{i \in I} d_i}$ erfordert die Kenntnis der Verkehrsnachfrage für die betrachteten Verkehrsanlagen (Einzelanlage, Netzabschnitt, Relation)
Verwendete Werte	<ul style="list-style-type: none"> • Soll-Zustand: Der Buffer-Time-Index nutzt als Soll-Fahrtzeit die mittlere Fahrtzeit im betrachteten Zeitraum. Er kann aber auch für andere Soll-Fahrtzeiten berechnet werden. • Ist-Zustand: Als Ist-Fahrtzeit wird häufig das Perzentil P=95% oder P=90% genannt.
Bewertungsfunktion	Für diese Kenngröße existieren keine dokumentierten Werte zur Bewertung der Ergebnisse.
Literaturquellen	LOMAX et al. (2003), BRILON und ESTEL (2008), LOHMILLER (2014), SHRP (2013a)

Tab. 2-3: Buffer-Time-Index und Misery-Index

Fahrtzeitindex und TomTom-Traffic-Index

Bezeichnung der Kenngröße	Fahrtzeitindex [-] TomTom-Traffic-Index [-]													
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten													
Beschreibung	<p>Der Fahrtzeitindex ergibt sich aus dem Quotienten einer Ist-Fahrtzeit und einer Soll-Fahrtzeit. Er beschreibt, um welchen Faktor sich die Fahrtzeit gegenüber dem Soll-Zustand erhöht, wenn das Ziel mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit pünktlich erreicht werden soll.</p> <p>Der TomTom Traffic Index beschreibt die gewichtete durchschnittliche zusätzliche Reisezeit die von Pkw-Fahrern über das ganze Jahr erfahren werden, verglichen mit den Reisezeiten bei freiem Verkehrsfluss (COHN, 2014).</p>													
Beurteilung	Der Wert kann sowohl typische als auch unerwartete Zeitverluste bewerten (ESTEL, 2009).													
Berechnungsvorschrift für einen Zeitraum	$f_i^{TTI,P} = \frac{t_i^P}{t^{Target}}$													
Berechnungsvorschrift für mehrere Zeiträume – zeitgewichtet	$f_I^{TTI,P,WT} = \frac{t_I^{P,WT}}{t^{Target}} = \frac{\sum_{i \in I} t_i^P}{t^{Target} \cdot I}$													
Berechnungsvorschrift für mehrere Zeiträume – nachfragegewichtet	$f_I^{TTI,P,WD} = \frac{t_I^{P,WD}}{t^{Target}} = \frac{\sum_{i \in I} t_i^P \cdot d_i}{t^{Target} \cdot \sum_{i \in I} d_i}$ <p>erfordert die Kenntnis der Verkehrsnachfrage für die betrachteten Verkehrsanlagen (Einzelanlage, Netzabschnitt, Relation)</p>													
Verwendete Werte	<p>Die Fahrtzeit für den Soll- und den Ist-Zustand ergibt sich aus dem Einsatzzweck des Fahrtzeitindex.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Einsatzbereich</th> <th>Soll-Fahrtzeit</th> <th>Ist-Fahrtzeit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Netzplanung</td> <td>Fahrtzeit aus planerisch angemessener Geschwindigkeit</td> <td>Median oder Mittelwert der Fahrtzeit</td> </tr> <tr> <td>Verkehrstechnische Bemessung „Fahrtzeitindex“</td> <td>Fahrtzeit im ungestörten Zustand, z. B. Median der Schwachverkehrszeit</td> <td>Median oder Mittelwert der Fahrtzeit Fahrtzeit eines vorgegebenen Perzentils, z. B. aus dem Konzept der n. Stunde</td> </tr> <tr> <td>Zuverlässigkeitsanalyse „Zuverlässigkeitsindex“</td> <td>Erwartete Fahrtzeit im betrachteten Zeitraum (Median) unter Berücksichtigung regelmäßiger Störungen</td> <td>Fahrtzeit im betrachteten Zeitraum (Perzentil) unter Berücksichtigung unregelmäßiger Störungen</td> </tr> </tbody> </table>		Einsatzbereich	Soll-Fahrtzeit	Ist-Fahrtzeit	Netzplanung	Fahrtzeit aus planerisch angemessener Geschwindigkeit	Median oder Mittelwert der Fahrtzeit	Verkehrstechnische Bemessung „Fahrtzeitindex“	Fahrtzeit im ungestörten Zustand, z. B. Median der Schwachverkehrszeit	Median oder Mittelwert der Fahrtzeit Fahrtzeit eines vorgegebenen Perzentils, z. B. aus dem Konzept der n. Stunde	Zuverlässigkeitsanalyse „Zuverlässigkeitsindex“	Erwartete Fahrtzeit im betrachteten Zeitraum (Median) unter Berücksichtigung regelmäßiger Störungen	Fahrtzeit im betrachteten Zeitraum (Perzentil) unter Berücksichtigung unregelmäßiger Störungen
Einsatzbereich	Soll-Fahrtzeit	Ist-Fahrtzeit												
Netzplanung	Fahrtzeit aus planerisch angemessener Geschwindigkeit	Median oder Mittelwert der Fahrtzeit												
Verkehrstechnische Bemessung „Fahrtzeitindex“	Fahrtzeit im ungestörten Zustand, z. B. Median der Schwachverkehrszeit	Median oder Mittelwert der Fahrtzeit Fahrtzeit eines vorgegebenen Perzentils, z. B. aus dem Konzept der n. Stunde												
Zuverlässigkeitsanalyse „Zuverlässigkeitsindex“	Erwartete Fahrtzeit im betrachteten Zeitraum (Median) unter Berücksichtigung regelmäßiger Störungen	Fahrtzeit im betrachteten Zeitraum (Perzentil) unter Berücksichtigung unregelmäßiger Störungen												
Bewertungsfunktion	FRIEDRICH et al. (2015) schlagen für Netzabschnitte eine längenabhängige Bewertung mit 6 Qualitätsstufen A bis F vor.													
Literaturquellen	ESTEL (2009), LOHMILLER (2014)													

Tab. 2-4: Fahrtzeitindex und TomTom-Traffic-Index

Fahrtgeschwindigkeitsindex

Bezeichnung der Kenngröße	Fahrtgeschwindigkeitsindex [-]																																	
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten																																	
Beschreibung	Der Fahrtgeschwindigkeitsindex ist im HBS (2015) beschrieben. Er ergibt sich aus dem Quotienten einer Ist-Fahrtgeschwindigkeit und einer Soll-Fahrtgeschwindigkeit. Er beschreibt, um welchen Faktor sich die Geschwindigkeit gegenüber dem Soll-Zustand verändert, wenn das Ziel mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit pünktlich erreicht werden soll.																																	
Beurteilung	Der Fahrtgeschwindigkeitsindex ist dem Fahrtzeitindex ähnlich. Er erfordert die Ermittlung einer mittleren Fahrtgeschwindigkeit aus den längengewichteten Fahrtgeschwindigkeiten der untersuchten Verkehrsanlagen.																																	
Berechnungsvorschrift für einen Zeitraum	$f_i^{SI,P} = \frac{v_i^P}{v^{target}}$																																	
Verwendete Werte	Das Verfahren des HBS leitet den Soll-Zustand aus Vorgaben für die angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit ab, die von der Straßenkategorie abhängt.																																	
Bewertungsfunktion	<p>Der Fahrtgeschwindigkeitsindex wird im HBS (2015) für die Bewertung von Netzabschnitten verwendet.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">SAQ</th> <th colspan="3">Fahrtgeschwindigkeitsindex I_{VF} [-]</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Kategoriengruppe VS</th> <th rowspan="2">Kategoriengruppe HS</th> </tr> <tr> <th>im Vorfeld bebauter Gebiete</th> <th>innerhalb bebauter Gebiete</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>≥ 1,25</td> <td>≥ 1,50</td> <td>≥ 2,00</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>≥ 1,20</td> <td>≥ 1,25</td> <td>≥ 1,50</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>≥ 1,10</td> <td>≥ 1,15</td> <td>≥ 1,25</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>≥ 1,00</td> <td>≥ 1,00</td> <td>≥ 1,00</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>≥ 0,85</td> <td>≥ 0,80</td> <td>≥ 0,75</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>< 0,85</td> <td>< 0,80</td> <td>< 0,75</td> </tr> </tbody> </table> <p>Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts (SAQN) in Abhängigkeit vom Fahrtgeschwindigkeitsindex (HBS, 2015) für Stadtstraßen. Die Werte für die Kategoriengruppe VS – im Vorfeld bebauter Gebiete entsprechen den Werten für Autobahnen und Landstraßen.</p>	SAQ	Fahrtgeschwindigkeitsindex I _{VF} [-]			Kategoriengruppe VS		Kategoriengruppe 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
SAQ	Fahrtgeschwindigkeitsindex I _{VF} [-]																																	
	Kategoriengruppe VS		Kategoriengruppe 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																															
Literaturquellen	ESTEL (2009), LOHMILLER (2014), HBS (2015)																																	

Tab. 2-5: Fahrtgeschwindigkeitsindex

Variabilitätsindex

Bezeichnung der Kenngröße	Variabilitätsindex [-]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten
Beschreibung	Der Variabilitätsindex beschreibt das Verhältnis der 95%-Konfidenzintervalle der Hauptverkehrszeit und der Nebenverkehrszeit. Das 95%-Konfidenzintervall umfasst 95 % der Messwerte in einem Betrachtungszeitraum. Das 95%-Konfidenzintervall ergibt sich bei Annahme einer Normalverteilung aus der Standardabweichung mit $\pm 1,96 \cdot \sigma$.
Beurteilung	Da die Fahrtzeitverteilungen zumeist nicht normalverteilt sind, wird in VAN LINT et al. (2008) empfohlen, die Standardabweichung nicht zu verwenden.
Berechnungsvorschrift	$f_I^{VI} = \frac{2 \cdot 1,96 \cdot \sigma^{Peak}}{2 \cdot 1,96 \cdot \sigma^{OffPeak}} = \frac{\sigma^{Peak}}{\sigma^{OffPeak}} \quad \text{bei Annahme einer Normalverteilung}$ $f_I^{VI,P} = \frac{t^{P,Peak} - t^{(1-P),Peak}}{t^{P,OffPeak} - t^{(1-P),OffPeak}} \quad \text{bei beliebiger Verteilung}$
Verwendete Werte	P = 97,5%
Bewertungsfunktion	Für diese Kenngröße existieren keine dokumentierten Werte zur Bewertung der Ergebnisse.
Literaturquellen	LOMAX et al. (2003), LOHMILLER (2014), VAN LINT et al. (2008)

Tab. 2-6: Variabilitätsindex

Fahrtzeitfenster

Bezeichnung der Kenngröße	Fahrtzeitfenster [min]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten
Beschreibung	Das Fahrtzeitfenster definiert eine Bandbreite, in der die tatsächlichen Fahrtzeiten zu erwarten sind. Es ergibt sich aus der mittleren Fahrtzeit und der Standardabweichung, die addiert und subtrahiert wird. Unter Annahme einer Normalverteilung liegen dann 68 % der zu erwartenden Fahrtzeiten in dieser Bandbreite.
Beurteilung	Das Fahrtzeitfenster ist aufgrund der Benutzung des Mittelwerts ein instabiler Indikator für die Bewertung der Zuverlässigkeit. Da die Fahrtzeitverteilungen zumeist nicht normalverteilt sind, wird in VAN LINT et al. (2008) empfohlen, die Standardabweichung nicht zu verwenden.
Berechnungsvorschrift	$f_I^{TTW} = t^{Mean} \pm \sigma$
Verwendete Werte	-
Bewertungsfunktion	Für diese Kenngröße existieren keine dokumentierten Werte zur Bewertung der Ergebnisse.
Literaturquellen	LOMAX et al. (2003), VAN LINT et al. (2008)

Tab. 2-7: Fahrtzeitfenster

Variationskoeffizient

Bezeichnung der Kenngröße	Variationskoeffizient [-] Prozentuale Variation [%]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten
Beschreibung	Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsvariablen um ihren Mittelwert. Da die Standardabweichung mit dem Mittelwert steigt, kann die Standardabweichung der Fahrtzeit nicht zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Verbindungen unterschiedlicher Länge herangezogen werden. Um die Standardabweichung zu normieren, wird die Standardabweichung durch den Mittelwert dividiert. Dieser Wert wird als Variationskoeffizient, als relative Standardabweichung oder als prozentuale Variation (in %) bezeichnet.
Beurteilung	Die prozentuale Variation ist aufgrund der Benutzung des Mittelwerts ein instabiler Indikator für die Bewertung der Zuverlässigkeit. Da die Fahrtzeitverteilungen zumeist nicht symmetrisch verteilt sind, wird in VAN LINT et al. (2008) empfohlen, die Standardabweichung nicht zu verwenden. Sowohl schnellere als auch langsamere Fahrtzeiten wirken sich gleichermaßen auf den Kennwert aus.
Berechnungsvorschrift	$f_I^{Var} = \frac{\sigma}{t_{Mean}}$
Verwendete Werte	-
Bewertungsfunktion	Für diese Kenngröße existieren keine dokumentierten Werte zur Bewertung der Ergebnisse.
Literaturquellen	LOMAX et al. (2003), California Transportation Plan (1998), VAN LINT et al. (2008), LOHMILLER (2014)

Tab. 2-8: Variationskoeffizient

Unzuverlässigkeitsindex

Bezeichnung der Kenngröße	Unzuverlässigkeitsindex [km^{-1}]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten
Beschreibung	Der Unzuverlässigkeitsindex betrachtet die Streuung und die Schiefe der Fahrtzeitverteilungen. Die Streuung ergibt sich aus dem Quotienten der Differenz zwischen den 10 % langsamsten und den 10 % schnellsten Fahrtzeiten und dem Median. Die Schiefe ergibt sich aus dem Quotienten der Fahrtzeitdifferenz nach oben (P90-P50) und nach unten (P50-P10). Bei einer Verteilung mit großer Schiefe wird der Wert der Streuung um einen Strafwert erhöht.
Beurteilung	Ein größerer Wert des Unzuverlässigkeitsindex bedeutet eine größere Unzuverlässigkeit. Die Zuverlässigkeit ist nach dieser Definition reziprok proportional zur Länge. Das bedeutet, dass bei längeren Netzabschnitten eine größere Streuung bzw. Schiefe in den Fahrtzeiten akzeptabel ist.
Berechnungsvorschrift	$f_I^{UI} = \begin{cases} \frac{\lambda^{var} \cdot \ln(\lambda^{skew})}{l} & , \lambda^{skew} > 1 \\ \frac{\lambda^{var}}{l} & , \lambda^{skew} \leq 1 \end{cases}$ <p>mit</p> $\lambda^{var} = \frac{t^{P90} - t^{P10}}{t^{P50}} \quad \text{Streuung der Verteilung}$ $\lambda^{skew} = \frac{t^{P90} - t^{P50}}{t^{P50} - t^{P10}} \quad \text{Schiefe der Verteilung}$
Verwendete Werte	$t^{P10}, t^{P50}, t^{P90}$
Bewertungsfunktion	Für diese Kenngröße existieren keine dokumentierten Werte zur Bewertung der Ergebnisse.
Literaturquellen	VAN LINT et al. (2008), VAN LINT und VAN ZUYLEN (2005)

Tab. 2-9: Unzuverlässigkeitsindex

2.2.2 Zuverlässigkeit aus der Ausfallsicherheit

Pünktlichkeitsindex

Bezeichnung der Kenngröße	Pünktlichkeitsindex [-] INRIX-Congestion-Rate [-]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Ausfallsicherheit
Beschreibung	Beim Pünktlichkeitsindex wird jedes Überschreiten der Soll-Fahrtzeit als Ausfall bzw. als Verspätung gewertet. Die Zeiträume mit Verspätung werden mit allen Zeiträumen des Betrachtungszeitraums in Bezug gesetzt. Der Anteil der Zeiträume ohne Verspätung wird als Pünktlichkeit bezeichnet. Bei der INRIX-Congestion-Rate wird die gesamte Fahrtzeit in einen gestauten und einen nicht gestauten Zustand unterteilt. Das Verhältnis dieser beiden Werte wird als Congestion-Rate bezeichnet (INRIX Research, 2018).
Beurteilung	Der Pünktlichkeitsindex bewertet jede Verspätung gleich. Es wird nicht unterschieden, ob die Soll-Fahrtzeit nur knapp oder sehr stark überschritten wird.
Berechnungsvorschrift Zeitgewichtet	$f_I^{PI,WT} = \frac{\sum_{i \in I} f(t_i^{Curr}, t^{Target})}{I}$ $f(t_i^{Curr}, t^{Target}) \begin{cases} 1, & \text{wenn } t_i^{Curr} \leq t^{Target} \\ 0, & \text{wenn } t_i^{Curr} > t^{Target} \end{cases}$
Berechnungsvorschrift Nachfragegewichtet	$f_I^{PI,WD} = \frac{\sum_{i \in I} f(t_i^{Curr}, t^{Target}) \cdot d_i}{\sum_{i \in I} d_i}$
Verwendete Werte	Für die Berechnung des Pünktlichkeitsindex eignet sich als Soll-Fahrtzeit die Fahrtzeit aus einer planerisch angemessenen Geschwindigkeit oder aus einer Fahrtzeit im ungestörten Zustand (Median der Schwachverkehrszeit). LOMAX et al. (2003) schlagen als Soll-Fahrtzeit vor $t^{Target} = 1,1 \cdot t^{Mean}$ ALVAREZ UND HADI (2012) schlagen als Soll-Fahrtzeit vor $t^{target} = 1,1 \cdot t^{P50}$ und $t^{Target} = 1,25 \cdot t^{P50}$
Bewertungsfunktion	FRIEDRICH et al. (2015) schlagen für die Kenngröße „Anteil der Zeiträume mit Verspätung“ für Netzabschnitte eine längenabhängige Bewertung mit 6 Qualitätsstufen A bis F vor.
Literaturquellen	BELL et al. (1999), LOMAX et al. (2003), ASAKURA und KASHIWADANI, FRIEDRICH et al. (2015), ALVAREZ und HADI (2012), INRIX Research (2018)

Tab. 2-10: Pünktlichkeitsindex

Wahrscheinlichkeit von Stauereignissen

Bezeichnung der Kenngröße	Anzahl der Stauereignisse [Anzahl] Länge der Stauereignisse [km] Dauer der Stauereignisse [h]																								
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Ausfallsicherheit																								
Beschreibung	Kenngrößen, die aus Stauereignissen abgeleitet werden, ermitteln in einem ersten Schritt Stauereignisse. Hierfür werden Werte für Staugeschwindigkeiten, Mindestlängen und Mindestdauern vorgegeben. Anschließend wird die Zahl der Stauereignisse in einem Zeitraum ermittelt. Die Stauereignisse werden mit der Staulänge und der Staudauer gewichtet.																								
Beurteilung	<p>Die Zahl der Stauereignisse berücksichtigt nicht die Schwere des Stauereignisses. Die Gewichtung mit der Staulänge und der Staudauer führt zu Kenngrößen, deren Dimension nicht anschaulich ist. So gibt die ADAC Staubilanz für das Jahr 2017 beispielsweise für die deutschen Autobahnen 723.000 Stauereignisse, 1.448.000 Kilometer Stau und 457.000 registrierte Stautunden an (ADAC, 2018). Daraus lässt sich ableiten, dass das mittlere Stauereignis 38 Minuten dauert und 2 km lang ist. Das erlaubt aber keine Ableitung der Verkehrsablaufqualität.</p> <p>Eine nachvollziehbare Kenngröße könnte die Wahrscheinlichkeit von Stauereignissen sein. Dabei wird das Produkt aus Staulänge und Staudauer über alle Stauereignisse aufsummiert und auf die gesamte Netzlänge und die Dauer des Analysezeitraums bezogen:</p> $P_I^{Stau} = \frac{\sum_{e \in \text{Stauereignisse im Zeitraum } I} l_e \cdot t_e}{l_{\text{Netz}} \cdot t_I}$ <p>Mit den Werten des ADAC ergibt sich bei einer Autobahnlänge von 26.000 km eine Stauwahrscheinlichkeit von 0,4 %. Diese Kenngröße ist so aber in der Literatur nicht definiert.</p>																								
Verwendete Werte	<p>Werte für die Erkennung eines Stauereignisses:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Staugeschwindigkeit [km/h]</th> <th>Mindestlänge [km]</th> <th>Mindestzeit [Minuten]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ADAC</td> <td>20</td> <td>1,0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Bayern</td> <td>40</td> <td>1,0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Hessen</td> <td>35</td> <td>1,0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Nordrhein-Westfalen</td> <td>30</td> <td>-</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>ASFINAG</td> <td>v-Lkw</td> <td>0,2</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		Staugeschwindigkeit [km/h]	Mindestlänge [km]	Mindestzeit [Minuten]	ADAC	20	1,0	5	Bayern	40	1,0	2	Hessen	35	1,0	5	Nordrhein-Westfalen	30	-	5	ASFINAG	v-Lkw	0,2	1
	Staugeschwindigkeit [km/h]	Mindestlänge [km]	Mindestzeit [Minuten]																						
ADAC	20	1,0	5																						
Bayern	40	1,0	2																						
Hessen	35	1,0	5																						
Nordrhein-Westfalen	30	-	5																						
ASFINAG	v-Lkw	0,2	1																						
Bewertungsfunktion	Die Bewertung der Stauereignisse erfolgt durch einen Vergleich der Ergebnisse mit früheren Zeiträumen.																								
Literaturquellen	ADAC (2018), Bayerischer Landtag (2012)																								

Tab. 2-11: Wahrscheinlichkeit von Stauereignissen

2.2.3 Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit

Verlustzeit pro Kilometer

Bezeichnung der Kenngröße	Verlustzeit pro Kilometer [s/km]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit
Beschreibung	Die Verlustzeit ist die Differenz aus der Ist-Fahrtzeit und der Soll-Fahrtzeit. Um die Verlustzeit von Strecken oder Streckenzügen vergleichen zu können, wird die Verlustzeit mit der Länge normiert. Das Ergebnis beschreibt den zusätzlichen Aufwand, den ein Fahrzeug im betrachteten Zeitraum im Mittel pro Kilometer erwarten muss.
Beurteilung	Die Verlustzeit pro Kilometer bezieht alle Überlastungssituationen auch in ihrer Schwere mit ein, jedoch wird die Häufigkeit und die Variabilität des Ausmaßes der Überlastungen nicht bewertet.
Berechnungsvorschrift für einen Zeitraum	$t_i^{DelayKm} = \frac{MAX(t_i^{Curr} - t^{Target}, 0)}{l}$
Berechnungsvorschrift für mehrere Zeiträume – zeitgewichtet	$t_I^{DelayKm,WT} = \frac{\sum_{i \in I} MAX(t_i^{Curr} - t^{Target}, 0)}{I \cdot l}$
Berechnungsvorschrift für mehrere Zeiträume – nachfragegewichtet	$t_I^{DelayKm,WD} = \frac{\sum_{i \in I} MAX(t_i^{Curr} - t^{Target}, 0) \cdot d_i}{l \cdot \sum_{i \in I} d_i}$
Verwendete Werte	$t_i^{Curr} = t_i^{Mean}$
Bewertungsfunktion	FRIEDRICH et al. (2015) schlagen für Netzabschnitte eine längenabhängige Bewertung mit 6 Qualitätsstufen A bis F vor.
Literaturquellen	FRIEDRICH et al. (2015)

Tab. 2-12: Verlustzeit pro Kilometer

Verlustzeitaufwand und Verlustzeitdichte

Bezeichnung der Kenngröße	Verlustzeitaufwand [Fz·h] Verlustzeitdichte [Fz·h/km]
Kenngrößenkategorie	Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit
Beschreibung	Die Verlustzeit ist die Differenz aus der Ist-Fahrtzeit und der Soll-Fahrtzeit. Das Produkt aus Verlustzeit und Verkehrsnachfrage ergibt den Verlustzeitaufwand in einem Zeitraum. Dieser Verlustzeitaufwand kann auf einen Kilometer bezogen werden. Dieser Wert wird dann als Verlustzeitdichte bezeichnet.
Beurteilung	Der Verlustzeitaufwand und die Verlustzeitdichte beziehen alle Überlastungssituationen auch in ihrer Schwere mit ein und gewichten sie mit der Verkehrsnachfrage. Sie quantifizieren die Wirkungen auf den Nutzer
Verlustzeitaufwand	$T_I^{Delay} = \sum_{i \in I} MAX(t_i^{Curr} - t^{Target}, 0) \cdot d_i$
Verlustzeitdichte	$k_I^{Delay} = \frac{T_I^{Delay}}{l}$
Verwendete Werte	$t_i^{Curr} = t_i^{Mean}$
Bewertungsfunktion	-
Literaturquellen	-

Tab. 2-13: Verlustzeitaufwand und Verlustzeitdichte

2.3 Kenngrößen der Verkehrsnachfrage

Kenngrößen der Verkehrsnachfrage beschreiben zum einen das Verkehrsverhalten der Verkehrsteilnehmenden im Personen- und Güterverkehr. Zum anderen ermöglichen sie eine Quantifizierung der tatsächlichen Leistungsfähigkeit eines Verkehrsangebots: Wie viele Verkehrselemente (Fahrzeuge oder Personen) können in einem Zeitraum bewegt werden, welche Entfernungen werden dabei zurückgelegt und wie groß ist der benötigte Zeitaufwand für die Ortsveränderungen? Informationen über die Verkehrsnachfrage ermöglichen es, zeitlich differenzierte Verkehrszustände mit der Verkehrsnachfrage zu gewichten, sodass die Zahl der betroffenen Verkehrselemente bei der Bewertung berücksichtigt wird.

Bei einer Leistungsfähigkeitsuntersuchung nach HBS ist es wichtig, die Verkehrsnachfrage (Summe der Ortsveränderungen) als Eingangsgröße zu verwenden. Die Verkehrsnachfrage pro Zeiteinheit kann größer sein, als eine an einer Zählstelle erfasste Verkehrsstärke, wenn dort oder im Zufluss regelmäßig Stau auftritt. In diesem Fall geben die Zählergebnisse nicht die Verkehrsnachfrage wieder, sondern nur den durch das Angebot abwickelbaren Teil davon. Leistungsfähigkeitsnachweise sind dann verfälscht. Bei der Ermittlung der Verkehrsablaufqualität einer bestehenden Verkehrsanlage gibt es dieses Problem nicht, da nicht eine Spitzenstunde an einem Ort, sondern längere Zeiträume im Netz betrachtet werden. Hier muss als Bewertungsgröße die an der Verkehrsanlage gezählte Verkehrsstärke verwendet werden. Liegen für eine Verkehrsanlage bzw. für eine Teilstrecke keine gezählten Verkehrsstärken vor, müssen möglichst gute Näherungswerte genutzt werden. In Tabelle 2-14 sind die Kenngrößen der Verkehrsnachfrage definiert. Folgende Bezeichnungen und Kenngrößen werden unterschieden:

- **Verkehrselemente**

Verkehrselemente sind Fahrzeuge (Pkw, Lkw) oder Personen. Bei der Gewichtung der Verkehrszustände und bei der Ermittlung des Verlustzeitaufwands macht es im Personenverkehr einen Unterschied, ob mit der Zahl der Fahrzeuge oder der Zahl der Personen gewichtet wird. Um die Unterschiede zwischen Pkw und Lkw zu berücksichtigen, müssen alle Soll- und Ist-Fahrtzeiten nach Fahrzeugklasse differenziert werden. Bei der Ermittlung des Verlustzeitaufwands

sollte immer dann differenziert werden, wenn

$$t_{Pkw}^{Target} < t_{Lkw}^{Zulässig} \leq t_{Lkw}^{Target}.$$

- **Verkehrsnachfrage**

Die Verkehrsnachfrage beschreibt die Zahl der Verkehrselemente, die eine Ortveränderung zwischen zwei Punkten im Netz durchführen.

- **Verkehrsstärke**

Die Verkehrsstärke beschreibt die Zahl der Verkehrselemente an einem Ort im Netz. Dabei kann es sich um einen Wert pro Fahrstreifen, einen fahrtrichtungsbezogenen Wert, einen Streckenquerschnitt oder um einen Abbiegestrom an einem Knoten handeln.

- **Verkehrsaufkommen**

Das Verkehrsaufkommen beschreibt die Zahl der Ortsveränderungen in einem Gebiet, ggf. differenziert nach Binnen-, Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr. Bezogen auf einen Streckenzug oder einen Netzabschnitt ergibt sich das Verkehrsaufkommen aus der Summe aller Verkehrselemente, die an den Knoten des Streckenzugs einfahren. An einer Strecke, bei der es keine Zu- oder Abflüsse parkender Fahrzeuge gibt, entspricht das Verkehrsaufkommen der Verkehrsstärke.

- **Verkehrszeitaufwand**

Der Verkehrszeitaufwand kann sich auf eine Strecke, einen Streckenzug, eine Route oder ein Netz beziehen. Der Verkehrszeitaufwand kann für mehrere Zeiten (Soll-Fahrtzeit, Ist-Fahrtzeit, Verlustzeit) berechnet werden.

- Der Verkehrszeitaufwand einer Strecke ergibt sich aus dem Produkt von Verkehrsstärke und Fahrtzeit der Strecke.

- Der Verkehrszeitaufwand eines Streckenzugs bezogen auf alle Verkehrselemente, die den Streckenzug teilweise oder komplett befahren (Binnen-, Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr des Streckenzugs), ergibt sich aus der Summe des Verkehrszeitaufwands aller Strecken des Streckenzugs. Diese Betrachtung kann auch als Netzsicht (Wie groß ist der Aufwand oder die Verlustzeit im Netz?) bezeichnet werden.

- Der Verkehrszeitaufwand einer Route zwischen zwei Punkten im Netz ergibt sich aus der Verkehrsnachfrage und der Fahrtzeit der

Route. Hierbei kann es sich sowohl um den Durchgangsverkehr eines Streckenzugs als auch um eine Route zwischen zwei Orten über mehrere Streckenzüge handeln. Diese Betrachtung kann als Nutzersicht (Wie groß ist der Aufwand oder die Verlustzeit für durchfahrende Verkehrsteilnehmende?) bezeichnet werden.

– Verkehrsleistung

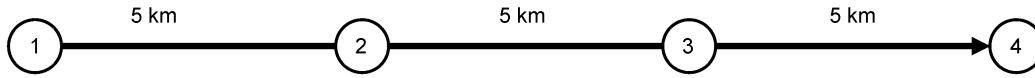
Die Verkehrsleistung kann sich auf eine Strecke oder einen Streckenzug und auf den gesamten Verkehr des Streckenzugs oder auf den Durchgangsverkehr des Streckenzugs beziehen. Sie ergibt sich aus dem Produkt von Verkehrsnachfrage (in Personen) und Länge. Bezieht sich der Wert auf die Verkehrsstärke in Fahrzeugen,

Formelbezeichner	Name	Einheit*
d_{gmn_i}	Verkehrsnachfrage der Verkehrselemente g zwischen den Knoten n und m eines Streckenzugs im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, m, n, d, D, i, I	[Verkehrselemente]
d_{gSi}	Verkehrsaufkommen eines Streckenzug S im Zeitraum i , d. h. die Anzahl der an den Knoten m des Streckenzugs einfahrenden Verkehrselemente Mögliche Indizes: g, G, S, d, D, i, I $d_{gSi} = \sum_{m \in N} d_{gmn_i}$	[Verkehrselemente]
q_{gsi}	Verkehrsstärke der Verkehrselemente g auf der Strecke s im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, s, d, D, i, I $q_{gsi} = \sum_{g \in G} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} \sum_{s \in r_{mn}} d_{gmn_i}$ $s \in r_{mn}$ Strecke s ist Teil einer Ortsveränderung, die vom Zufahrtsknoten m bis zum Ausfahrtsknoten n fährt	[Verkehrselemente]
T_{si}	Verkehrszeitaufwand einer Strecke s im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, s, d, D, i, I $T_{si} = t_{si} \cdot q_{si}$	[Fz•h] [Pers•h]
T_{Si}	Verkehrszeitaufwand eines Streckenzug S im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, S, d, D, i, I $T_{Si} = \sum_{s \in S} t_{si} \cdot q_{si}$	[Fz•h] [Pers•h]
L_{si}	Verkehrsleistung einer Strecke s im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, s, d, D, i, I $L_{si} = l_s \cdot q_{si}$	[Fz•km] [Pers•km]
L_{Si}	Verkehrsleistung eines Streckenzug S im Zeitraum i Mögliche Indizes: g, G, S, d, D, i, I $L_{Si} = \sum_{s \in S} l_s \cdot q_{si}$	[Fz•km] [Pers•km]
$i \in I$	Menge I der Zeiträume i eines Tages	
$d \in D$	Menge D der Kalendertage d eines Untersuchungszeitraums, z. B. $D =$ alle Werktage eines Jahres	
$s \in S$	Menge S der Strecken (oder Teilstrecken) s eines Streckenzugs S	
$m, n \in N_S$	Menge N der Knoten (Zu- und Abfahrten) m, n eines Streckenzugs S	
$g \in G$	Menge G der Verkehrselemente (Fahrzeuge, Personen) g	

* alle Einheiten beziehen sich auf einen zu definierenden Zeitraum

Tab. 2-14: Kenngrößen der Verkehrsnachfrage

Streckenzug 1 - 4



Berechnungsweg über die Strecken des Streckenzugs und über die Routen des Streckenzugs

Länge l				
	2	3	4	
1	5	10	15	
2		5	10	
3			5	

Soll-Fahrtzeit t^{Target}				
	2	3	4	
1	4	8	12	
2		4	8	
3			4	

Zeitraum $i=1$				
Strecke	1-2	2-3	3-4	1-4
t^{Target}	4	4	4	12
t^{Curr}	6	10	5	21
l	5	5	5	15
q	1000	2000	1000	
$q \cdot l$	5000	10000	5000	20000
$q \cdot t^{target}$	4000	8000	4000	16000
$q \cdot t^{curr}$	6000	20000	5000	31000
$f^{TTI,WT}$	1,50	2,50	1,25	1,75
$f^{TTI,WD}$	1,50	2,50	1,25	1,94

Nachfrage d $i=1$				
	2	3	4	Σ
1	250	250	500	1000
2		1000	250	1250
3			250	250
Σ	250	1250	1000	2500

Ist-Fahrtzeit t^{Curr} $i=1$				
	2	3	4	
1	6	16	21	
2		10	15	
3			5	

Verkehrsleistung $d \cdot l$ $i=1$				
	2	3	4	Σ
1	1250	2500	7500	11250
2		5000	2500	7500
3			1250	1250
Σ	1250	7500	11250	20000

Soll-Zeitaufwand $d \cdot t^{Target}$ $i=1$				
	2	3	4	Σ
1	1000	2000	6000	9000
2		4000	2000	6000
3			1000	1000
Σ				16000

Ist-Zeitaufwand $d \cdot t^{Curr}$ $i=1$				
	2	3	4	Σ
1	1500	4000	10500	16000
2		10000	3750	13750
3			1250	1250
Σ				31000

Fahrtzeitindex zeitgewichtet $f^{TTI,WT}$ $i=1$				
	2	3	4	
1	1,50	2,00	1,75	
2		2,50	1,88	
3			1,25	

Fahrtzeitindex nachfragegewichtet $f^{TTI,WD}$ $i=1$				
	2	3	4	
1	1,50	2,00	1,75	
2		2,50	1,88	
3			1,25	

Ergebnis

		bezogen auf alle Verkehre des Streckenzugs	bezogen auf den Durchgangsverkehr des Streckenzugs
Fahrtzeitindex, zeitgewichtet	$f_{i=1+2}^{TTI,WT}$	1,42	1,42
Fahrtzeitindex, nachfragegewichtet	$f_{i=1+2}^{TTI,WD}$	1,67	1,53

Bild 2-2: Einfluss der Nachfragegewichtung auf das Ergebnis

spricht man üblicherweise von der Fahrleistung. Aus Gründen der besseren Verständlichkeit wird im vorliegenden Bericht der Begriff Verkehrsleistung synonym für Personen und Fahrzeuge verwendet.

Alle Kenngrößen beziehen sich immer auf einen Zeitraum.

Bild 2-2 zeigt am Beispiel eines Streckenzugs mit drei Strecken und zwei Zeiträumen den Einfluss der Nachfragegewichtung auf den Fahrtzeitindex. Nachfragegewichtete Kenngrößen der Fahrtzeitzuverlässigkeit werden schlechtere Zuverlässigkeitswerte ergeben als zeitgewichtete Kenngrößen. Es macht auch einen Unterschied, ob alle Verkehre eines Streckenzugs in die Berechnung eingehen oder nur die Durchgangsverkehre. Hier sind je nach Verteilung der Nachfrage Beispiele denkbar, in denen Kenngrößen, die nur den Durchgangsverkehr betrachten, bessere oder schlechtere Zuverlässigkeitswerte ergeben als Kenngrößen, die alle Verkehre eines Streckenzugs einbeziehen.

2.4 Datenquellen für Geschwindigkeits- und Fahrtzeitdaten

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

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

Im Folgenden werden vier Verfahrensklassen für die Fahrtzeitermittlung unterschieden:

1. Fahrtzeitermittlung mit verkehrsnachfragebasierter Fahrtzeitmodellierung

Die Fahrtzeit wird aus den Eingangsgrößen Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot mit einem

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

2. Fahrtzeitermittlung mit verkehrszustandsbasierter Fahrtzeitmodellierung

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

3. Fahrtzeitermittlung mit raumdiskreter Fahrtzeitmessung

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

4. Fahrtzeitermittlung mit raumkontinuierlicher Fahrtzeitmessung

Der Fahrtverlauf wird mit Hilfe von GPS kontinuierlich erfasst, sodass die Fahrtzeit prinzipiell für jeden beliebigen Abschnitt angegeben werden kann.

2.4.1 Fahrtzeitermittlung mit verkehrsnachfragebasierter Fahrtzeitmodellierung

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

kehrsnachfrage, Verkehrsangebot und Fahrtzeit nachbilden. Die Verkehrsnachfrage kann zu diesem Zweck aus Messungen oder mit Modellen bestimmt werden:

- Verkehrsnachfrage aus der Ganglinie gemessener Verkehrsstärken
Die Ganglinie der Verkehrsstärke kann je nach Anwendungsfall eine Hauptverkehrszeit, einen ganzen Tag oder ein ganzes Jahr umfassen. Für die Ermittlung der Nachfrageganglinien gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Beispielhaft seien drei Ansätze genannt: Um Verkehrsstärken für jede Stunde eines Jahres zu ermitteln, kombinieren BRILON und ZURLINDEN (2003b) typisierte Tagesganglinien mit einer Wochen- und einer Jahresganglinie. Dieser Ansatz wird von BRILON und GEISTEFELDT (2007) so erweitert, dass gemessene Tageswerte der Verkehrsstärke mit tagesindividuellen Typganglinien verknüpft werden. Ein weiterer ganglinienbasierter Ansatz wird im Entwurf der Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS, 20XX) vorgestellt. Dort erfolgt die Herleitung der für die Bewertung erforderlichen 8.760 Einzelstundenwerte der Verkehrsstärke in einem mehrstufigen Verfahren getrennt nach Leicht- und Schwerverkehr Straßen.
- Verkehrsnachfrage aus Verkehrsnachfragemodellen (z. B. LOHSE, 2011)
Bei Verkehrsnachfragemodellen ist die Verkehrsnachfrage das Ergebnis einer Nachbildung der Entscheidungsprozesse, die zur Verkehrsnachfrage führen. Diese Entscheidungen umfassen im Personenverkehr die Aktivitätenwahl, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl, Abfahrtszeitwahl und Routenwahl. Im Güterverkehr ermitteln die Modelle das Frachtaufkommen und bilden die Transportlogistikprozesse der Tourenplanung nach. Ergebnis der Routenwahl sind Fahrzeugzuflüsse in das Netz, aus denen sich die Verkehrsstärke der Einzelanlagen ergibt.

Die Fahrtzeit ergibt sich dann aus den Fahrzeugzuflüssen und dem Verkehrsangebot mit einem Fahrtzeitermittlungsmodell. Bild 2-3 zeigt wesentliche Klassen von Fahrtzeitermittlungsmodellen im Individualverkehr. Im Gegensatz zu Methoden der Fahrtzeitermittlung, die auf gemessenen Werten beruhen, können mit Verkehrsmodellen die Fahrtzeiten auch für zukünftige Netz- und Nachfragezustände abgeschätzt werden.

Auslastungsabhängige Fahrtzeitermittlungsmodelle

Die einfachste Variante eines Fahrtzeitermittlungsmodells kann man als kapazitäts- oder auslastungsabhängiges Modell bezeichnen. Bei freiem Verkehrsfluss ergibt sich die Fahrtzeit für eine Strecke aus der Streckenlänge und der Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss. Für Abbiegebeziehungen an einem Knotenpunkt wird die auslastungsunabhängige Abbiegezeit direkt angegeben. Sie hängt von der Art der Knotensteuerung ab und wird in der Verkehrstechnik als Grundwartezeit bezeichnet. Im belasteten Netz ergeben sich die Streckenfahrtzeit und die Abbiegezeit aus einer sogenannten CR-Funktion (capacity restraint), die den Zusammenhang zwischen Auslastung und Fahrtzeit abbildet. Die Auslastung einer Verkehrsanlage ist dabei als der Quotient von Verkehrsstärke q und Kapazität q^{max} definiert. Bei Strecken wird die Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss mit einem auslastungsabhängigen Faktor erhöht. Bei Abbiegevorgängen an Knoten wird die Grundwartezeit um einen absoluten Wert erhöht, da die auslastungsunabhängige Wartezeit an einem Knoten nicht von der Grundwartezeit abhängt. Die CR-Funktion entspricht dann einem Warteschlangenmodell, bei dem nach Erreichen der Kapazität jedes zusätzliche Fahrzeug die Fahrtzeit erhöht. Ein kapazitätsabhängiges Fahrtzeitermittlungsmodell betrachtet die Strecken und Knoten des Netzes unabhängig von ihren Nachbarstrecken. Ein kapazitätsabhängiges Modell stellt deshalb kein Verkehrsflussmodell dar, sondern bietet eine grobe, aber einfache Methode zur Ermittlung von Fahrtzeiten. Wesentliche Inputdaten eines kapazitätsabhängigen Modells sind

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

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

Makroskopische Verkehrsflussmodelle

Makroskopische Flussmodelle berücksichtigen im Gegensatz zu auslastungsabhängigen Modellen

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

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

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

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

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle

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

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

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

Makroskopische Warteschlangenmodelle

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

- Ankunftsprozess,
- Bedienungsprozess und
- Bedienungsregel.

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

Mesoskopische Warteschlangenmodelle

Mesoskopische Flussmodelle stellen eine Mischform zwischen den makroskopischen und mikrosko-

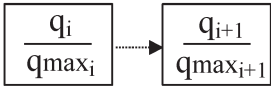
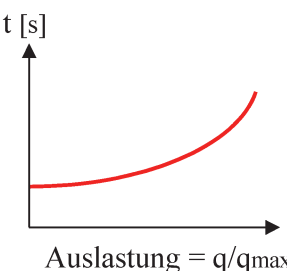
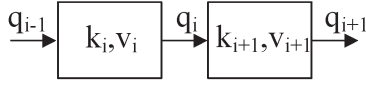
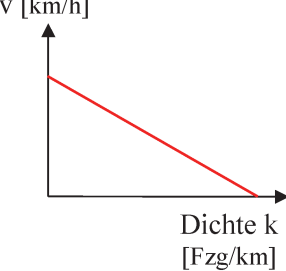
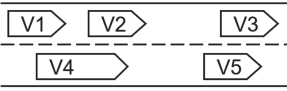
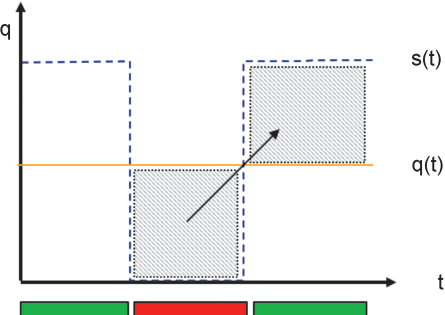
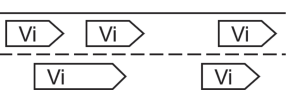
Auslastungsabhängiges Modell	Makroskopisches Flussmodell	Mikroskopisches Flussmodell
<p>Strecke i Strecke i+1</p>  <p>$\frac{q_i}{q_{max_i}} \rightarrow \frac{q_{i+1}}{q_{max_{i+1}}}$</p> <p>$t$ [s]</p>  <p>Auslastung = q/q_{max}</p>	<p>Strecke i Strecke i+1</p>  <p>$q_{i-1} \rightarrow k_i, v_i \rightarrow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

Bild 2-3: Klassen von Fahrtzeitermittlungsmodellen im Individualverkehr

pischen Flussmodellen dar. Sie betrachten zwar einzelne Fahrzeuge, die sich aber in Ihren Eigenschaften innerhalb eines Straßenabschnitts nicht unterscheiden, d. h. die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ergibt sich aus den makroskopischen Randbedingungen des Straßenabschnitts.

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

1. Vorteile

- Es können Fahrzeiten für den Analysezustand und den Prognosezustand bestimmt werden.
- Die Fahrzeiten können für Teilstrecken, Strecken und Netzabschnitte bestimmt werden.
- Die Ergebnisse sind reproduzierbar.

2. Nachteile

- Die Fahrzeit entsprechen nicht den tatsächlich gemessenen Fahrzeiten. Die Größe der Abweichung kann nur durch Messungen quantifiziert werden.
- Zufällige Störungen werden nicht oder nur über Annahmen berücksichtigt.

2.4.2 Fahrzeitermittlung mit verkehrszustandsbasierter Fahrzeitmodellierung

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

- Rekonstruktionsverfahren: Diese Verfahren rekonstruieren den Verkehrszustand entlang eines Streckenzugs mit einem Algorithmus, der die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke, Dichte und Geschwindigkeit abbildet.

- Simulationsverfahren: Diese Verfahren nutzen makroskopische oder mikroskopische Verkehrsflussmodelle, die den realen Verkehrszustand eines Streckenzugs oder eines Teilnetzes kontinuierlich parallel zur Realität abbilden sollen.

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

- Das System ASDA-FOTO (KERNER et al., 2000; REHBORN et al., 2003) ist ein von der Daimler-Forschung entwickeltes und patentiertes Verfahren, das sich für die Zustandserfassung auf Autobahnen eignet. Ziel des Verfahrens zur Stauverfolgung ASDA ist die zeitkontinuierliche Verfolgung und Vorhersage einer detektierten, sich bewegenden, langen Stauzone zwischen lokalen Messstellen, auch wenn der Stau zwischen den Messstellen nicht direkt gemessen werden kann. Das Verfahren FOTO ergänzt das Verfahren ASDA um die räumlich-zeitlichen Prognosen des sogenannten synchronisierten Verkehrs. Aus ASDA-FOTO können Fahrzeiten abgeleitet werden. ASDA-FOTO eignet sich für den Einsatz auf autobahnähnlichen Straßen mit planfreien Knotenpunkten und erfordert Detektorabstände von ca. 2 bis 3 km.
- Das verkehradaptive Rekonstruktionsverfahren (KESTING und TREIBER, 2010) nutzt für die Rekonstruktion des Verkehrszustands als Eingangsgrößen Geschwindigkeitswerte, die zu festen Zeiten an definierten Orten gemessen werden. Als Output erhält man eine kontinuierliche Geschwindigkeitsschätzung als Funktion von Ort und Zeit. Um diese wesentlichen Eigenschaften der Verkehrsdynamik zu berücksichtigen, werden zwei geglättete Geschwindigkeitsfelder mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten für freien Verkehr (Annahme 70 km/h) und gestauten Verkehr (Annahme 15 km/h) unterschieden. Im Gegensatz zu ASDA-FOTO ist das Rekonstruktionsverfahren nicht für Real-Time-Anwendungen konzipiert, sondern für die Darstellung historischer Verkehrslagen.

Ein Beispiel für ein Simulationsverfahren ist das Verfahren OLSIM (Online Simulation), das auf einer Verkehrsflusssimulation mit sogenannten zellulären Automaten basiert. Das an der Universität Duisburg-Essen entwickelte Verfahren (SCHRECKENBERG et al., 2005) wurde im Autobahnnetz in Nordrhein-Westfalen für die Ermittlung der Verkehrslage

genutzt. Aus den Simulationen ergeben sich die mittlere Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit auf den modellierten Straßenstrecken. Die Simulation erfüllt zwei wesentliche Aufgaben: Einerseits interpoliert sie die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit zwischen den einzelnen Messstellen, um auch in den nicht durch stationäre Detektoren abgedeckten Gebieten Daten zu erhalten. Andererseits ermöglicht die Simulation eine Kurzfristprognose der Verkehrsstärken und der Fahrtzeiten. Das Verfahren PTV OPTIMA (OTTERSTÄTTER et al., 2013b) ist ein weiteres Beispiel für ein Simulationsverfahren, das ein makroskopisches Flussmodell nutzt.

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

1. Vorteile

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

2. Nachteile

- Die Güte der Fahrtzeitdaten hängt stark von der Qualität des Modells, von den Abständen der lokalen Detektoren und von der Qualität der Datenerfassung ab.

- Es können in der Regel keine Fahrtzeiten für komplette Routen, sondern nur für Teilrouten auf detektierten Straßennetzen (Autobahn) ermittelt werden.

2.4.3 Fahrtzeitermittlung mit raumdiskreter Fahrtzeitmessung

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

Die Berechnungen der Fahrtzeiten über raumdiskrete Fahrzeugwiedererkennung können lediglich mittlere Geschwindigkeiten ermitteln. Diese mittlere Geschwindigkeit wird durch die lineare Verbindung zwischen den Erfassungszeitpunkten ausgedrückt, während bei realen Fahrtverläufen Geschwindigkeitsunterschiede auftreten können. Dadurch können keine direkten Aussagen zum räumlichen und zeitlichen Verlauf oder zu eventuell auftretenden Störungen gemacht werden. Aussagen hierzu können nur indirekt durch den Vergleich von Einzelmesswerten oder zeitlich aggregierten Werten gemacht werden. In Bild 2-4 ist der zeitlich-räumliche Verlauf von Einzelfahrzeugen zu sehen. Die gestrichelten Linien stellen die mittleren Geschwindigkeiten der detektierten Fahrzeuge dar. Diese Linien sind die lineare Verbindung zwischen den beiden Erfassungszeitpunkten. Die durchgezogenen Linien stellen den realen Fahrtzeitverlauf zwischen den Messquerschnitten dar (SPANGLER, 2009).

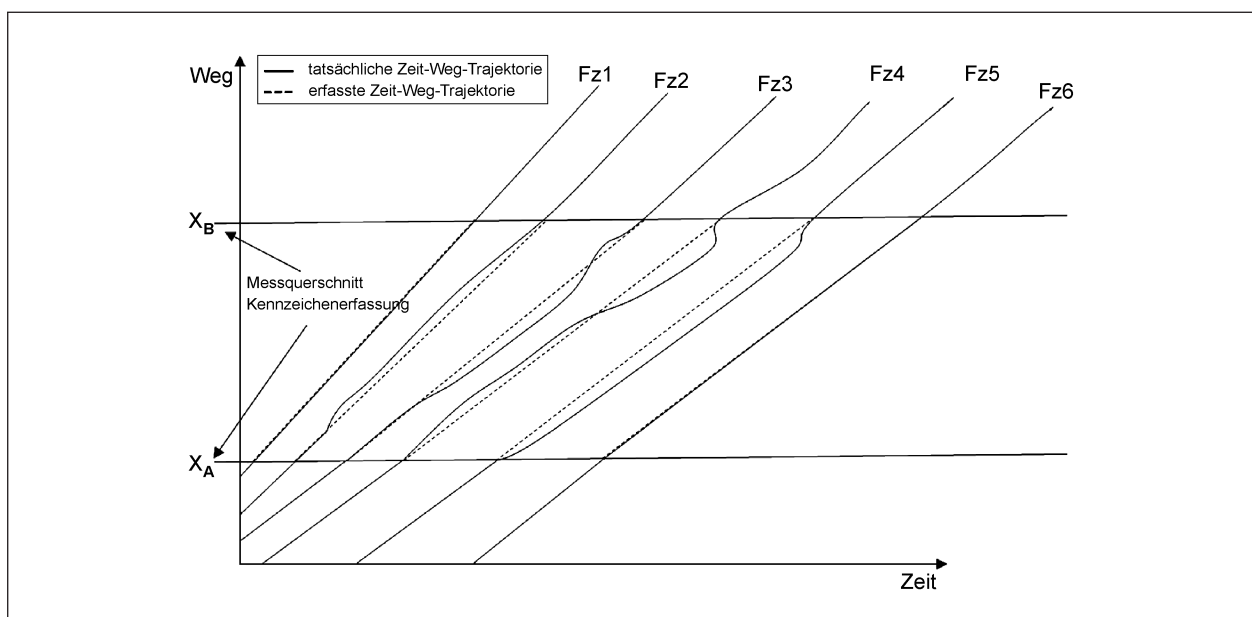


Bild 2-4: Zeitlich-räumliche Betrachtung von Einzelfahrzeugen (eigene Abbildung)

2.4.3.1 Floating-Phone-Daten (FPD)

Mobilfunknetze in Deutschland verwenden die Frequenzbereiche der GSM-, UMTS- und der LTE-Standards. Sie stellen die Basisinfrastruktur für die mobile Kommunikation dar. Die Netze der Mobilfunkbetreiber ermöglichen nahezu lückenlose Kommunikation in Deutschland. Ein Mobilfunknetz besteht aus einer Menge an benachbarten Gebieten, den Funkzellen. Diese Funkzellen besitzen Durchmesser von unter 100 Metern bis zu mehreren Kilometern. Der Durchmesser ist abhängig von der Region und der Anzahl der Personen im Gebiet. Jede Funkzelle wird über eine sogenannte Basisstation angeschlossen. Nach Bild 2-5 kann eine Basisstation bis zu drei Sektoren versorgen (STEINHART, 2015).

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

Routen gezogen, um mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den zeitlichen Verlauf der getätigten Ortsveränderung zu identifizieren (SCHLAICH et al., 2011). Bild 2-6 zeigt ein Beispiel einer Ermittlung von Fahrtzeiten aus FPD.

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

1. Vorteile

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

2. Nachteile

- Die Daten sind derzeit noch nicht allgemein verfügbar.
- Fahrtzeitmessungen sind nur für Netzabschnitte möglich, die einen ausreichenden Anteil an Durchgangsfahrten aufweisen.
- Ergebnisse aus 2011 gehen davon aus, dass Fahrtzeiten nur aus längeren Ortsveränderungen von mindestens ca. 20 km abgeleitet werden können. Bei einer hohen Funknetzdichte sind auch Auswertungen für geringere Längen möglich. (SCHLAICH et al., 2011). In

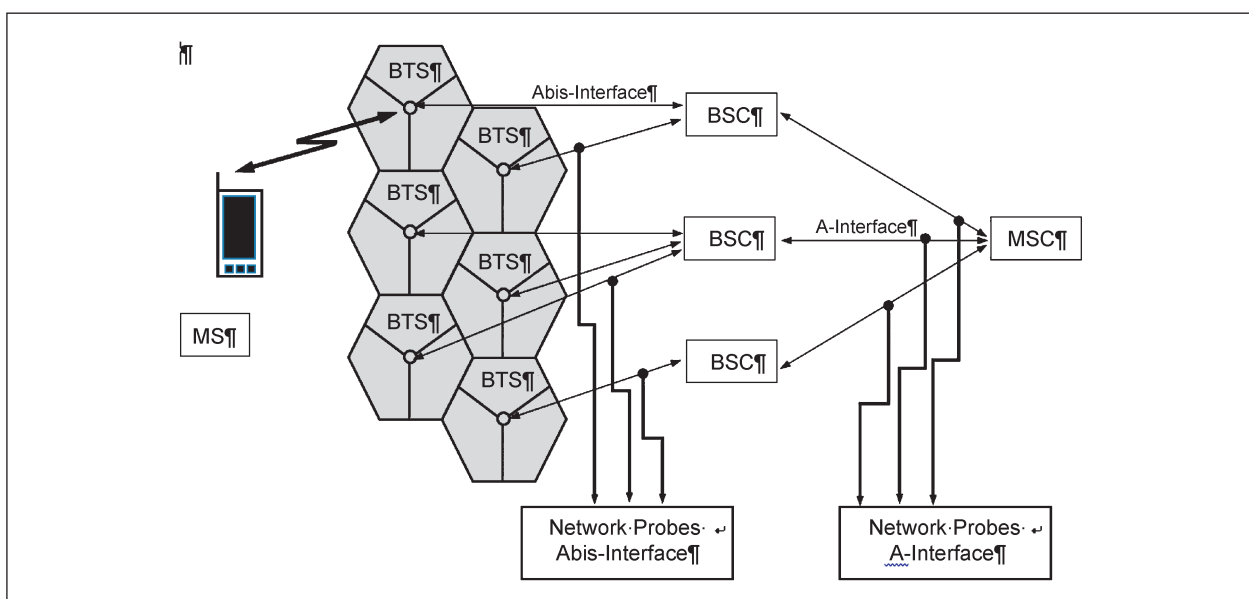


Bild 2-5: Zellulärer Aufbau eines Mobilfunknetzes

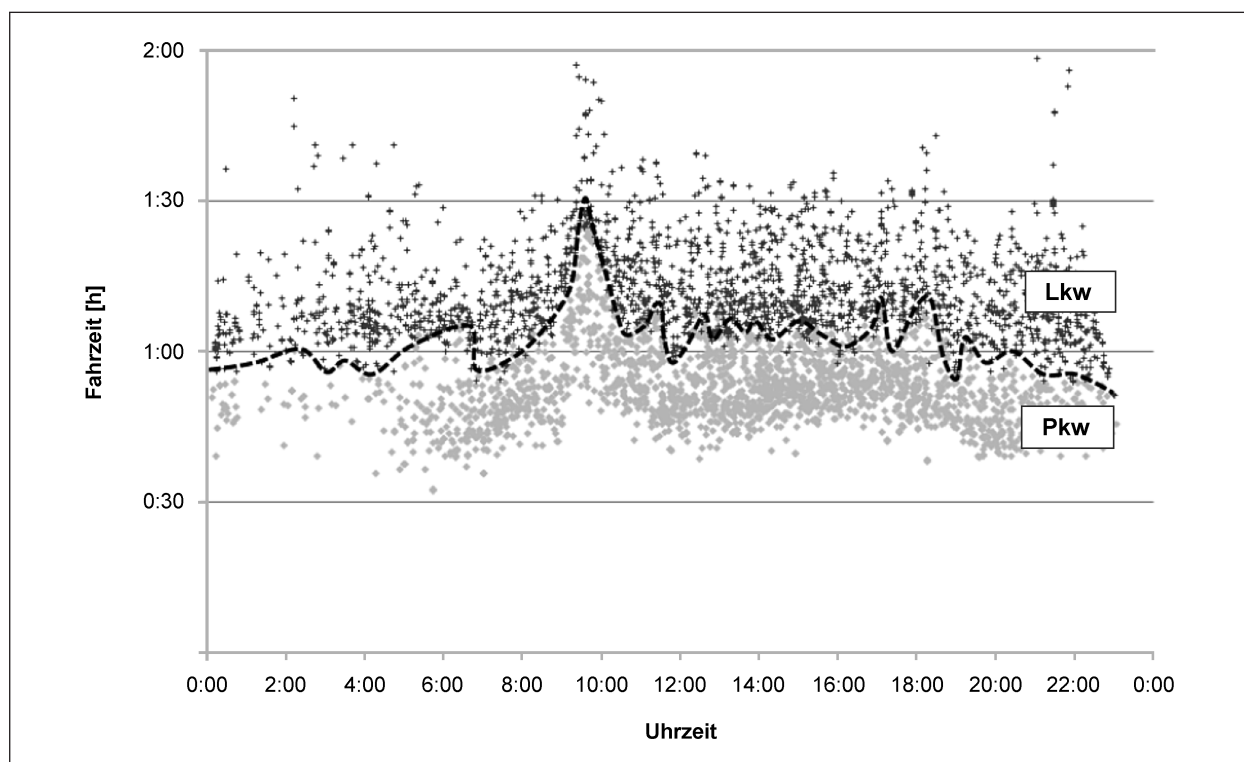


Bild 2-6: Fahrzeiten zwischen Stuttgart und Walldorf (über Karlsruhe) und Aufteilung in die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw (SCHLAICH et al., 2011)

dichten Stadtnetzen lassen sich Fahrzeiten deshalb nur für übergeordnete Straßen (etwa ab Verbindungsfunktionsstufe III) abschätzen. Seit 2011 hat die Zahl der Messdaten pro SIM-Karte allerdings zugenommen, sodass zukünftig Fahrzeitdaten möglicherweise auch für das gesamte Straßennetz erfasst werden können.

- Das Auftreten eines Störfalls lässt sich durch eine erhöhte Fahrzeit erkennen. Die Lage der Störung ist mit diesem Verfahren nur eingeschränkt lokalisierbar und hängt von der Gestaltung des Mobilfunknetzes ab.

2.4.3.2 Kennzeichenerfassung (ANPR)

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

Fahrestreifen beobachten und erfassen. Bild 2-7 verdeutlicht den Ablauf der Kennzeichenerkennung.

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

1. Vorteile

- Hohe Erkennungsrate.
- Hoher Stichprobenumfang.
- Ermittlung sehr genauer Fahrzeitdaten mit hoher Güte.

2. Nachteile

- Hohe Investitionskosten.

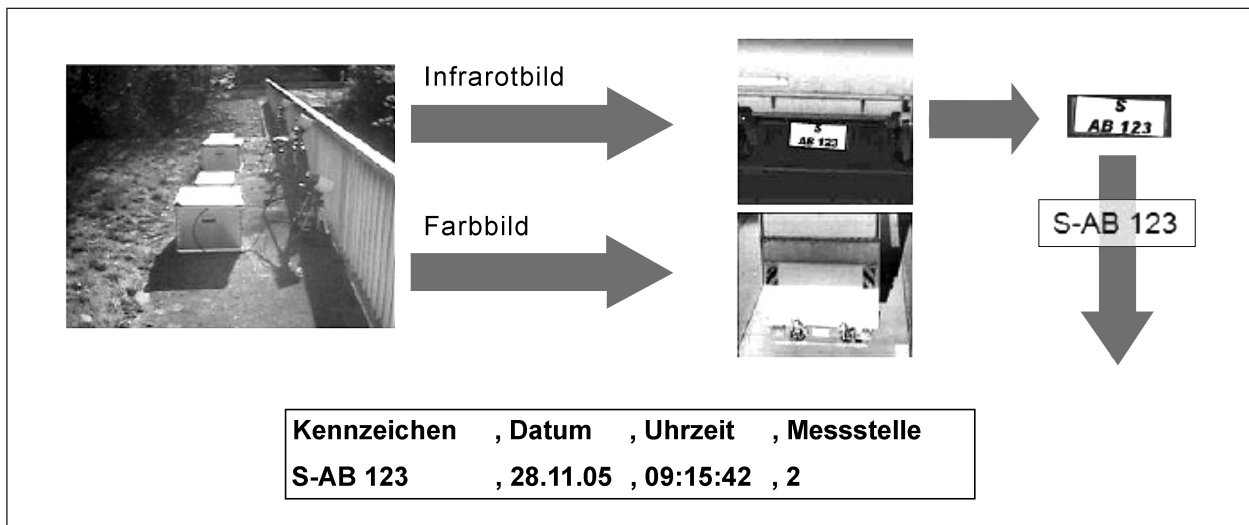


Bild 2-7: Schematischer Ablauf einer Kennzeichenerkennung (FRIEDRICH et al., 2009)

- Die Erfassung von Kennzeichen wird auch bei einer Verschlüsselung der Kennzeichen von den Datenschützern der Bundesländer unterschiedlich beurteilt und ist nicht in jedem Bundesland möglich.
- Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden.
- Der zeitliche Verlauf zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden.
- Es können in der Regel keine Fahrtzeiten für komplette Routen, sondern nur für Teilrouten auf detektierten Straßennetzen (Autobahn) ermittelt werden.
- Für die Erfassung einer Kreuzung reichen ein bis zwei Geräte.
- Einfache Montierung (es genügt, die Geräte in einem vorhandenen Schaltkasten am Straßenrand unterzubringen).

2. Nachteile

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

2.4.3.3 Bluetooth

Bluetooth dient der Funkvernetzung von mobilen Geräten über kurze Distanz. Will ein mobiles Gerät mit anderen Geräten in Kontakt treten, sendet es vor Aufbau der Datenverbindung fortlaufend seine eindeutige MAC-Adresse. Ein Beispiel für mobile Geräte im Pkw sind Mobilfunkgeräte mit einer Freisprecheinrichtung. Über die MAC-Adresse können – ähnlich wie bei ANPR-Systemen – Fahrzeuge an unterschiedlichen Stellen im Netz wiedererkannt werden. In MARGREITER et al. (2015) werden Detektionsraten von rund 35 % für eine Autobahnstrecke von etwa 5 km ohne Ausfahrten angegeben. Bei der Fahrtzeitermittlung mittels Bluetooth ergeben sich folgende Vor- und Nachteile:

1. Vorteile

- Deutlich preiswerter als ANPR.

2.4.3.4 Fahrtzeitermittlung aus Messfahrten

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

1. Vorteile

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

2. Nachteile

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

2.4.4 Fahrzeitermittlung mit raumkontinuierlicher Fahrtzeitmessung

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

- Als Floating-Car-Daten (FCD) werden die Daten bezeichnet, die von Fahrzeugen im Straßenverkehr erfasst werden. Im Fahrzeug wird die aktuelle Fahrzeugposition kontinuierlich mit Hilfe der Navigationssatellitensysteme erfasst, sodass die genaue Zeit-Weg-Trajektorie bekannt ist.
- Die Bezeichnung „Floating-Smartphone-Data“ soll die positionsbezogenen Daten, die aufgrund unterschiedlichster Dienste und Anwendungen auf einem Smartphone erzeugt und an Anbieter übermittelt werden, umschreiben. Diese Anwendungen können zwar nicht auf fahrzeugseitig erfasste Daten (zurückgelegte Weglänge) zurückgreifen, die Positionsbestimmung kann aber im Gegensatz zu FCD durch GSM-Ortung und WLAN-Ortung verbessert werden.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden FCD und FSD einheitlich als FCD bezeichnet. Tabelle 2-15 gibt eine Übersicht über kommerzielle Datenquellen für FCD und deren Dateninhalte. Derzeit bieten in Deutschland vier Anbieter Fahrtzeitdaten an, die aus Navigationsgeräten oder Navi-Apps abgeleitet werden.

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

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

Dazu müssen die Geschwindigkeitsdaten zeitlich und räumlich aufgelöst archiviert werden. Bild 2-8 zeigt eine Heatmap für einen Netzabschnitt und die aus dieser Heatmap generierten Fahrtzeit-Trajektorien für 12 Abfahrtszeitpunkte je Stunde.

FCD aus kommerziellen Datenquellen haben folgende Vor- und Nachteile:

1. Vorteile

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

Datenquelle	V _{zulässig}	Perzentile	Mittelwert	Hits, Nachfrage	Bezugsobjekt für Fahrtzeit
Google	-	optimistic best guess pessimistic	-	-	Relation (Route)
HERE	✓	✓	✓	✓	Teilstrecke
INRIX	✓	best guess	-	-	Teilstrecke
TomTom	✓	✓	✓	✓	Teilstrecke

Tab. 2-15: Übersicht über FCD-Datenquellen und Dateninhalte

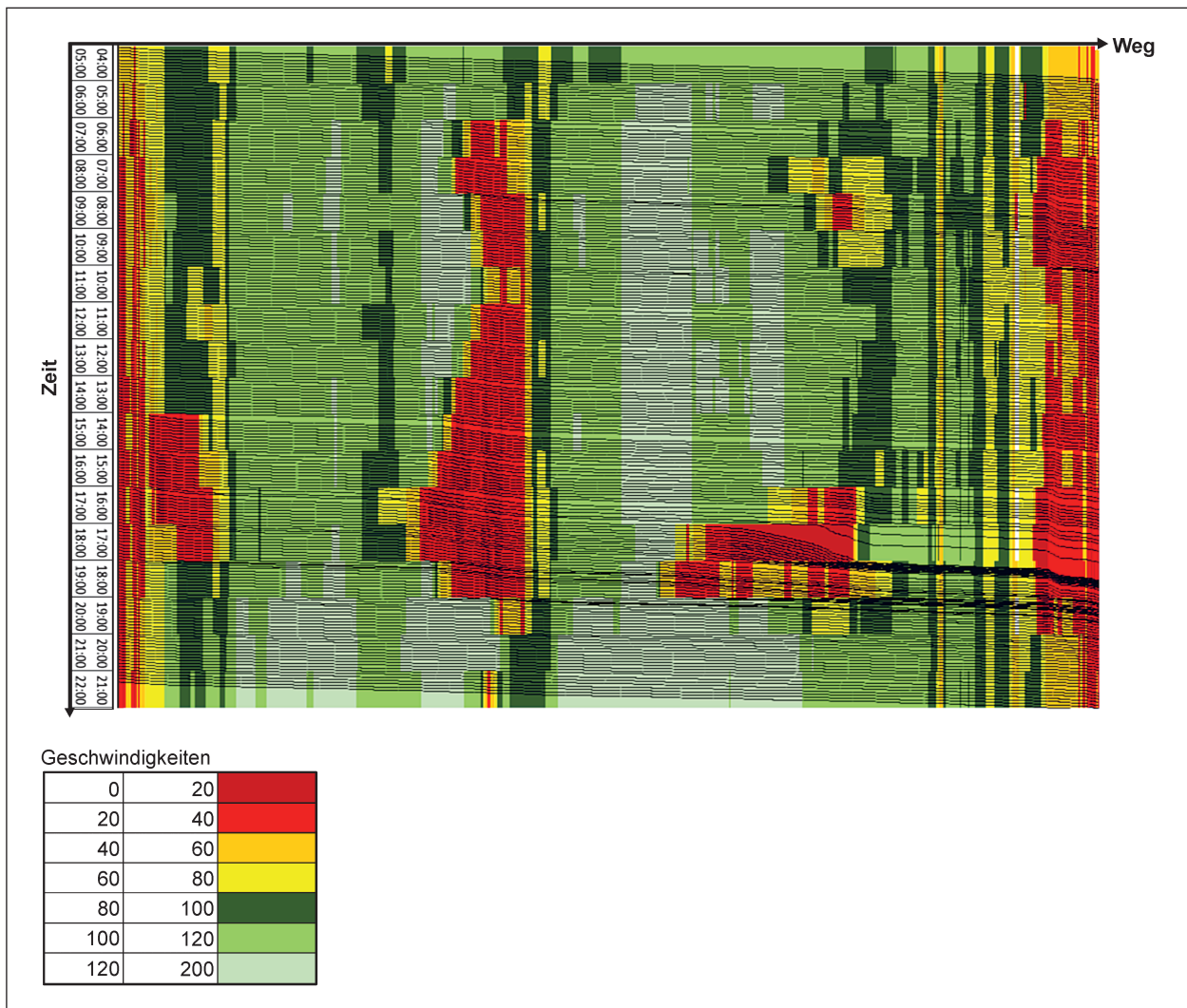


Bild 2-8: Mittlere Zeit-Weg-Trajektorien in einer Heatmap, in der Geschwindigkeiten abhängig von Ort und Zeit eingetragen werden.

2. Nachteile

- Für die Ermittlung von Fahrzeitverteilungen müssen die Geschwindigkeitsdaten zeitlich und räumlich aufgelöst archiviert werden und dann daraus mittlere Fahrzeit-Trajektorien generiert werden. Diese Trajektorien sind dann Input für die Fahrzeitverteilungen.

2.4.5 Vergleich der Fahrzeitermittlungsverfahren

Tabelle 2-16 gibt eine Übersicht über die Eigenschaften der vier Verfahrensklassen für die Fahrzeitermittlung. Aufbauend auf diesen Eigenschaften zeigt Tabelle 2-17 eine erste Bewertung der Verfahrensklassen. Die Bewertung erfolgt nach drei Kriterien:

- Eignung für Fahrzeitermittlung auf Teilstrecken, Strecken, Netzabschnitten und Relationen.
- Erwartete Qualität bei der Ermittlung mittlerer Fahrzeiten, von Fahrzeitverteilungen und der Erfassung von Fahrzeiten bei Abbiegevorgängen.
- Prognosefähigkeit für eine Kurzzeitprognose, eine Mittelfristprognose und eine Maßnahmenprognose.
 - Eine Kurzzeitprognose prognostiziert den Verkehrszustand für einen Zeitpunkt in 5 Minuten bis zu etwa 120 Minuten. Im einfachsten Fall wird angenommen, dass die aktuelle Verkehrslage in diesem Zeitraum unverändert bleibt. Diese Vorgehensweise ist bei Verfahren mit einer Fahrzeitmessung (ANPR, Bluetooth, Mobilfunk, FCD) üblich. Bei einer

Verfahrens- klasse	Datenquelle	Ergebnisse	Typischer Anteil der erfassten Fahrzeuge ①	Eigenschaften der Verfahrensklasse
Verkehrsnachfragebasierte Fahrzeitmodellierung	Verkehrsstärken aus Messungen oder Verkehrsnachfragemodellen in Kombination mit Fahrzeitermittlungsmodellen	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsstärken Fahrzeiten je Strecke Fahrzeiten für Routen 	<ul style="list-style-type: none"> Es werden keine Einzelfahrzeuge erfasst 	<ul style="list-style-type: none"> Die Fahrzeiten werden nicht gemessen, sondern modelliert. Fahrzeitverlängerungen aufgrund zufälliger Störungen können nicht ermittelt werden. Der Ort von regelmäßigen Störungen aufgrund hoher Auslastung kann abgeschätzt werden. Fahrzeiten können für zukünftige Netz- und Nachfragezustände abgeschätzt werden. Verkehrsnachfragemodelle können Nachfragedaten für die Gewichtung bereitstellen.
Verkehrszustandsbasierte Fahrzeitmodellierung	Lokale Verkehrszustände aus stationären Detektoren in Kombination mit Flussmodellen oder Rekonstruktionsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsstärke nach Fahrzeugklasse Fahrzeiten zwischen MQ 	<ul style="list-style-type: none"> Bis zu 100 % der Fahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> In Verbindung mit Verkehrsflussmodellen oder Rekonstruktionsverfahren kann die Fahrzeit zwischen benachbarten Messquerschnitten abgeschätzt werden. Der Ort einer Störung kann mit dem Verkehrsmodell abgeschätzt werden. Bei ausreichender Detektordichte kann die Verkehrsablaufqualität quantifiziert werden. Die gemessenen Verkehrsstärken können für die Gewichtung der Fahrzeiten genutzt werden.
Raumdiskrete Fahrzeitmessung	Floating-Phone-Daten (FPD)	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeiten zwischen MQ gewählte Routen Quellen und Ziele 	<ul style="list-style-type: none"> Ca. 20 bis 30 % aller Fahrten, sofern eine Fahrtweite von 10 bis 20 km überschritten wird (SCHLAICH et al., 2011) 	<ul style="list-style-type: none"> Eine direkte Fahrzeitermittlung ist möglich. Die Lage der Messquerschnitte wird durch die Netzarchitektur des Mobilfunknetzes vorgegeben. Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann genau nicht erfasst werden.
	Automatische Kennzeichenerfassung (ANPR)	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeiten zwischen MQ gewählte Routen Durchgangsverkehr 	<ul style="list-style-type: none"> 70 % bis 80 % der Fahrzeuge (FRIEDRICH et al., 2009) 	<ul style="list-style-type: none"> Eine direkte Fahrzeitermittlung ist möglich. Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden. Die Verfahrensklasse benötigt straßenseitige Detektoren und eignet sich daher nicht für Teilstrecken.
	Bluetooth	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeiten zwischen MQ gewählte Routen 	<ul style="list-style-type: none"> Bis zu 35 % der Fahrzeuge (MARGREITER et al., 2015) 	<ul style="list-style-type: none"> Eine direkte Fahrzeitermittlung ist möglich. Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden. Die Verfahrensklasse benötigt straßenseitige Detektoren und eignet sich daher nicht für Teilstrecken.
	Fahrzeugsignaturen aus stationären Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeiten für MQ mit kurzen Abständen 	<ul style="list-style-type: none"> Etwa 10 % der Fahrzeuge (MAIER und ROTH, 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> Eine direkte Fahrzeitermittlung ist für kurze Strecken über die Fahrzeugsignaturen möglich.
Raumkontinuierliche Fahrzeitmessung	Floating-Car-Daten (FCD) ② für Einzelfahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeiten zwischen beliebigen Punkten Orte von Störungen gewählte Routen (bei ausreichender Erfassungsrate) 	<ul style="list-style-type: none"> Je nach Ausstattungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> Eine direkte Fahrzeitermittlung ist möglich, wenn die Zahl der erfassten Fahrzeuge groß genug ist. Der Ort einer Störung kann genau erfasst werden. Fahrzeiten von abbiegenden Fahrzeugen
	Floating-Car-Daten (FCD) ② aufbereitet als Streckendaten	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeiten zwischen beliebigen Punkten Orte von Störungen 	<ul style="list-style-type: none"> Je nach Ausstattungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> Eine direkte Fahrzeitermittlung ist möglich, wenn die Zahl der erfassten Fahrzeuge groß genug ist. Der Ort einer Störung kann genau erfasst werden.

① Bei den Verfahren mit einer raumdiskreten Fahrzeitermittlung beziehen sich die Detektionsraten auf die Zahl der Fahrzeuge, die an beiden Messquerschnitten wiedererkannt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich zwischen den Messquerschnitten keine Ausfahrt befindet. Bei den ANPR-Systemen wird von einer Erfassung aller Fahrstreifen ausgegangen.

② Die Klasse der FCD umfasst auch Daten, die mit Geräten erfasst wurden, die nicht fest in einem Fahrzeug eingebaut sind (Smartphones, nicht fest eingebaute Navis)

Tab. 2-16: Verfahren der Fahrzeitermittlung (abgeleitet aus FRIEDRICH et al., 2015)

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

Tab. 2-17: Bewertung der Verfahren der Fahrzeitermittlung für die Ermittlung von Fahrzeiten und Fahrzeitverteilungen auf Teilstrecken, Strecken, Netzabschnitten und Relationen im Autobahnnetz

modellbasierten Kurzfristprognose werden Veränderungen der Verkehrszustände prognostiziert. Dazu werden gemessene Verkehrszustände und ggf. auch bekannte Kapazitätsengpässe herangezogen (siehe Kapitel 2.4.2).

- Eine Mittelfristprognose prognostiziert zu erwartende Fahrzeiten oder Verkehrszustände an einem bestimmten Tag in der Zukunft. Die prognostizierten Fahrzeiten werden aus den historischen Fahrzeiten abgeleitet. Diese Vorgehensweise geht davon aus, dass Fahrzeiten für typische Verkehrstage und typische Tageszeiten ähnlich sind. Grundlage für diese Art der Prognose bieten alle Verfahren, die Fahrzeitverteilungen ermitteln können.
- Eine Maßnahmenprognose prognostiziert die Wirkung einer Maßnahme auf die Fahrzeit. Typische Maßnahmen sind Kapazitätsänderungen aufgrund von Baustellen. Um diese Wirkungen zu ermitteln, sind Modelle mit ei-

ner verkehrsnachfragebasierter Fahrzeitmodellierung erforderlich.

Die Bewertung zeigt folgende Ergebnisse:

- Eine Fahrzeitermittlung mit einer verkehrsnachfragebasierter Fahrzeitmodellierung liefert keine Daten, mit denen tatsächliche aufgetretene Fahrzeiten und Fahrzeitverteilungen angemessen nachgebildet werden können. Verfahren dieser Klasse sind deshalb keine geeignete Grundlage für ein KPI-System für die kontinuierliche Bewertung der Verkehrsablaufqualität. Die Verfahren dienen der Prognose von Maßnahmen.
- Alle anderen Verfahrensklassen sind als Grundlage für ein KPI-System geeignet, da sie tatsächliche Fahrzeiten abschätzen oder messen können.
- Die höchste Qualität und die höchste räumliche Auflösung liefert die Auswertung von Floating-Car-Daten (FCD) für Einzelfahrzeuge. Diese Daten stehen derzeit allerdings nicht als kommerzi-

elle Daten zur Verfügung. Streckengeschwindigkeiten aus aufbereiteten Floating-Car-Daten sind dann eine gute Grundlage, wenn die Fahrzeitverteilungen in einer hohen zeitlichen Auflösung aus dem Mittelwert berechnet werden.

In Kapitel 4 werden dann für ausgewählte Datenquellen umfassendere Konzepte erarbeitet und bewertet.

2.5 Datenquellen für Verkehrsnachfragedaten

Bei einer Bewertung der Verkehrsablaufqualität beschreibt die Verkehrsnachfrage die Zahl der betroffenen Verkehrsteilnehmenden. Wie in Kapitel 2.3 dargestellt, sind zeitlich und räumlich differenzierte Nachfragedaten in Form von Verkehrsstärken für folgende Aufgaben erforderlich:

- Gewichtung einzelner Verkehrszustände,
- Ermittlung des Verlustzeitaufwandes (Fahrzeugstunden).

Hierfür ist folgende Differenzierung notwendig:

- Räumlich: Verkehrsstärken je Strecke.
- Zeitlich: Verkehrsstärken für jeden Zeitraum. Eine zeitliche Differenzierung in 24 Tageszeiträume ist dabei eine Mindestanforderung, bes-

ser sind kürzere Zeiträume von 15 oder 5 Minuten.

Tabelle 2-18 gibt einen Überblick über Datenquellen und Methoden, mit denen Verkehrsstärken bestimmt oder abgeschätzt werden. Die Methoden werden im Folgenden kurz beschrieben.

Nachfragedaten aus FCD-Hits

Kommerzielle Anbieter von FCD liefern für jede Teilstrecke und jeden Zeitraum sogenannte Hits, die der Zahl der beobachteten Fahrzeuge entsprechen. Diese Zahl kann für die Gewichtung der Verkehrszustände genutzt werden. Sie ist nicht geeignet, um den Verlustzeitaufwand zu bestimmen.

- Vorteil: einfache Methode.
- Nachteil: geringe Stichprobengröße, nicht geeignet für die Ermittlung des Verlustzeitaufwandes. Die Zahl der Hits kann sich durch Änderung der Flottengröße ändern.

Nachfragedaten aus Dauerzählstellen

Stationäre Dauerzählstellen liefern Verkehrsstärken differenziert nach Zeiträumen, die sich für eine Gewichtung gemessener Fahrzeiten eignen. Voraussetzung ist eine Dauerzählstelle für jede Strecke. Hierfür kommen zum einen die automatischen Zähl-

Bezeichnung	Datenquelle	Methode	Vorteile	Nachteile
Nachfragedaten aus FCD-Hits	• FCD-Hits	• Stichprobe wird als Näherung für die zeitliche Verteilung herangezogen	• einfach • für zeitliche Gewichtung ausreichend	• nicht geeignet für Verlustzeitaufwand
Nachfragedaten aus Dauerzählstellen	• Dauerzählstellen	• Verwendung gemessener Zählzeiten • Manuelle Zuordnung auf benachbarte Strecken ohne Dauerzählstellen	• robust und genau • feine zeitliche Differenzierung möglich	• erfordert eine Zählstelle je Strecke • Verkehrsstärken auf Strecken ohne Zählstellen können nur abgeschätzt werden
Nachfragedaten für typische Verkehrstage aus historischer Nachfragematrix mit einmaliger Matrixkorrektur	• Dauerzählstellen • historische Nachfragematrix	• Clusterung von Verkehrsstärken • Matrixkorrektur mit Verkehrsstärken typischer Verkehrstage	• liefert Verkehrsstärken für Strecken ohne Zählstellen • Differenzierung von Verkehrstagen	• erfordert Nachfragemodell • erfordert Matrixkorrektur einmal pro Jahr • nur typische Verkehrstage
Nachfragedaten für Kalendertage aus einer historischen Nachfragematrix mit kontinuierlicher Matrixkorrektur	• Dauerzählstellen • historische Nachfragematrix	• Clusterung von Verkehrsstärken • Matrixkorrektur mit Verkehrsstärken je Kalendertag	• liefert Verkehrsstärken für Strecken ohne Zählstellen • Differenzierung von Kalendertagen	• erfordert Nachfragemodell • erfordert kontinuierliche Matrixkorrektur

Tab. 2-18: Übersicht über Datenquellen und Methoden zur Ermittlung von Verkehrsstärken

stellen der BAST auf Autobahnen und Bundesstraßen in Frage, zum anderen können Zählstellen an Messquerschnitten für die Verkehrssteuerung genutzt werden. Für Strecken ohne Dauerzählstellen müssen die Verkehrsstärken aus benachbarten Zählstellen des jeweiligen Streckenzugs geschätzt werden. Die Zuordnung der Strecken ohne Zählstelle zu Dauerzählstellen erfolgt manuell.

- Vorteil: Die Methode bietet eine einfache und robuste Möglichkeit, Verkehrsstärken differenziert nach Kalendertagen oder typischen Verkehrstagen zu ermitteln.
- Nachteil: Die Methode setzt eine ausreichende Anzahl von Zählstellen voraus. Verkehrsstärken auf Strecken ohne Zählstellen können nur abgeschätzt werden. Das erfordert eine manuelle Zuordnung dieser Strecken zu Dauerzählstellen.

Nachfragedaten für typische Verkehrstage aus historischer Nachfragematrix mit einmaliger Matrixkorrektur

Diese Methode kombiniert die Methode der Matrixkorrektur mit der Methode der Clustering von Tagesganglinien. Bei der Clustering werden die Tagesganglinien der Verkehrsstärken aller Dauerzählstellen eines Streckenzugs den Clustern typischer Verkehrstagen zugeordnet (siehe Bild 2-9). Für diese typischen Verkehrstage wird dann für jede Stunde des Tages eine Matrixkorrektur durchgeführt. Dabei wird die modellierte Matrix so angepasst, dass die modellierten und gemessenen Verkehrsstärken für den Verkehrstag und die Tagesstunde möglichst gut übereinstimmen. Die genaue Vorgehensweise ist in OTTERSTÄTTER (2013a) beschrieben.

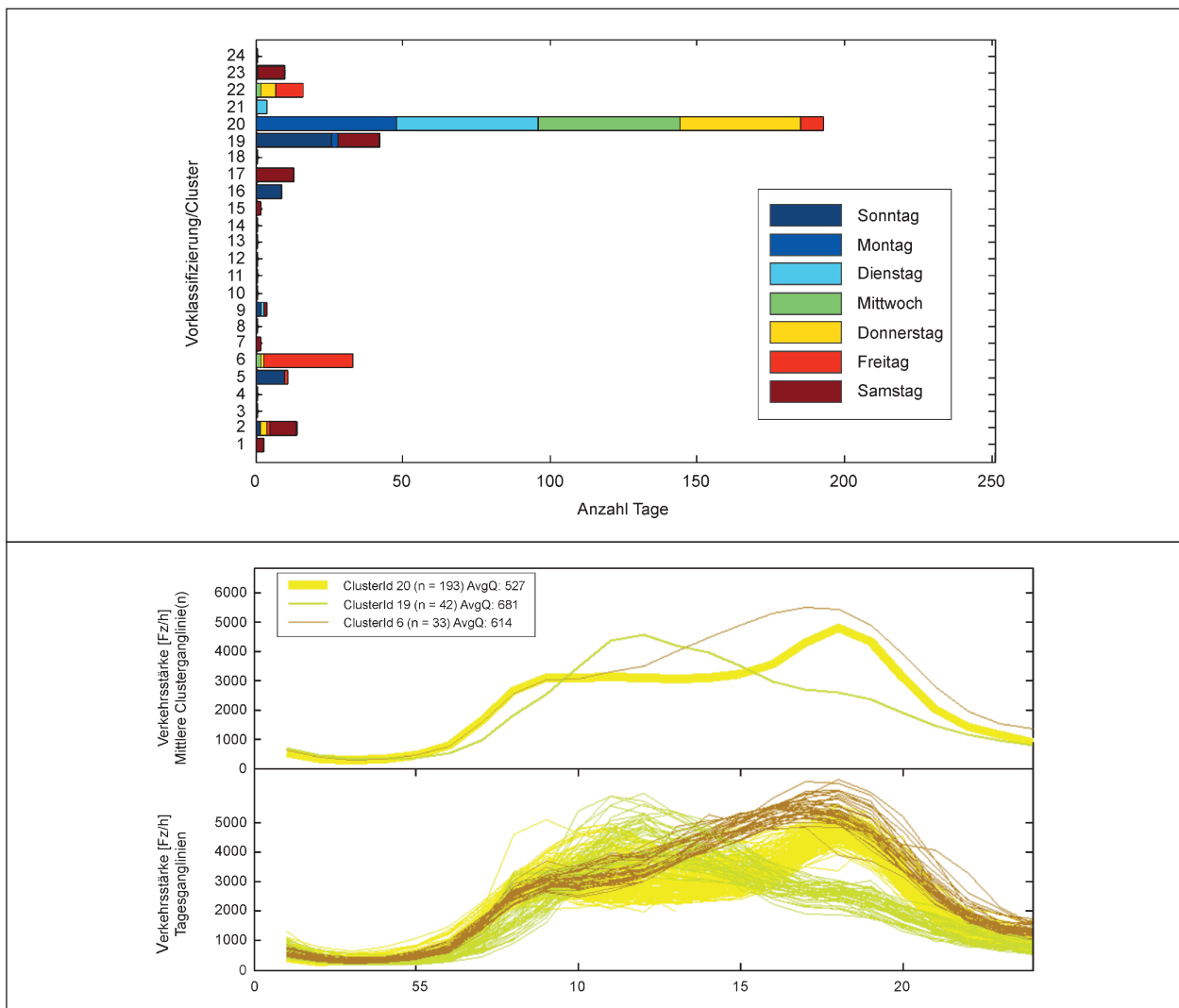


Bild 2-9: Beispiel einer Clustering von Tagesganglinien einer Dauerzählstelle. Die Clustering ergibt 24 Cluster mit typischen Verkehrstagen (Bild oben). Drei dieser Cluster (Nummer 6, 19 und 20) sind unten als mittlere Ganglinie des Clusters und als Einzelganglinien dargestellt.

- Vorteil: Die Methode liefert räumlich und zeitlich differenzierte Verkehrsstärken für typische Verkehrstage.
- Nachteil: Es ist ein Verkehrsnachfragemodell erforderlich, das zeitlich differenzierte Nachfragematrizen und Verkehrsstärken aus einer Umlegung bereitstellt. Außerdem muss regelmäßig (z. B. einmal pro Jahr) eine Clusterung und eine Matrixkorrektur durchgeführt werden. Die Zahl der Verkehrstage wird sich auf wenige typische Verkehrstage (Werktag, Samstag, Sonn- und Feiertag) beschränken. Die Verkehrsstärken können differenziert nach Zeiträumen von 60 Minuten bereitgestellt werden. Für eine feinere zeitliche Differenzierung ist entweder eine dynamische Matrixkorrektur erforderlich oder die Stundenwerte müssen mit Tagesganglinien geeigneter Dauerzählstellen aufgeteilt werden.

Nachfragedaten für Kalendertage aus einer historischen Nachfragematrix mit kontinuierlicher Matrixkorrektur

Diese Methode entspricht der oben beschriebenen Methode mit einmaliger Matrixkorrektur. Sie erweitert die Methode so, dass die Matrixkorrektur nicht die Zählwerte eines typischen Verkehrstages, sondern des konkreten Kalendertages nutzt. Auf diese Weise können zeitlich differenzierte Verkehrsstärken auf Strecken ohne Dauerzählstellen besser abgeschätzt werden.

- Vorteil: Die Methode liefert räumlich und zeitlich differenzierte Verkehrsstärken für jeden Kalendertag.
- Nachteil: Es ist ein Verkehrsnachfragemodell erforderlich, das zeitlich differenzierte Nachfragematrizen und Verkehrsstärken aus einer Umlegung bereitstellt. Außerdem muss regelmäßig (z. B. einmal pro Jahr) eine Clusterung durchgeführt werden. Die Matrixkorrektur muss für jeden Kalendertag und für alle Tageszeiträume durchgeführt werden.

2.6 Ergänzende Datenquellen

Die Verkehrsablaufqualität wird nicht nur von der Nachfragesituation beeinflusst, sondern auch von Ereignissen, die die Kapazität im Straßennetz verändern und so zu Fahrtzeitverlängerungen führen. Dazu gehören:

- Baustellen,
- Unfälle und
- extreme Wetterereignisse.

Die Ursachen von Störungen lassen sich aus einer Analyse historischer Fahrtzeiten nur schwer oder gar nicht erkennen, da die Fahrtzeitdaten in der Regel einen längeren Zeitbereich (Datumsbereich) umfassen. Ein Zusammenhang zwischen Fahrtzeiten und Störungsursache lässt sich dann untersuchen, wenn die zeitliche und räumliche Ausprägung der Störung bekannt ist und wenn die Störung im gesamten analysierten Zeitbereich vorhanden war.

2.7 Integriertes System zur Bewertung der Zuverlässigkeit

In einem Bericht der Federal Highway Administration (2006) wird eine Vorgehensweise vorgeschlagen, um Zuverlässigkeitsstatistiken zu erstellen:

1. Einsatzbereiche für Zuverlässigkeitskenngrößen festlegen

In diesem Schritt soll geklärt werden, wofür die Zuverlässigkeitskenngrößen verwendet werden sollen. Dabei sollen u. a. folgende Fragen beantwortet werden:

- Sollen die Kenngrößen von Entscheidungsträgern genutzt werden? Dann müssen einfach verständliche Kenngrößen gewählt werden.
- Sollen die Kenngrößen genutzt werden, um die Verkehrszustände kontinuierlich zu erfassen?
- Sollen die Kenngrößen genutzt werden, um Wirkungen von Maßnahmen des Verkehrsmanagements zu überwachen?
- Sollen die Kenngrößen verwendet werden, um verkehrsmittelübergreifende Investitionen zu beurteilen?

2. Entwicklung eines Konzepts

Im zweiten Schritt sollte ein Konzept entwickelt werden, das den Einsatzbereich und die Anwender des Systems berücksichtigt. Das Konzept soll u. a. folgende Aussagen enthalten:

- Festlegung der zu untersuchenden Verkehrsmittel, Netzabschnitte, Verkehrstage und Ta-

Status: Green Progress: Green	NATIONAL CONGESTION INDICATORS								
	Hours of Congested Travel Per Day			Travel Time Index			Planning Time Index		
Current Quarter	4.823			1.284			1.690		
Same Quarter, Previous Year	5.181			1.294			1.707		
Change vs. Previous Year	6.91% ↓			0.77% ↓			1.00% ↓		
National Congestion Pattern	# of Cities DOWN >5%	# of Cities NO CHANGE	# of Cities UP >5%	# of Cities DOWN >5%	# of Cities NO CHANGE	# of Cities UP >5%	# of Cities DOWN >5%	# of Cities NO CHANGE	# of Cities UP >5%
Total Cities: 19	9	4	6	2	17	0	4	13	2

Bild 2-10: Beispiel einer Darstellung von Zuverlässigkeitskenngrößen in einem monatlichen Staubericht (Bildquelle: Federal Highway Administration, 2006)

geszeiten. (Bei den Verkehrsmitteln ist unklar, ob damit Pkw und Lkw oder Pkw und ÖV gemeint sind.)

- Welche Zuverlässigkeitskenngrößen sollen berechnet werden?
- Wie werden die erforderlichen Daten erfasst und aufbereitet?
- Welche Software wird für die Datenaufbereitung und die Ergebnisdarstellung genutzt?
- In welcher Form und wie häufig werden die Ergebnisse den Nutzern/Entscheidungsträgern zur Verfügung gestellt?

3. Datenerfassung und Datenaufbereitung

Die Datenerfassung und Datenaufbereitung soll möglichst kontinuierlich erfolgen. Dafür muss eine geeignete Datenquelle gewählt werden (siehe Kapitel 2.3). Der Prozess soll qualitätsgesichert werden und Fahrzeitdaten für die elementaren Netzelemente liefern.

4. Berechnung der Zuverlässigkeitskenngrößen

Im vierten Schritt werden die Zuverlässigkeitskenngrößen (siehe Kapitel 2.2) als Kenngrößen für die gewählten Zeiträume berechnet und ausgewertet.

5. Bereitstellung der Messergebnisse

Im fünften Schritt sollen die Ergebnisse in verständlichen Grafiken und Tabellen dargestellt werden. Diese Darstellungen sollten die in Schritt 1 definierten Anforderungen widerspiegeln.

2.8 KPI-Systeme in der Qualitätssicherung

KPI-Systeme dienen häufig der Zielerreichungskontrolle. Daher spielen sie in vielen Qualitätsmanagement (QM)-Systemen und allgemeinen Evaluierungsprozessen eine wichtige Rolle. In den USA beispielsweise wurde im Jahr 2017 eine umfassende Rahmengesetzgebung zur Definition und Erhebung von „National Performance Management Measures“ im Transportsektor verabschiedet¹. Der Unterschied zwischen dem amerikanischen Performance Measurement und einem QM-System ist, dass ersteres ergebnisorientiert, QM-Systeme hingegen prozessorientiert sind. Auch in Qualitätsmanagement-Systemen sind Indikatoren für die Qualität eines Systems entscheidend. Im Rahmen des Kreislaufs von Qualitätsplanung, -lenkung, -prüfung und -verbesserung, der jedem QM zugrunde liegt, sind Qualitätskennwerte notwendig, um die Qualitätsprüfung vornehmen zu können. (BOLTZE et al., 2014)

In vielen amerikanischen Bundesstaaten werden Key-Performance-Indikatoren in sogenannten „Performance Dashboards“ dargestellt. Dokumentiert werden in Texas beispielsweise in Bezug auf den Verkehrsablauf ein Stau-Index (mittlere Reisezeiten über ein ganzes Jahr/Reisezeiten bei freier Fahrt innerhalb von Ballungszentren) und ein Zuverlässigkeitsindex (95%-Perzentil der Reisezeiten während

¹ https://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/perform_meas/index.htm; <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2017-01-18/html/2017-00681.htm>

der Spitzenstunde/Reisezeit bei freier Fahrt) sowie die mittlere jährliche Verspätung pro Person².

In der Rahmengesetzgebung wurden zur Quantifizierung des Verkehrsablaufs die Kenngrößen

- Percent of Person-Miles Travelled that are reliable (Level of Travel Time Reliability, jeweils für Interstate/Non-Interstate),
- Truck Travel Time Reliability Index,
- Annual Hours of Peak Hour und
- Excessive Delay Per Capita

vorgegeben. Es wird zu diesem Zweck eine eigene Datenbank durch die nationale Verkehrsbehörde FHWA unterhalten, der National Performance Management Research Data Set. Grundlage dafür sind unter anderem FCD. Gefahrene Reisezeiten werden in 5-Minuten-Intervallen aggregiert und hinsichtlich der Stautunden und Zuverlässigkeit (Travel Time Index und Planning Time Index) ausgewertet³. Weitere Kennzahlen dienen der Bewertung der Verkehrssicherheit, der Nutzerorientierung und dem effizienten Mitteleinsatz.

Weitere in den USA verwendete Kenngrößen zur Beschreibung der Verkehrsqualität sind⁴:

- Buffer-Index (Buffer Time Index, vgl. Kapitel 2.2.1),
- Staukosten
- Zeitverlust
- Reisezeit-Index
- Pendler-Stress-Index (wie Reisezeit-Index, aber Betrachtung der kritischen Fahrtrichtung)
- Planning Time Index (Reisezeit am stärksten belasteten Tag des Monats/Reisezeit bei freier Fahrt)
- niedrigste mittlere Geschwindigkeit auf Hauptachsen während der Spitzenstunde

Die amerikanischen KPIs zielen insgesamt primär auf die Information innerhalb der Behörden und gegenüber den Bürgern. Sie dienen dadurch der Zieldefinition, der Erfolgsmessung und einer Rechtfertigung der Mittelvergabe. Auch für Deutschland wurde beispielsweise vom Wissenschaftlichen Beirat beim Bundesminister für Verkehr schon vor fünf Jahren ein systematisches Qualitätsmanagement im Straßenverkehr angeregt (SVT, 2013). Nichtsdestotrotz gibt es bisher kein integriertes Gesamtkonzept, weder rein auf den Verkehrsablauf bezogen noch allgemein für den Bau, Betrieb und Erhalt von Straßen.

2.9 KPI-Systeme im Verkehrsmanagement

Im Gegensatz zur flächendeckenden Erfassung der Qualität des Verkehrsablaufs gibt es im Bereich der Verkehrsbeeinflussung, die notwendigerweise immer auf einzelne Teilstrecken begrenzt ist, ausführliche Regelwerke zur Qualitätssicherung und Wirksamkeitsmessung der jeweiligen Steuerungsmaßnahme. Da Verkehrsbeeinflussungsanlagen primär auf die Sicherung der Qualität des Verkehrsablaufs zielen, sind die innerhalb dieser Regelwerke entwickelten Qualitätskenngrößen auch für die Entwicklung eines allgemeinen KPI-Systems relevant. Sie unterscheiden sich grundsätzlich von diesem Forschungsvorhaben darin, dass sich die verfügbaren Daten immer auf eine bestimmte Teilstrecke beziehen. Ein Vorteil ist allerdings, dass diese Systeme auf die Detektion von Störfällen und damit einhergehenden Verkehrsphänomenen fokussieren. So sind Qualitätskenngrößen im Störfall nach KIRSCH-FINK und ARETZ (2009) bspw. die Häufigkeit von Verkehrsstörungen infolge des Störfalles, die Dauer dieses Störfalles und der Gesamtreisezeitverlust durch den Störfall.

Verkehrsbeeinflussungssysteme können aber umgekehrt auch von einem bundesweiten KPI-System profitieren, indem sie die Daten als zusätzlichen Input verwenden (siehe hierzu Kapitel 3.5). Dies würde auch die Zusammenarbeit mehrerer Bundesländer in diesem Bereich stärken. Bisher erarbeiten die Verkehrszentralen der einzelnen Bundesländer eigene Standards. In Hessen beispielsweise hat die dortige Verkehrszentrale bei Hessen Mobil eine Quantifizierung der Maßnahmenwirkung anhand einer differenzierten Auswertung der Stautunden eingeführt.⁵

² <http://www.dot.state.tx.us/dashboard/optimize-system-performance.htm>

³ https://www.fhwa.dot.gov/policy/2015cpr/chap5.cfm#_Toc463560685

⁴ <http://www.dot.ga.gov/BS/Performance>; <https://mobility.tamu.edu/ums/media-information/glossary/>

⁵ <https://wirtschaft.hessen.de/presse/pressemitteilung/1000-stautunden-weniger-als-2017>

Ein weiteres Instrument des Verkehrsmanagements ist die Netzbeeinflussung. Diese zielt auf eine Umverteilung der Fahrzeuge im Netz, anstatt auf eine Änderung des Fahrverhaltens auf gegebenen Strecken. Sie zielt also auf die Veränderung der Routenwahl. Aufgrund der größeren räumlichen Ausdehnung solcher Maßnahmen sind diese sehr viel komplexer in der Umsetzung als Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen. Mit zunehmender Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen könnte dieser Verkehrsmanagement-Ansatz in Zukunft aber an Bedeutung gewinnen. Grundsätzlich ist es denkbar, dass diese Maßnahme nicht nur zur Verhinderung oder Eindämmung von Staus als Folge von akuten Störungen zum Einsatz kommt, sondern auch, um statt des Nutzer-Gleichgewichts der Fahrzeiten das System-Optimum herzustellen. Für diesen Fall wäre es entscheidend, dass eine bundesweite, zuverlässige Datenbasis existiert, die exakte Informationen über die Verkehrslage enthält.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Daten eine elementare Grundlage für Planungen und Optimierungen im Straßenverkehr sind. Eine Erweiterung der Datengrundlage ermöglicht auch eine Erweiterung der Anwendungsfelder. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen:

- Verbesserung einer bestehenden Anwendung durch exaktere Daten,
- Anwendungen, die mit den herkömmlichen Daten nicht umsetzbar waren, und
- konsistenteren Ergebnissen durch eine vollständige und durchgängige Datenbasis.

3 Anwendungsmöglichkeiten und Nutzenpotenziale von KPI-Systemen

3.1 Mögliche Anwendungstypen von KPI-Systemen

Dieses Kapitel beschreibt die unterschiedlichen Anforderungen an ein KPI-System für die Verwendung in spezifischen Anwendungstypen. Basis dieser Betrachtung ist neben einer allgemeinen Herleitung auch die Durchführung von telefonischen Experteninterviews. In diesen Interviews wurden neben den bisherigen Erfahrungen mit KPI-Systemen in der praktischen Anwendung auch Anforderungen und

Detaillierungen von weiteren Anwendungen diskutiert.

Zum aktuellen Stand wurden Interviews mit folgenden Personen durchgeführt:

- Frau Dr.-Ing. Anja Estel, Abteilungsleiterin Verkehrsmanagement, Landesbetrieb Straßenbau NRW, Verkehrszentrale.
- Herr Gerd Riegelhuth, Präsident Hessen Mobil – Straßen- und Verkehrsmanagement.
- Herr Peter Schmitz, stv. Referatsleiter StB10 „Straßenbaupolitik, Straßennetzplanung, bilaterale Zusammenarbeit, BAST“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Frau Dr.-Ing. Ulrike Stöckert, Referatsleiterin GS4 „Oberflächeneigenschaften, Bewertung und Erhaltung von Straßen“; Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST).

In der Betrachtung der Einsatzfelder von KPI-Systemen lassen sich die Anwendungsmöglichkeiten bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung der Eingangsdaten und der Ergebniskennziffern unterscheiden.

Anwendungen im Bereich des Verkehrsmanagements stellen die größten Anforderungen an die räumliche Auflösung der Eingangsdaten. Je nach Fragestellung kann die streckenbezogene Aufbereitung aber auch bis zu ganzen Netzmaschen reichen. Für viele Anwendungen ist auch eine Auswertung von Autobahnstrecken zwischen Anschlussstellen erforderlich. Ein Sonderfall der räumlichen Auflösung stellt eine Darstellung im Raumbezug dar. Hierbei werden nicht mehr einzelne Netzelemente betrachtet, sondern die KPI werden gebietsbezogen z. B. auf Bundeslandebene ausgewertet.

Auch bei der Betrachtung der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung ergibt sich eine große Spannweite möglicher Anwendungen. Während einige Anwendungen die Bereitstellung von Echtzeit-Daten (Real-Time) erfordern, sind für andere Anwendungen zeitliche Aggregationen auf Stunden, Tage, Monate oder gar Jahre oder auch typische Verkehrssituationen (typische Werkzeuge etc.) erforderlich beziehungsweise sinnvoll.

Werden zeitliche und räumliche Anforderungen überlagert, ergibt sich die Möglichkeit der systematischen Gruppierung von Anwendungen. Es lassen sich dabei die folgenden vier Anwendungstypen kategorisieren:

1. Darstellung regelmäßiger Auswertungen zur Verkehrssituation in Eckwerten.
2. Engpassanalyse als Grundlage für die Bedarfsplanerstellung (zum Beispiel im Rahmen eines Bundesverkehrswegeplans).
3. KPI als Grundlage für Verfügbarkeitsbetrachtungen, z. B. zur Baustellenoptimierung oder zur lokalen Engpassanalyse.
4. Darstellung einer Real-Time-Verkehrslage für die Anwendung in der Straßenbauverwaltung (z. B. zur Kontrolle von Verkehrsmanagementsätzen oder Betriebsdienst).

Bild 3-1 zeigt die schematische Einordnung dieser Anwendungstypen vor dem Hintergrund der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Ergebniskennziffern.

Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen räumlicher und zeitlicher Auflösung der Ergebniskennziffern; bei hoher zeitlicher Anforderung steigt auch die Anforderung nach räumlicher Differenzierung. Zeitliche Aggregation steht meistens auch in einem Zusammenhang mit einer räumlichen Aggregation, sowohl mit Streckenbezug als auch im Raumbezug.

Die meisten Anwendungen basieren auf der Auswertung von zeitlich und räumlich aggregierten (historischen) Daten; einen Sonderfall stellt in der zeitli-

chen Betrachtung die Real-Time-Anwendung im Verkehrsmanagement dar, da hier Ist-Daten zum Einsatz kommen.

In den folgenden Unterabschnitten werden die vier benannten Anwendungstypen näher vorgestellt und hinsichtlich ihrer Anforderung an die Datengrundlage diskutiert. Dabei werden Anwendungen, Nutzer, relevante Kenngrößen, bisherige Vorgehensweisen und Herausforderungen beschrieben.

3.2 Auswertungen zur Verkehrssituation in Eckwerten

Auswertungen zu Eckwerten des Verkehrsgeschehens sind weit verbreitet. Verkehrsstatistische Kenngrößen werden seit mehr als 40 Jahren im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums im Standardwerk „Verkehr in Zahlen“ oder in den Veröffentlichungen der Bundesanstalt für Straßenwesen zu „Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen“ publiziert. Aussagen zur Verkehrsqualität finden sich dort jedoch nicht. Für öffentliche Aufmerksamkeit sorgen häufig sogenannte Staustatistiken, die beispielsweise vom ADAC (ADAC-Staubilanz) oder von kommerziellen Datenanbietern (INRIX Traffic Scorecard, Veröffentlichung von „Stauhauptstädten“) erstellt und veröffentlicht werden. Auch überregionale Printmedien publizieren regelmäßig Staus-

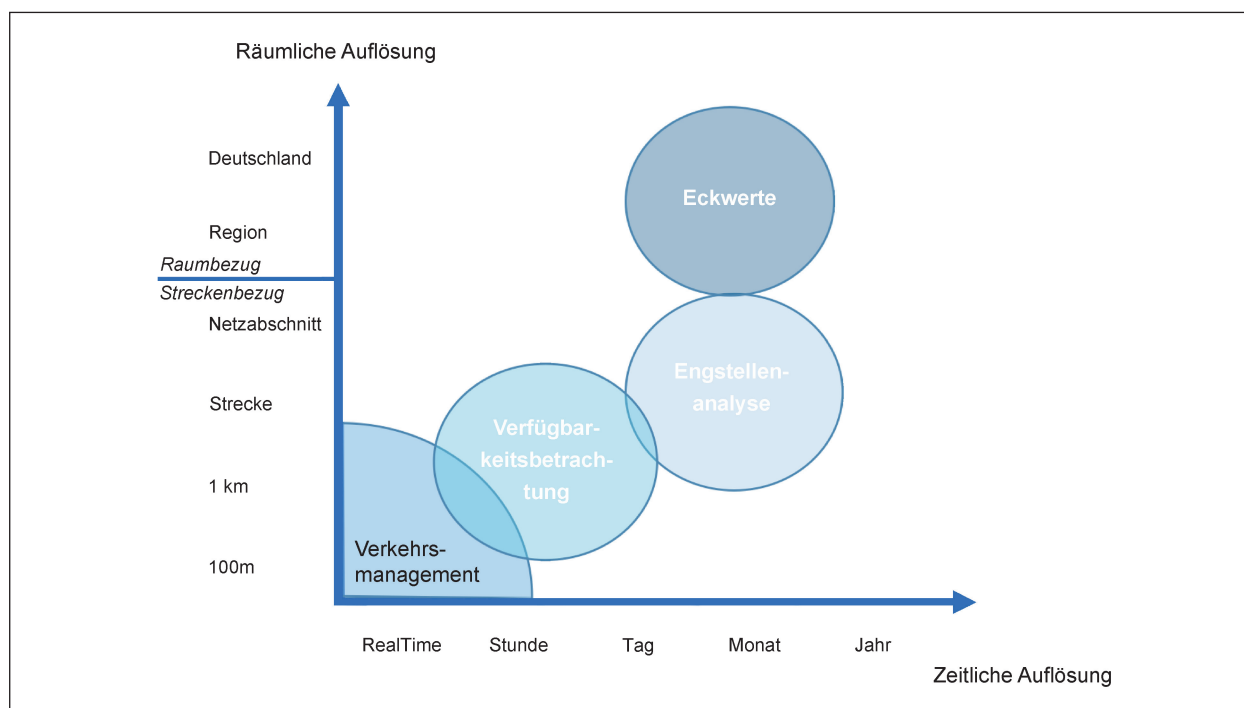


Bild 3-1: Schematische Übersicht der Anwendungsfelder

tatistiken oder Ermittlungen von staubedingten volkswirtschaftlichen Verlusten. Häufig sind die Datengrundlagen und die erforderlichen Modellierungen und Hochrechnungen nicht im Detail erläutert und führen daher zu Fehldeutungen und verfälschenden Aussagen durch Politik und Medien.

Anwendung

Regional werden auch Auswertungen und Statistiken zu Stausituationen von Auftragsverwaltungen veröffentlicht, wie beispielsweise in Hessen⁶. Hier fehlt aber wegen der fehlenden durchgängigen Datengrundlage die Hochrechnung und vergleichende deutschlandweite Aufbereitung.

Beispiele für diese Anwendung sind von der öffentlichen Hand publizierte oder herausgegebene Auswertungen zur Entwicklung der Verkehrssituation in Deutschland. Denkbare Differenzierungen sind hierfür regionale Aufbereitungen, z. B. eine Statistik nach Bundesländern. Eine nicht-raumbezogene Auswertung wären Informationen zu einzelnen Autobahnen oder eine entsprechende Karte. Es bietet sich an, diese Auswertungen im Monatsrhythmus zu veröffentlichen, um die Deutungshoheit (oder zumindest eine öffentliche Sicht) über Stausituationen zu erhalten.

Nutzer

Der direkte Nutzer ist eine zu bestimmende Einheit, die nach einer definierten Methode in regelmäßigen Abständen die Daten aufbereitet und veröffentlicht. Dieser Prozess sollte weitestgehend automatisiert erfolgen. Der Nutznießer ist die Öffentlichkeit, die kontinuierlich über die Entwicklung informiert wird. Indirekter Nutznießer ist die öffentliche Hand, die im Gegensatz zu den kommerziellen Anbietern Aussagen trifft, die auf einer veröffentlichten und transparenten Methode basieren, und damit die Deutungshoheit (zurück) gewinnt.

Kenngößen

Hierbei handelt es sich um das einzige Anwendungsfeld mit einer regionalen Aggregationsanfor-

derung. Für eine räumliche Aggregation ist es erforderlich, dass die Kenngröße ohne Informationsverlust summierbar ist. Denkbar sind daher Stautunden, oder analog zu Hessen eine Pünktlichkeitsbilanz. Unter Verwendung einer Nachfragegewichtung lassen sich Verlustzeitensummen bilden. Mit einem Kostensatz multipliziert können auch wirtschaftliche Verluste abgeleitet werden. Hierbei muss aber beachtet werden, dass dies zu einer politischen Diskussion über Finanzbudget für Straßenneubau führt, die der Neutralität des KPI-Systems schaden kann.

Für diese Aufbereitung ist eine Identifikation von Einflüssen von Baustellen und Unfällen nicht erforderlich.

Bisherige Vorgehensweise

Eine deutschlandweite regelmäßige Aufbereitung von Stausituationen wurde von der BAST oder dem Bundesverkehrsministerium bislang nicht durchgeführt. Das Bundesverkehrsministerium hat bis zum Jahr 2005 eine deutschlandweite Ferienverkehrsprognose erstellen lassen, die kritische Verkehrssituationen an konkreten Ferientagen ermittelt hat. Nach 2005 wurden vergleichbare Aufbereitungen nur noch von privaten Einrichtungen (z. B. dem ADAC) erstellt.

Herausforderung

Bei vorliegender Datengrundlage besteht die Herausforderung in einer speicherplatzoptimierenden Aufbereitung der zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Informationen, sodass die Aggregation des KPI automatisiert erfolgen kann. Eine entsprechende Methode muss hierfür entwickelt werden.

3.3 Engpassanalyse als Grundlage für die Bedarfsplanerstellung

Engpassanalysen bilden eine Grundlage für die Erstellung eines Bedarfsplans für Straßenaus- und -neubau auf allen administrativen Ebenen und helfen Investitionsbedarf zu identifizieren.

Anwendung

Der konkrete Anwendungsfall für diesen Ansatz ist die Schaffung von Grundlagen für den Aufbau eines

⁶ <https://wirtschaft.hessen.de/presse/pressemitteilung/1000-stautunden-weniger-als-2017>

Bedarfsplans bzw. dessen Aktualisierung. In der Zuständigkeit des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur liegt der Bedarfsplan für Bundesfernstraßen; generell kann dieses Verfahren aber auch von anderen Baulastträgern verwendet werden. Für die Bundesfernstraßen wird der Bedarfsplan im Prozess der Bundesverkehrswegeplanung aufgestellt. Für eine Identifikation von Engpässen ist es erforderlich, dass für einen längeren Zeitraum die Verkehrsqualität erfasst und aufbereitet wird. Sinnvoll ist die Zeitdauer eines Jahres. Im Fokus der Betrachtung steht die Identifikation von Engstellen, die auf zu geringer baulicher Kapazität basieren. Hierfür ist es erforderlich, Einflüsse von Baustellen und Unfällen auf den Verkehrsablauf möglichst genau zu identifizieren und im Rahmen der Aufbereitung zu eliminieren. Ansonsten besteht die Gefahr, dass der Bedarf für eine Netzerweiterung auf Basis einer lediglich temporären Einschränkung identifiziert wird. Berücksichtigt werden muss bei der Betrachtung, dass sich die Engpassanalyse nur auf die Ausgangssituation bezieht. Es muss in einem nachgelagerten Prozess geprüft werden, ob und wie sich die identifizierten Engstellen durch andere Netzänderungen oder Nachfrageänderungen bis zum Prognosezeitpunkt verändern werden.

Ergänzend kann auf dieser Basis auch ein lokales Stör- und Engstellenprogramm aufgesetzt werden. Hierbei ist es denkbar, dass analog zu einer Unfallkommission auch eine „Staukommission“ gebildet wird, die aus Sicht des Baulastträgers die größten Herausforderungen analysiert und wenn möglich durch kleinräumige Maßnahmen optimiert.

Nutzer

Die Nutzer sind in diesem Fall das Bundesverkehrsministerium sowie die Straßenbauverwaltungen der Bundesländer und der nachgeordneten Behörden, die verlässlichere Informationen über die realen und nach einheitlichem Maßstab identifizierten Engstellen in ihrer Baulastträgerschaft erhalten. Nutznießer ist zudem die Öffentlichkeit durch eine verlässlichere Planungsgrundlage.

Kenngroßen

Eine Engpassanalyse hat die Aufgabe, die größten lokal auftretenden Zeitverluste zu identifizieren. Hierbei sind nachfrageunabhängige oder nachfrageabhängige Kenngrößen vorstellbar. Im eigentli-

chen Sinn identifiziert eine Engstellenanalyse die Strecken im Straßennetz mit den größten Zeitverlusten. Dabei ist es zunächst unerheblich, wie viele Verkehrsteilnehmende betroffen sind. Aus Sicht der Bewertung und einem zu erzielenden maximalen Nutzen ist es jedoch sinnvoll, die Zeitverluste mit der jeweiligen Nachfrage zu gewichten. Bezugsgröße muss die Kapazität der Strecke ohne Baustellen und Unfälle sein.

Bisherige Vorgehensweise

Für die Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans 2030 (BMVI, 2016) wurde eine modellbasierte Engpassanalyse durchgeführt. Grundlage waren die Verkehrsnachfrage 2030 und das Bezugsfallnetz 2030, also der Netzstand, in dem bereits fest disponierte Maßnahmen als realisiert angenommen wurden. Die auf den Modellrechnungen basierende Engpassanalyse wurde zur Dringlichkeitsreihung in die Kategorie vordringlicher Bedarf – Engpassbeseitigung und zur Erfolgskontrolle (Vergleich der Engpassanalyse mit und ohne Bedarfsplanmaßnahmen) verwendet, aber nicht systematisch zur Maßnahmenidentifizierung eingesetzt.

Herausforderung

Ein KPI-System, wie es in dieser Untersuchung betrachtet wird, liefert zunächst nur eine Bewertung der realisierten Verkehrsablaufqualität für ein aktuelles Betrachtungsjahr. Hinsichtlich der Aufstellung eines Bedarfsplans muss darauf aufbauend noch mit Hilfe einer Modellprognose untersucht werden, inwieweit ein identifizierter Engpass in der Ausgangssituation auch zu einem Prognosezeitpunkt noch auftritt oder z. B. durch einen Ausbau einer parallelen Autobahn oder durch demografische Veränderungen an Relevanz verloren hat. Weiterhin ist für die Aufbereitung und Gewichtung der KPI-Informationen eine Methode zu entwickeln, um insbesondere die infrastrukturbasierten Reisezeitverluste von den unfall- und staubedingten Einschränkungen zu unterscheiden bzw. abzugrenzen.

3.4 Verfügbarkeitsermittlung

Die Information über die Verfügbarkeit einer Strecke kann für unterschiedliche Anwendungsfälle bei unterschiedlichen Arten der Kapazitätseinschränkungen (z. B. Baustellen) eingesetzt werden.

Anwendung

Die nachträgliche Analyse der Auswirkung von bestimmten Baustellensituationen liefert Erkenntnisse für künftige Verbesserungen in der Baustellenplanung und im Baustellenmanagement. Dabei ist eine hohe zeitliche und räumliche Differenzierung der Aufbereitung erforderlich. Mit diesem Ansatz soll es möglich sein, den Einfluss von einer bestimmten Baustellenverkehrsführung auf die Entwicklung der Verlustzeiten nachträglich zu identifizieren. Hieraus können Modellannahmen für die Prognose der Auswirkungen geplanter Baustellen abgeleitet werden. Bezugspunkt ist die jeweilige Kapazität der Infrastruktur, inkl. einer Information über die jeweiligen Kapazitätseinschränkenden Einflüsse.

Eine weitere verwandte Anwendung ist die Ermittlung der Verfügbarkeit von Erhaltungsabschnitten zur Verbesserung des Managements der vorausschauenden Erhaltungsplanung. Eine umfassende Aufbereitung der Streckenverfügbarkeiten lässt sich sowohl in Pavement Management Systeme (PMS) als auch in Bridge Management Systeme (BMS) integrieren und somit die Erhaltungsplanung auf eine bessere Datengrundlage stellen.

Eine dritte Anwendung für die Verfügbarkeitsermittlung ist der Bereich der Abrechnung mit privaten Betreibern von Autobahnen nach dem ÖPP-Prinzip. Während die ersten Projekte im sogenannten A-Modell mit einer verkehrsabhängigen Vergütung (anteilig der Lkw-Maut) abgerechnet werden, erfolgt bei den Projekten der zweiten Generation eine Abrechnung nach der Verfügbarkeit. Hierbei wird der Konzessionär in Abhängigkeit von der jeweiligen Streckenverfügbarkeit bezahlt. Eine Anwendung eines KPI-Systems mit der Ausprägung Verfügbarkeit könnte auch in zukünftige Abrechnungssysteme aufgenommen werden.

Nutzer

Nutzer dieser Anwendung sind die Straßenbauverwaltungen von Bund und Ländern. Nutznießer ist die Öffentlichkeit durch eine mittelfristig erreichbare Minimierung von störungsbedingten Einflüssen.

Kenngößen

Für die Verfügbarkeit liegen unterschiedliche Definitionen und Kenngrößenermittlungen vor. Diese können je nach Anwendungsfall differenziert werden, sodass nicht von einem einheitlichen KPI ausge-

gangen werden kann. Wichtig sind eine Kopplung mit der Verkehrsstärke bzw. der Verkehrsnachfrage und eine Abschätzung der jeweils vor Ort zum jeweiligen Zeitpunkt vorhandenen Kapazität. Einflüsse aus Baustellen, Unfällen und witterungsbedingten Einschränkungen müssen über entsprechende Schnittstellen zugespielt werden. Ein denkbarer Ansatz für die Aufbereitung ist das Ableiten eines funktionalen Zusammenhangs zwischen den Einflussgrößen und der resultierenden Kenngröße.

Bisherige Vorgehensweise

Für alle skizzierten Anwendungen liegen bereits Vorgehensweisen und Methoden vor. Häufig fehlt aber eine konsistente und kontinuierliche Datenbasis. So basieren entsprechende Auswertungen oft auf lokalen Erhebungen oder eigenen Befahrungen. Wenn möglich, wird auf das Netz der Dauerzählstellen der BASt zurückgegriffen. Eine Anwendung stellt das in der Entwicklung befindliche sogenannte Verkehrsanalyzesystem (VAS)⁷ des Bundes dar, mit dessen Hilfe künftig alle auf Bundesautobahnen geplanten Baustellen modelliert und nach einheitlichen Kriterien bewertet werden sollen und das ebenfalls auf den Dauerzählstellen der BASt aufbaut.

Herausforderung

Die größte Herausforderung für dieses Anwendungsfeld liegt darin, dass das System mit zahlreichen zusätzlichen Informationen gekoppelt werden muss. Hierzu zählen neben Daten zur Verkehrsnachfrage auch Informationen zu kapazitätsbeschränkenden Einflüssen, wie Baustellen, Unfälle und Witterungsbedingungen. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung müssen von Unfällen und Baustellen ausgehende Stauausbreitungen berücksichtigt werden. Bei diesem Thema ist die Abhängigkeit des Baulastträgers von kommerziellen Daten umfassend zu prüfen, insbesondere bei Abrechnungsfragen (Bsp. ÖPP). Eine Manipulierbarkeit der Daten muss ausgeschlossen sein.

⁷ https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/V1-VAS.html?nn=1817946

3.5 Real-Time Verkehrsmanagement

Verkehrsmanagementlösungen sind ein umfassendes Themenfeld mit jahrzehntelanger Anwendung und daraus resultierender Erfahrung. Häufig haben sich lokale Lösungen etabliert, ein durchgängiges, deutschlandweites Vorgehen fehlt.

Anwendung

Zu den gängigen Anwendungen gehören die Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA), der Freigabe des Seitenstreifens, verkehrslenkender Maßnahmen und Anlagen der Netzbeeinflussung (NBA) oder Zuflussregelung (ZRA). Denkbar ist auch der planerische Einsatz in einer Steuerung des Betriebsdienstes auf Bundesautobahnen im Fall einer Störung. Der Vorteil eines KPI-Systems liegt in der durchgängigen Betrachtung der Verkehrssituation, die dadurch unabhängig ist von punktuellen Informationen, wie Schleifendaten oder Radarmessungen. Alle Anwendungen gehen davon aus, dass dem Nutzer zeitlich aktuelle (Real-Time-) Daten in einer hohen räumlichen Auflösung vorliegen und diese Daten mit Informationen über Kapazitätseinschränkungen kombiniert werden.

Nutzer

Nutzer sind die jeweiligen operativ tätigen Einheiten der Straßenbauverwaltung bzw. die privaten Betreiber von Autobahnen. Nutznießer sind die Verkehrsteilnehmenden aufgrund einer optimierten Eingriffssteuerung.

Kenngroßen

Da im Gegensatz zu den vorherigen Anwendungen bei Real-Time-Anwendungen anstelle einer Aggregation lediglich eine Glättung der Eingangsdaten vorgenommen wird, ist der relevante KPI die aktuelle Verkehrsqualität. Eine Kopplung zur Verkehrsnachfrage bzw. Verkehrsstärke kann für einige Anwendungen eine sinnvolle Ergänzung sein, ist aber nicht zwingend erforderlich.

Bisherige Vorgehensweise

Lokal gibt es bereits sehr umfangreiche Systeme zur Erfassung der Verkehrssituation (Bsp. Verkehr NRW). Diese Systeme basieren auf Detektionen, teilweise werden aber auch FCD ergänzend einge-

setzt. Es fehlt eine deutschlandweit konsistente Vorgehensweise.

Für die Steuerung von lokalen Verkehrsmanagementsystemen (SBA, TSF, ZRA) werden Detektionen und Videoerfassung eingesetzt. Diese Systeme sollten auch nicht ersetzt, sondern ergänzt werden.

Die Anwendungen im Straßenbetriebsdienst basieren ebenfalls auf Detektionen, wie z. B. Schleifendaten oder Kameraerfassung. Wenn diese Daten nicht zur Verfügung stehen, kommen auch eigene Befahrungen oder der Einsatz von Flugdrohnen in Frage.

Herausforderung

Die Herausforderung in der Real-Time-Anwendung liegt in der entsprechenden Optimierung der Kartenaufbereitung. Hierfür ist eine Kartengrundlage erforderlich. Für diese Anwendung ist eine Datenspeicherung nicht erforderlich. Eine Herausforderung liegt auch darin, dass die großen Anforderungen hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung die Kosten für den Dateneinkauf erheblich beeinflussen können.

3.6 Zusammenfassung der Anwendungsfälle

Tabelle 3-1 fasst die einzelnen Anwendungsfälle vergleichend zusammen.

Zusammenfassend lassen sich die größten Herausforderungen mit den folgenden Punkten beschreiben.

- Der Zugriff auf historische Daten ist ein wichtiger Aspekt beim KPI-System. Ein zentraler Punkt ist dabei die Aggregation der Daten, sodass die relevanten Anwendungen auch auf die jeweils erforderlichen Informationen zurückgreifen können.
- Die Aggregation der Daten für die einzelnen Anwendungen kann sich recht deutlich unterscheiden. Hierbei sind entsprechende Methoden – für jede Anwendung getrennt – abzuleiten.
- Das KPI-System basiert auf Verkehrslageinformationen. Eine große Herausforderung besteht dabei in der Kopplung des/der KPI mit ergänzenden Informationen. Hierzu zählen die Verkehrsnachfrage bzw. die lokal auftretende Verkehrs-

	Eckwerte	Engpassanalyse	Verfügbarkeit	Real-Time
Beispiele	Veröffentlichung von Staustatistiken aus öffentlicher Hand	Identifikation von Engstellen zur Bedarfsplanung	Auswirkung von Baustellen, Verfügbarkeiten von Erhaltungsabschnitten, Abrechnung ÖPP	Unterstützung von Verkehrsmanagement-Systemen, Betriebsdienstoptimierung
Datenaktualität	Historisch	Historisch	Historisch	Echtzeit
zeitliche Auflösung der Ergebniskennziffern	Monats- bis Jahreswerte	Jahreswerte	Stunden- bis Tageswerte	Minutenwerte
räumliche Auflösung der Ergebniskennziffern	Bundes- oder landesweit aggregiert	Teilstrecken oder Netzmaschen	ca. 100 m bis zu Abschnitten	ca. 100 m
Schnittstellen zu Input-Daten	nicht erforderlich	Baustellen	Baustellen, Witterung, Unfälle	Baustellen, Witterung, Unfälle
Schnittstelle zu nachgelagerten Systemen	nicht erforderlich	Verkehrsprognose	Ggf. in Abhängigkeit vom Einsatzzweck erforderlich	Plattformlösung ggf. inkl. Kurzfristprognose
Nachfragebezug	ggf. Verkehrsnachfrage	ggf. Verkehrsnachfrage	Verkehrsstärke	Verkehrsstärke
Datenspeicherung	räumlich und zeitlich aggregiert	räumlich und zeitlich aggregiert	räumlich und zeitlich differenziert	nicht erforderlich

Tab. 3-1: Überblick Anwendungsfälle

stärke ebenso wie Datengrundlagen zu Baustellen(-verkehrsführungen), Unfallinformationen und sonstige kapazitätseinschränkende Einflüsse, wie z. B. die Witterung.

- Bezüglich der Kopplung mit Verkehrsstärken ist zwischen modellbasierter Verkehrsnachfrage und lokal gemessener Verkehrsstärke zu unterscheiden. Dabei ist zu beachten, dass für die Kalibrierung der Verkehrsmodelle bereits eine gewisse Stichprobe gemessener Verkehrsstärken benötigt wird. Bei beiden Datenquellen sind Verlässlichkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit zu prüfen.
- Das KPI-System umfasst die Aufbereitung der jeweiligen Datengrundlagen. Bei einigen Anwendungen ist eine darauf aufbauende, modellbasierte, Verkehrsprognose erforderlich bzw. zumindest sinnvoll. Prognostische Verkehrslage- oder -stärkeinformationen sind kein Bestandteil eines KPI-Systems.
- Das hier skizzierte Anwendungsspektrum ist sehr groß und reicht von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Daten bis zu hoher Aggregation. Es kann für einen Regelbetrieb sinnvoll sein, bestimmte Anwendungen, z. B. aus Kostengründen, nicht weiter zu verfolgen.
- Es stellt sich die generelle Frage, ob der Bau- lastträger sich bei seinen Planungen von einem kommerziellen Datenanbieter abhängig machen sollte oder inwieweit die erforderlichen Lösun-

gen auch auf unabhängigen Daten basieren können sollten.

4 Konzeptentwicklung

In diesem Kapitel werden in einem ersten Schritt Konzepte für fünf KPI-Systeme beschrieben und bewertet. Diese KPI-Systeme nutzen jeweils eine primäre Datenquelle (ANPR, Bluetooth (BT), stationäre Detektordaten (SDD hier mit Modellerweiterung), Mobilfunkdaten (FPD), Floating-Car-Daten (FCD)). In einem zweiten Schritt wird dann ein mehrstufiges, hybrides KPI-System entwickelt, das mehrere Datenquellen kombiniert. Für die Konzeptentwicklung werden zuerst allgemeine Anforderungen an ein KPI-System formuliert. Anhand dieser Anforderungen werden die fünf KPI-Systeme dann bewertet. Die Erfahrung bei der Aufbereitung und Analyse von Messdaten und der Ableitung von KPI aus den Messdaten zeigt, dass die Nutzung realer Daten im Rahmen einer Konzeptentwicklung wichtige Hinweise auf die Umsetzbarkeit bzw. auf die Spezifikation eines Konzepts liefern kann. Jede Datenquelle hat Besonderheiten, die bei der Datenaufbereitung berücksichtigt werden müssen und die auch die Nutzbarkeit einer Datenquelle für ein KPI-System einschränken können. Deshalb werden für die Konzeptentwicklung – soweit wie möglich – reale Daten herangezogen. Mit diesen Daten werden für jedes Konzept folgende Eigenschaften untersucht:

- Eignung für die Bereitstellung von räumlich und zeitlich differenzierten KPI der Verkehrsablaufqualität,
- Eignung für die Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage durch eine Nachfragegewichtung der KPI,
- Nutzbarkeit für verschiedene Einsatzbedingungen:
 - Nutzbarkeit bei Baustellen und besonderen Wetterereignissen,
 - Eignung zur Integration in hybride Erfassungssysteme,
 - Eignung für eine Erfassung von Störungs-orten,
 - Eignung für eine Kurz- und Mittelfristprognose und eine Maßnahmenprognose.
- Transparenz der Datenaufbereitung und Qualität der erfassten Daten,
- Vorgehensweise und Aufwand bei der Datenaufbereitung und Datenhaltung,
- Erfüllung weitergehender Anforderungen:
 - Erfassung von Routen,
 - Erfassung von Quellen und Zielen,
 - Erweiterbarkeit auf Bundesstraßen.

4.1 Anforderungen an ein KPI-System zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität

Anforderungen an das KPI-System zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität

Das KPI-System soll räumlich und zeitlich differenzierte Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität bereitstellen. Dabei geht es darum, welche Kenngrößen berechnet werden können, aber nicht um die Ergebnisqualität und nicht um die Latenzzeit für die Datenaufbereitung. Es wird geprüft,

- ob Kenngrößen für beliebige räumliche Bezugsebenen (Teilstrecken, Strecken, Netzabschnitte und Teilnetze) ermittelt werden können;
- ob Kenngrößen für beliebige Zeiträume ermittelt werden können;
- ob Kenngrößen ermittelt werden können, die auf Fahrtzeitverteilungen basieren;
- ob eine Differenzierung von Pkw und Lkw möglich ist.

Tabelle 4-1 zeigt Anforderungen, die bei der Bewertung der Anforderungserfüllung herangezogen werden.

Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität	Bewertung der Anforderungserfüllung
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen Teilstrecke Strecke Netzabschnitt/Teilnetz	+ KPI können ermittelt werden o KPI können mit zusätzlichen Messstellen bzw. bei besonderen Gegebenheiten (z. B. bei Mobilfunkdaten) ermittelt werden - KPI können nur mit vielen Messstellen ermittelt werden oder die Datenquelle liefert nicht die erforderliche räumliche Auflösung
KPI für beliebige Zeiträume	+ KPI können für kleine Zeiträume (5 – 15 Minuten) ermittelt werden und zu größeren Zeiträumen zusammengefasst werden o KPI können für Zeiträume von Stunden ermittelt werden und zu größeren Zeiträumen zusammengefasst werden - KPI können nicht zeitlich differenziert werden
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen Mittelwert Perzentile	+ Das KPI-System ermöglicht eine einfache Ermittlung von Fahrtzeitverteilungen o Das KPI-System erfordert besondere Aufbereitungsschritte für die Ermittlung von Fahrtzeitverteilungen - Das KPI-System ermöglicht keine Ermittlung von Fahrtzeitverteilungen
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	+ Das KPI-System liefert KPI differenziert nach Pkw und Lkw o Eine Differenzierung ist möglich, wenn der Datenanbieter die Daten differenziert nach Fahrzeugklassen anbietet Eine Differenzierung ist aufwändig und erfordert eine Fahrzeugverfolgung über - mehrere MQ oder zusätzliche Annahmen zur Lkw-Geschwindigkeit im Verkehrsflussmodell

Tab. 4-1: Anforderungen zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität und Bewertung der Anforderungserfüllung

Anforderungen an das KPI-System zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage

Das KPI-System soll eine Gewichtung der Kenngrößen mit der Verkehrsnachfrage ermöglichen und absolute Werte für den Zeitaufwand (Verkehrselemente \times Zeit) und die Verkehrsleistung (Verkehrselemente \times Länge) bereitstellen. Es wird geprüft,

- ob ungewichtete bzw. zeitgewichtete Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität ermittelt werden können;
- ob Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität gewichtet mit der Zahl der Fahrzeuge ermittelt werden können;
- ob Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität differenziert nach der Fahrzeugklasse ermittelt werden können;
- ob Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität gewichtet mit der Zahl der Personen ermittelt werden können;

- ob die Verkehrsleistung bezogen auf Fahrzeuge ermittelt werden kann;
- ob die Verkehrsleistung bezogen auf Personen ermittelt werden kann;
- ob das Verkehrsaufkommen, d. h. die Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge ermittelt werden kann.

Tabelle 4-2 zeigt Anforderungen, die bei der Bewertung der Anforderungserfüllung herangezogen werden.

Anforderung zur Erfassung der Verkehrsnachfrage	Bewertung der Anforderungserfüllung
KPI ungewichtet	+ KPI können ermittelt werden - KPI können nicht ermittelt werden
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+ Gewichtung ist möglich. Absolute Werte für den Verkehrszeitaufwand können direkt ermittelt werden o Gewichtung ist möglich. Absolute Werte für den Verkehrszeitaufwand erfordern zusätzlich lokale Verkehrsstärkedaten - Es sind zusätzlich lokale Verkehrsstärkedaten erforderlich
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	+ Differenzierung möglich Differenzierung Pkw/Lkw erfordert Fahrzeugverfolgung über mehrere MQ oder o wenn Datenanbieter Daten differenziert nach Fahrzeugklassen anbieten - Differenzierung nicht möglich
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	+ Die Berechnung ist ohne zusätzliche Daten oder Annahmen möglich - Die Berechnung erfordert Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsleistung Fahrzeuge Verkehrsleistung Fahrzeugklassen Verkehrsleistung Personen Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	+ Die Berechnung ist ohne zusätzliche Daten oder Annahmen möglich o Die Berechnung ist näherungsweise möglich - Die Berechnung erfordert Annahmen (z. B. Besetzungsgrad), zusätzliche Daten (z. B. lokale Verkehrsstärken) oder Modellrechnungen

Tab. 4-2: Anforderungen zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage und Bewertung der Anforderungserfüllung

Anforderungen an das KPI-System für verschiedene Einsatzbedingungen

Das KPI-System soll Kenngrößen für verschiedene Einsatzbereiche bereitstellen. Es wird geprüft, ob das KPI-System

- Daten im Bereich von Baustellen erfassen kann;
- Daten bei extremen Wetterbedingungen (Schnee, Starkregen) erfassen kann;
- für eine hybride Erfassung mit anderen Fahrtzeitquellen geeignet ist;
- Daten bereitstellt; die mit Baustellen- und Unfalldaten verschnitten werden können;

- eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen an Knoten und Rampen ermöglicht;
- den genauen Ort einer Störung ermitteln kann;
- eine Kurzzeitprognose (Verkehrszustand in 5 Minuten bis 1 Stunde) ermöglicht;
- eine Mittelfristprognose (Verkehrszustand an einem bestimmten Tag) ermöglicht;
- für Maßnahmenprognosen genutzt werden kann, z. B. die Wirkung einer geplanten Baustelle.

Tabelle 4-3 zeigt Anforderungen, die bei der Bewertung der Anforderungserfüllung herangezogen werden.

Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen	Bewertung der Anforderungserfüllung
Eignung für Baustellen Eignung bei extremen Wetterbedingungen	+ Qualität wird durch Baustellen/Wetter nicht beeinflusst o Qualität wird durch Baustellen/Wetter in geringem Umfang beeinflusst - Qualität wird durch Baustellen/Wetter in großem Umfang beeinflusst
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrtzeitquellen	+ Für hybride Erfassung geeignet - Für hybride Erfassung nicht geeignet
Eignung für Verschnidung mit Baustellen- und Unfalldaten	+ Wirkungen bekannter Baustellen und Unfälle zeitlich und räumlich messbar o Wirkungen bekannter Baustellen/Unfälle über abschnittsbezogene Fahrtzeiten abschätzbar - System funktioniert nicht im Baustellenbereich
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	+ Der Abbiegevorgang wird genau erfasst o Der Abbiegevorgang wird erfasst, wenn ausreichend Messquerschnitte verfügbar sind - Der Abbiegevorgang wird nicht erfasst oder die räumliche Auflösung ist unzureichend
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	+ Ort der Störung lokalisierbar o Ort der Störung wird modelliert und nicht gemessen - Ort der Störung nicht genau lokalisierbar
Eignung für Kurzfristprognose	+ Modellbasierte Kurzfristprognose möglich o Es können nur Tendenzen (steigende oder fallende Fahrtzeiten) angezeigt werden - Kurzfristprognose nicht möglich
Eignung für Mittelfristprognose	+ Es können typische Fahrtzeiten für Verkehrstage und Tageszeiten ermittelt werden, sofern keine besonderen Maßnahmen geplant sind - Mittelfristprognose nicht möglich
Eignung für Maßnahmenprognose	+ Es können Wirkungen auf die Routenwahl und den Verkehrsfluss prognostiziert werden o Es können Wirkungen auf die Routenwahl oder den Verkehrsfluss prognostiziert werden - Maßnahmenprognose nicht möglich

Tab. 4-3: Anforderungen beim Einsatz unter verschiedenen Bedingungen und Bewertung der Anforderungserfüllung

Anforderungen an die Qualität, die das KPI-System bereitstellen soll

Das KPI-System soll eine transparente Datenaufbereitung ermöglichen und möglichst genaue und repräsentative Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität zur Verfügung stellen. Hierzu wird geprüft,

- ob die Datenaufbereitungsschritte für Dritte nachvollziehbar sind;
- welche Genauigkeit bei den Geschwindigkeits- oder Fahrzeitendaten zu erwarten ist; die als Rohdaten in die Ermittlung der Fahrzeiten und Fahrzeitverteilungen eingehen;
- welche Genauigkeit bei den Fahrzeitverteilungen zu erwarten ist;

- mit welcher Genauigkeit eine Störung lokalisiert werden kann;
- welche Latenzzeit zwischen Datenerfassung und Bereitstellung der Kenngröße bei einer Online-Verwendung zu erwarten ist;
- welche Daten beim Ausfall der Datenquelle als Alternative genutzt werden können;
- ob die Stichprobe repräsentativ ist;
- ob Aussagen zum Stichprobenumfang gemacht werden können.

Tabelle 4-4 zeigt Anforderungen, die bei der Bewertung der Anforderungserfüllung herangezogen werden.

Anforderung an die Qualität	Bewertung der Anforderungserfüllung
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	+/o Abhängig davon, ob das KPT-System als Fremdimplementierung (o) oder Eigenimplementierung (+) realisiert wird o Erfordert ein Verständnis des Verkehrsflussmodells - Aufbereitungsschritte der Anbieter sind unterschiedlich und ändern sich
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeiten (Rohdaten)	+ Hohe Genauigkeit bei Einzelfahrzeiten Fahrzeiten werden modelliert und nicht gemessen, Modell muss kalibriert werden o Genauigkeit hängt von Randbedingungen (Fahrweite, Messstellendichte, Verkehrsflussmodell) ab - Aussagen zur Genauigkeit schwer möglich
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeitverteilungen	+ Hohe Genauigkeit, Filterregel für langsame Fahrzeuge beeinflusst Ergebnis Mittlere Genauigkeit, Stichprobengröße und Filterregel für langsame Fahrzeuge reduzieren Genauigkeit o Fahrzeiten werden modelliert und nicht gemessen - Aussagen zur Genauigkeit schwer möglich
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	+ Ort der Störung genau lokalisierbar o Ort der Störung wird modelliert und nicht gemessen - Ort der Störung nicht genau lokalisierbar
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	+ Latenzzeit für die Verkehrsinformation und Verkehrssteuerung ausreichend o Latenzzeit von Detektordichte abhängig oder aufwändige Datenübertragung und Datenaufbereitung - Für Online-Anwendungen nicht geeignet
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	+ Es können Ersatzwerte aus anderen Detektoren oder Datenquellen genutzt werden o Modell wird ungenauer - Bei einem Ausfall sind nur historische Daten verfügbar
Repräsentativität der Stichprobe	+ Zufällige Auswahl der Fahrzeuge o Zufälligkeit der Stichprobe eingeschränkt - Keine zufällige Auswahl der Fahrzeuge
Aussagen zum Stichprobenumfang	+ Möglich, wenn lokale Verkehrsstärken verfügbar - Nicht möglich

Tab. 4-4: Anforderung an die Qualität und Bewertung der Anforderungserfüllung

Anforderungen des KPI-Systems an die Datenaufbereitung und Datenhaltung

Das KPI-System kann als ein zentrales System oder als sowohl als dezentrales System konzipiert werden. Es wird geprüft,

- ob eine zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes möglich und sinnvoll ist;
- ob eine dezentrale Berechnung der KPI nach einem einheitlichen Standard in den Verkehrszentralen möglich und sinnvoll ist;
- wie hoch der Aufwand zur Ermittlung der KPI ist;
- ob Vorgaben des Datenschutzes beachtet werden müssen.

Tabelle 4-5 zeigt Anforderungen, die bei der Bewertung der Anforderungserfüllung herangezogen werden.

Weitergehende Anforderungen an das KPI-System

Das KPI-System soll Informationen über die Routenwahl ermöglichen und von Bundesautobahnen auf Bundesstraßen erweiterbar sein. Es wird geprüft,

- ob mit dem KPI-System eine Erfassung von Routen bzw. Durchgangsverkehrsanteilen für Streckenzüge oder Teilnetze möglich ist;
- ob mit dem KPI-System eine Erfassung der Quell- und Zielorte von Ortsveränderungen möglich ist, sodass Nachfragematrizen erstellt werden können;
- wie groß der Aufwand ist, um das System auf Bundesstraßen zu erweitern.

Tabelle 4-6 zeigt Anforderungen, die bei der Bewertung der Anforderungserfüllung herangezogen werden.

Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung	Bewertung der Anforderungserfüllung
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	+ Für eine standardisierte KPI-Auswertung ist eine zentrale Auswertung sinnvoll. Eine räumliche Differenzierung nach Verkehrszentralen ist möglich. o Dezentrale Auswertung sinnvoller - Nicht möglich bzw. sinnvoll
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	+ Möglich o Möglich, aber eine Fahrzeitermittlung für zentralenübergreifende Netzabschnitte ist nicht möglich - Dezentrale Fahrzeitermittlung möglich, aber nicht sinnvoll Einheitlicher Standard schwer umsetzbar
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	+ Daten liegen weitgehend in aufbereiteter Form vor und können für die Berechnung der KPI genutzt werden o Daten müssen aufbereitet werden oder erfordern Modellrechnungen Verfahren sind weitgehend Standard, müssen aber angepasst werden - Daten müssen aufbereitet werden, Verfahren sind bisher nicht Standard
Datenschutzvorgaben erfüllen	+ Keine oder geringe Anforderungen an den Datenschutz, es werden keine personenbezogenen Daten erfasst - Hohe Anforderungen an den Datenschutz Rechtliche Klärung auf Bundesebene erforderlich

Tab. 4-5: Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung und Bewertung der Anforderungserfüllung

Weitergehende Anforderungen	Bewertung der Anforderungserfüllung
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen Erfassung von Quellen und Zielen	+ Möglich o Möglich, aber Stichprobe möglicherweise zu klein - Nicht möglich
Erweiterung auf Bundesstraßen	+ Mit geringem zusätzlichem Aufwand möglich - Mit hohem zusätzlichem Aufwand möglich, viele zusätzliche MQ erforderlich

Tab. 4-6: Weitergehende Anforderungen und Bewertung der Anforderungserfüllung

4.2 KPI-System basierend auf ANPR-Daten

4.2.1 Systemaufbau

Tabelle 4-7 beschreibt in einfacher Form den Aufbau eines KPI-Systems, das die Datenquelle ANPR nutzt.

4.2.2 Testdaten

Zur Bewertung der Anforderung an das KPI-System ANPR werden Daten aus ANPR-Detektoren ausgewertet. Hierfür stehen historische Kennzeichener-

fassungen vom 01.03.2011 bis zum 31.12.2011 zur Verfügung. Diese wurden im Zuge des Forschungsprojekts Wolke (FRIEDRICH et al., 2011 – 2013) für alle Fahrstreifen der A8 bzw. A93 zwischen München und Salzburg bzw. Kiefersfelden an vier Messstellen erhoben. Die vier Messstellen sind: A8 AS Hofoldingener Forst, A8 AD Inntal, A93 AS Kiefersfelden und A8 AS Bad Reichenhall (siehe Bild 4-1). Die Daten umfassen je Fahrzeug die Fahrzeug-ID (in Form eines HashCodes), das Gebietskennzeichen und den dazugehörigen Zeitstempel. In Bild 4-2 bis Bild 4-5 sind beispielhaft ANPR-Daten für den Streckenzug Hofoldingener Forst – AD Inntal dargestellt. Bild 4-2 zeigt mittlere Fahrtgeschwindigkei-

Art der Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> • ANPR-Kameras, die Kfz-Kennzeichen erfassen (siehe Kapitel 2.4.3.2) • Jeder Detektor erfasst die Fahrzeuge eines Fahrstreifens • Die Detektoren erfordern Masten für eine Überkopf-Befestigung
Erforderliche Anzahl an Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> • Um Fahrtzeiten zu erfassen, muss an jedem Messquerschnitt mindestens ein Fahrstreifen erfasst werden. Falls nicht alle Fahrstreifen erfasst werden, sollte der linke oder mittlere Fahrstreifen erfasst werden, da hier der Anteil der Pkw hoch ist. • An jeder Anschlussstelle ist pro Richtung ein Messquerschnitt erforderlich • An jedem Netzknoten ist pro Zufahrt (oder pro Ausfahrt) ein Messquerschnitt erforderlich
Datenanbieter	<ul style="list-style-type: none"> • Es gibt Anbieter, die ANPR-Systeme installieren und Auswerteprogramme für die Fahrtermittlung bereitstellen • Es gibt keine Anbieter von Fahrtzeitdaten, die mit ANPR ermittelt wurden
Rohdaten des Systems	<ul style="list-style-type: none"> • Das System liefert als Rohdaten verschlüsselte Fahrzeugkennzeichen mit einer Uhrzeit (Zeitstempel).
Aufbereitungsschritte zur Ermittlung von Fahrtzeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Die Messquerschnitte mit der Kamera-ID werden in einer digitalen Straßenkarte verortet. Benachbarte Messquerschnitte werden durch eine Route (= Folge von Strecken) verbunden. Die so festgelegte Route definiert einen Abschnitt auf der Längsachse einer Heatmap. • Vergleich der erfassten Kennzeichen an benachbarten Messquerschnitten. Die Fahrtzeit eines Einzelfahrzeugs ergibt sich aus der Differenz der Uhrzeiten zwischen den beiden Messquerschnitten. • Identifikation von langsamen Einzelfahrzeugen. Einzelfahrzeuge, die deutlich längere Fahrtzeiten aufweisen als der Median der letzten n Fahrzeuge oder n Minuten, werden als langsame Fahrzeuge markiert und in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. • Identifikation von Lkw. Einzelfahrzeuge, die für mehrere Abschnitte deutlich längere Fahrtzeiten als der Median aufweisen und deren Geschwindigkeit etwa der zulässigen Lkw-Geschwindigkeit entspricht, werden als Lkw gekennzeichnet. • Für jeden Abschnitt zwischen zwei Messquerschnitten können nun eine mittlere Fahrtzeit und Fahrtzeitperzentile ermittelt werden. • Aus der mittleren Fahrtzeit kann für den Abschnitt eine Heatmap mit tageszeitabhängigen mittleren Geschwindigkeiten ermittelt werden. • Als Verkehrsstärke auf dem Abschnitt kann näherungsweise die Zahl der Fahrzeuge herangezogen werden, die mit den ANPR-Kameras erfasst werden. An Abschnitten mit Dauerzählstellen und ANPR-Kameras kann ein mittlerer Korrekturfaktor für eine Hochrechnung bestimmt werden. • Damit liegen alle Daten vor, die für die Berechnung von Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität und der Fahrtzeitzuverlässigkeit für den Abschnitt erforderlich sind. • Für die Ermittlung abschnittsübergreifender Kenngrößen werden entweder die Einzelfahrten des Durchgangsverkehrs ausgewertet oder die Heatmaps mehrerer Abschnitte verknüpft.

Tab. 4-7: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf ANPR-Daten

ten für einen Tag differenziert in 96 Zeiträume von 15 Minuten. Die Geschwindigkeiten sind in 10%-Perzentil-Schritten und als Mittelwert angegeben. Deutlich erkennbar ist, dass die Geschwindigkeiten der

verschiedenen Perzentile im Störfall sehr eng zusammenliegen. Die in Bild 4-3 dargestellte Auswertung über alle Werkstage des Erhebungszeitraums lässt keine Fahrterhöhungen in der Hauptverkehrs-

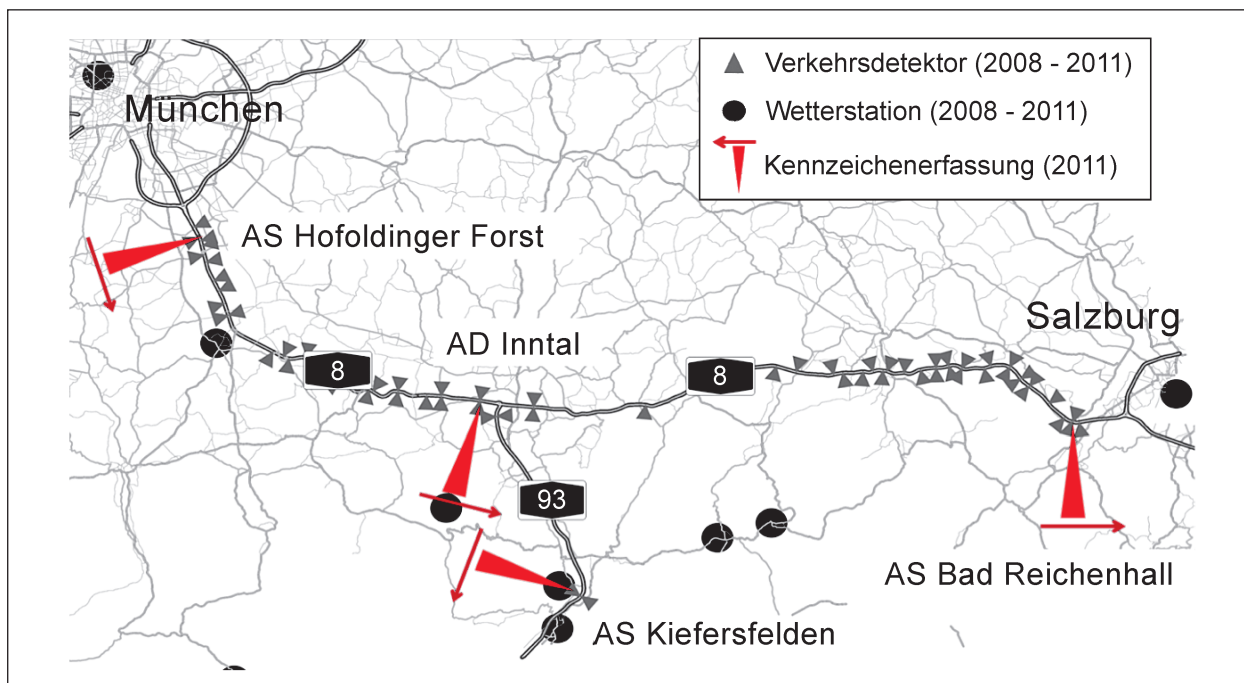


Bild 4-1: Untersuchungsraum des Forschungsprojekts Wolke (Quelle: Verkehrsinformationsagentur Bayern (VIB))

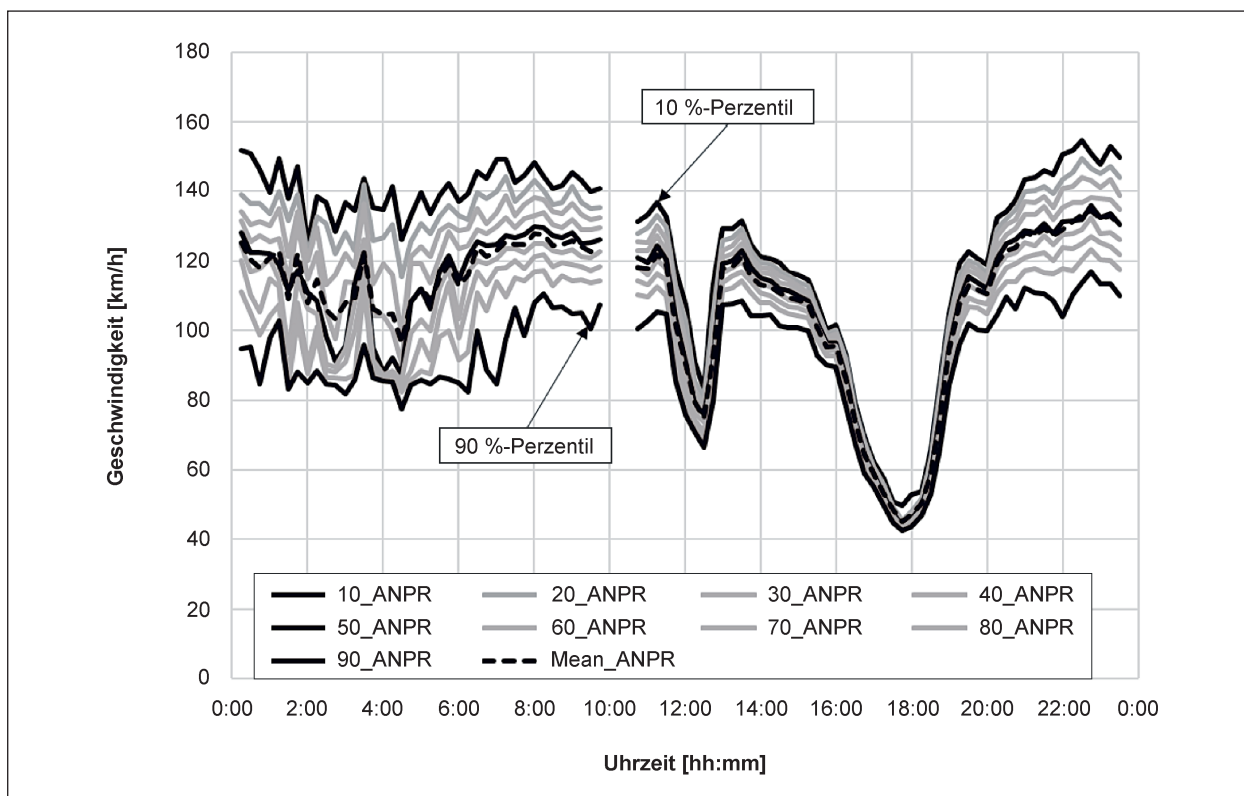


Bild 4-2: Geschwindigkeitsverteilungen (15-min-Intervalle) eines ausgewählten Tages (Freitag 04.03.2011) für den Streckenzug Hofoldinginger Forst – AD Inntal

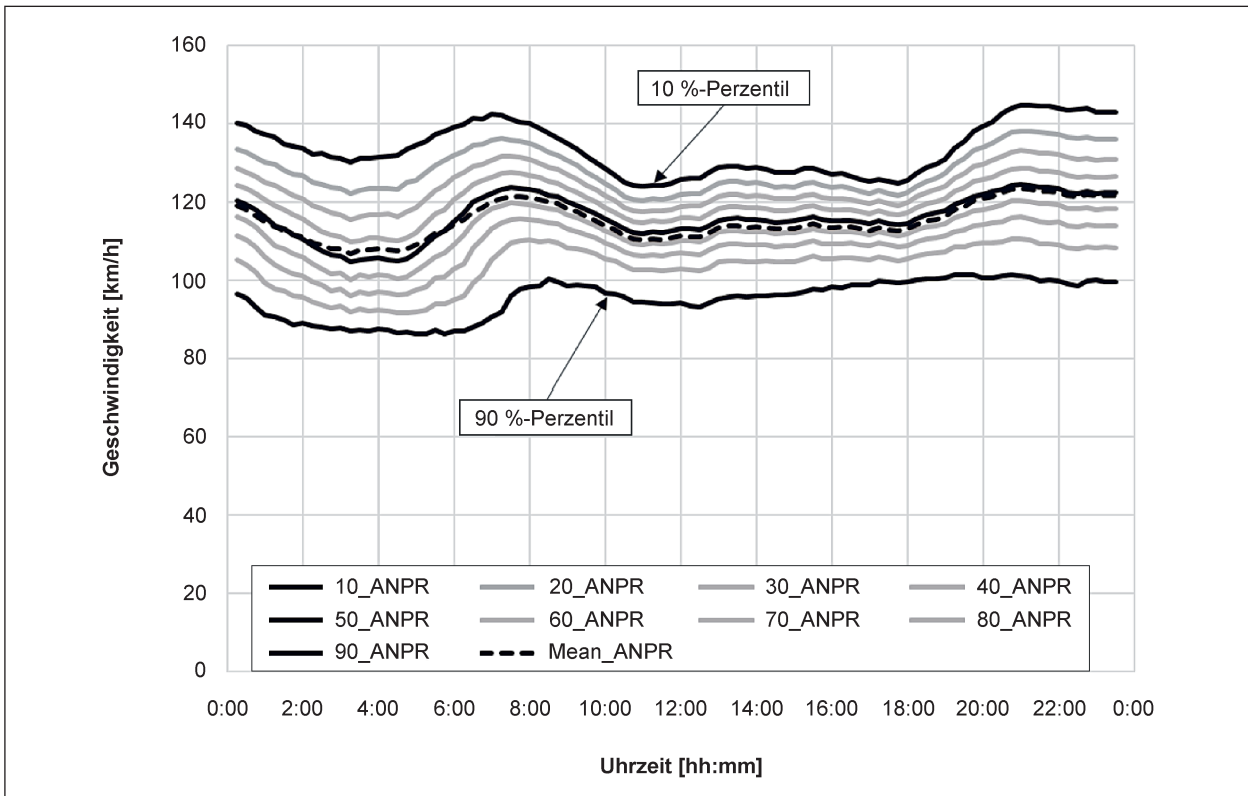


Bild 4-3: Geschwindigkeitsverteilungen (15-min-Intervalle) für alle Werktage (01.03.2011 bis zum 31.12.2011) für den Streckenzug Hofoldinginger Forst – AD Inntal

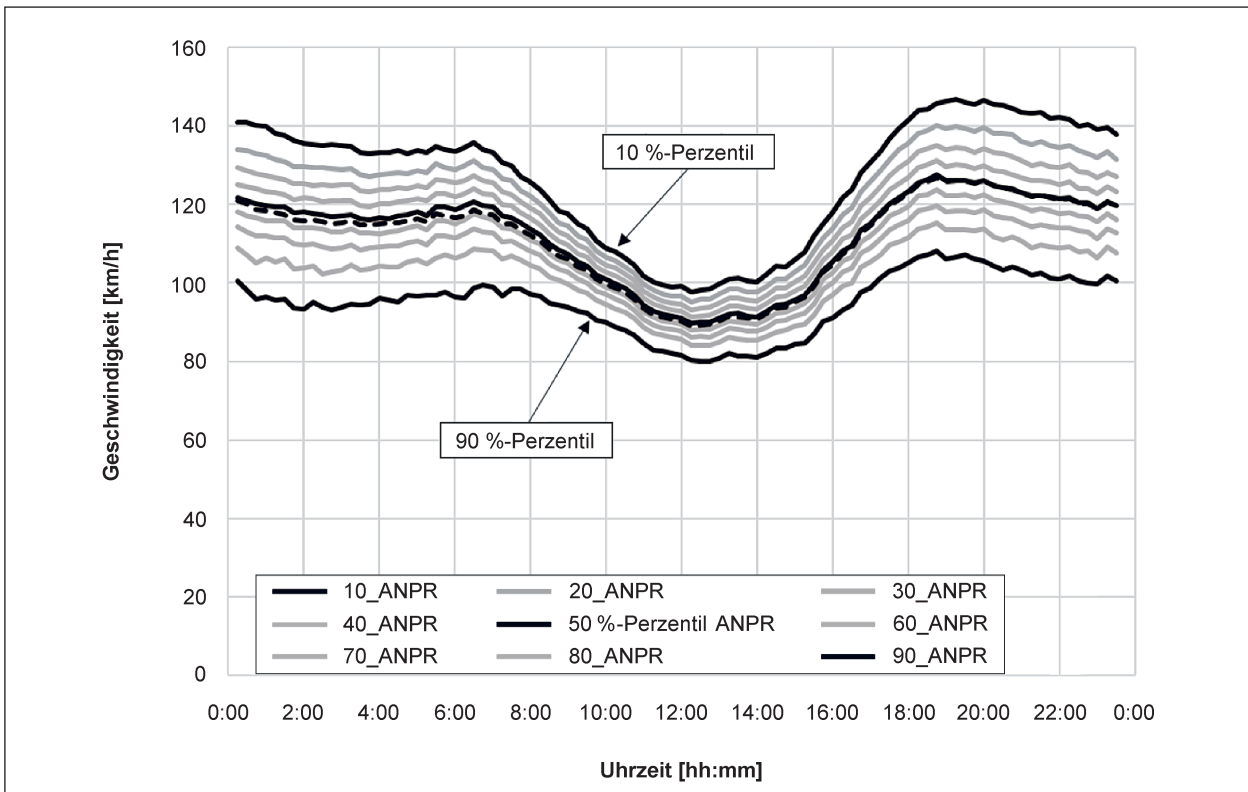


Bild 4-4: Geschwindigkeitsverteilungen (15-min-Intervalle) für alle Samstage (01.03.2011 bis zum 31.12.2011) für den Streckenzug Hofoldinginger Forst – AD Inntal

zeit erkennen, die auf diesem Streckenzug zwischen 16:00 und 18 Uhr liegt. Bild 4-4 zeigt die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten über alle Samstage des Erhebungszeitraums. Es liegt eine deutliche Reduzierung der Geschwindigkeit zwischen 10:00 Uhr und 16:00 Uhr vor. In Bild 4-5 sind die Geschwindigkeitsverteilungen für alle Tage des Erhebungszeitraums und drei daraus abgeleitete Kenngrößen der Fahrtzeitzuverlässigkeit dargestellt.

4.2.3 Anforderungserfüllung

Tabelle 4-8 zeigt, in welchem Umfang ein KPI-System basierend auf ANPR-Daten die Anforderungen erfüllt.

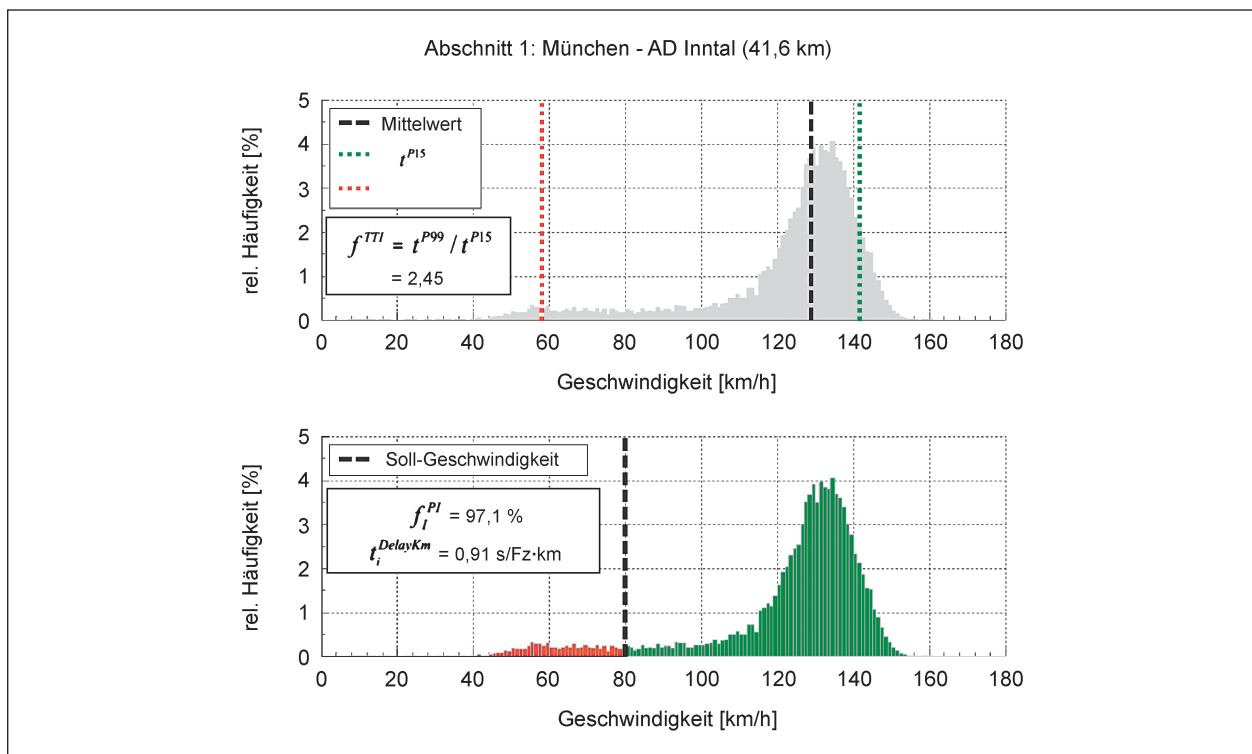


Bild 4-5: Geschwindigkeitsverteilungen und ausgewählte Kenngrößen der Fahrtzeitzuverlässigkeit (Fahrtzeitindex, Pünktlichkeitsindex und Verlustzeit pro Kilometer) für alle Tage (01.03.2011 bis zum 31.12.2011) für den Streckenzug Hofoldingner Forst – AD Inntal (Bildquelle: FRIEDRICH et al., 2011 – 2013)

Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität	Anforderungserfüllung
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen Teilstrecke Strecke Netzabschnitt/Teilnetz	- Erfordert zu viele Messstellen + Erfordert eine Messstelle je Anschlussstelle + Erfordert eine Messstelle je Netzknoten
KPI für beliebige Zeiträume	+ Möglich
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen Mittelwert Perzentile	+ Möglich + Direkte Ermittlung der Perzentile aus Einzelfahrtzeiten + Anteil Durchgangsverkehr nimmt jedoch mit Entfernung ab
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	- Möglich, erfordert aber eine Fahrzeugverfolgung über mehrere MQ

Tab. 4-8: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf ANPR-Daten

Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	Anforderungserfüllung
KPI ungewichtet	+ Möglich
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+ Gewichtung ohne weitere Datenquellen o Absolute Verlustzeit nur mit SDD
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	o Differenzierung Pkw/Lkw erfordert Fahrzeugverfolgung über mehrere MQ
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsleistung Fahrzeuge	o Näherungsweise möglich
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	- Näherungsweise bei Differenzierung Pkw/Lkw möglich
Verkehrsleistung Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	+ Über Anzahl unterschiedlicher Kennzeichen
Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen	Anforderungserfüllung
Eignung für Baustellen	- Kameras müssen angepasst werden
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	o Schlecht bei Schnee & Starkregen
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrtzeitquellen	+ Sinnvolle Ergänzung zu SDD und FCD
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	o Wirkungen bekannter Baustellen/Unfälle über abschnittsbezogene Fahrtzeiten
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	o Der Abbiegevorgang wird nur als Teil einer Route erfasst, Messquerschnitte an allen Knoten erforderlich
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	- Ort der Störung nicht genau lokalisierbar
Eignung für Kurzfristprognose	o Es können nur Tendenzen (steigende oder fallende Fahrtzeiten) angezeigt werden
Eignung für Mittelfristprognose	+ Es können typische Fahrtzeiten ermittelt werden
Eignung für Maßnahmenprognose	- Nicht möglich
Anforderung an die Qualität	Anforderungserfüllung
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	+/o Abhängig davon, ob Fremdimplementierung (o) oder Eigenimplementierung (+)
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeiten (Rohdaten)	+ Einzelfahrtzeiten sehr genau
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeitverteilungen	+ Filterregel für langsame Fahrzeuge beeinflusst Ergebnis
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	- Ort der Störung nicht genau lokalisierbar
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	o Abhängig von Detektordichte o Latenzzeit \approx Fahrtzeit zwischen Detektoren
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	+ Ausfall einer Kamera: Wert aus Nachbarstreifen + Ausfall eines MQ: Wert aus nächstem MQ
Repräsentativität der Stichprobe	+ Zufällige Auswahl der Fahrzeuge
Aussagen zum Stichprobenumfang	+ In Kombination mit SDD
Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung	Anforderungserfüllung
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	+ Für die standardisierte KPI-Auswertung ist zentrale Auswertung sinnvoll + Räumliche Differenzierung nach Verkehrszentralen möglich
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	o Möglich o Zentralenübergreifende Fahrtzeitermittlung nicht möglich
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	o Systementwicklung erforderlich o Nur Filterregeln erforderlich o Keine Modellrechnungen erforderlich
Datenschutzvorgaben erfüllen	o Rechtliche Klärung auf Bundesebene erforderlich o Hashcode ist zeitlich begrenzt gültig

Tab. 4-8: Fortsetzung

Weitergehende Anforderungen	Anforderungserfüllung
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	+ Möglich
Erfassung von Quellen und Zielen	+ Möglich auf der Ebene von Anschlussstellen
Erweiterung auf Bundesstraßen	- Erfordert viele zusätzliche MQ

Tab. 4-8: Fortsetzung

Art der Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> • Bluetooth-Detektoren, die MAC-Adressen von Bluetooth-Geräten erfassen (siehe Kapitel 2.4.3.3) • Jeder Detektor erfasst Bluetooth-Geräte im Umkreis des Detektors unabhängig von der Fahrtrichtung • Die Detektoren können straßenseitig angebracht werden
Erforderliche Anzahl an Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> • An jedem Messquerschnitt ist ein Detektor erforderlich • An Anschlussstellen und an Netzknoten ist ein Detektor ausreichend, der alle Richtungen erfasst
Datenanbieter	<ul style="list-style-type: none"> • Es gibt Anbieter, die Bluetooth-Systeme installieren und Auswerteprogramme für die Fahrtermittlung bereitstellen • Es gibt keine Anbieter von Fahrzeitdaten, die mit Bluetooth ermittelt wurden
Rohdaten des Systems	<ul style="list-style-type: none"> • Das System liefert als Rohdaten verschlüsselte MAC-Adressen mit einer Uhrzeit (Zeitstempel)
Aufbereitungsschritte zur Ermittlung von Fahrzeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Die Messquerschnitte mit der Detektor-ID werden in einer digitalen Straßenkarte verortet. Benachbarte Messquerschnitte werden durch eine Route (= Folge von Strecken) verbunden. Die so festgelegte Route definiert einen Abschnitt auf der Längsachse einer Heatmap. • Vergleich der erfassten MAC-Adressen an benachbarten Messquerschnitten. Die Fahrzeit eines Einzelfahrzeugs ergibt sich aus der Differenz der Uhrzeiten zwischen den beiden Messquerschnitten. • Identifikation von langsamen Einzelfahrzeugen. Einzelfahrzeuge, die deutlich längere Fahrzeiten aufweisen als der Median der letzten n Fahrzeuge oder n Minuten, werden als langsame Fahrzeuge markiert und in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. • Identifikation von Lkw. Einzelfahrzeuge, die für mehrere Abschnitte deutlich längere Fahrzeiten als der Median aufweisen und deren Geschwindigkeit etwa der zulässigen Lkw-Geschwindigkeit entspricht, werden als Lkw gekennzeichnet. • Für jeden Abschnitt zwischen zwei Messquerschnitten können nun eine mittlere Fahrzeit und Fahrzeitperzentile ermittelt werden. • Aus der mittleren Fahrzeit kann für den Abschnitt eine Heatmap mit tageszeitabhängigen mittleren Geschwindigkeiten ermittelt werden. • Da Bluetooth-Detektoren Fahrzeuge in beide Richtungen erfassen, eignet sich die Zahl der Fahrzeuge, die mit Bluetooth-Detektoren erfasst werden, nur eingeschränkt als Näherung für die Verkehrsstärke. Es sollten deshalb Verkehrsstärken aus stationären Detektoren verwendet werden. • Damit liegen alle Daten vor, die für die Berechnung von Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität und der Fahrzeitzuverlässigkeit für den Abschnitt erforderlich sind. • Für die Ermittlung abschnittsübergreifender Kenngrößen werden entweder die Einzelfahrten des Durchgangsverkehrs ausgewertet oder die Heatmaps mehrerer Abschnitte verknüpft.

Tab. 4-9: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf Bluetooth-Daten (BT)

4.3 KPI-System basierend auf Bluetooth-Daten (BT)

4.3.1 Systemaufbau

Tabelle 4-9 beschreibt in einfacher Form den Aufbau eines KPI-Systems, das die Datenquelle Bluetooth (BT) nutzt.

4.3.2 Testdaten

Aus dem Forschungsprojekt Wolke (FRIEDRICH et al., 2011 – 2013) stehen neben den ANPR-Daten auch Bluetooth-Daten für die vier Messstellen (siehe Bild 4-1) zur Verfügung. Erfasst wurden hier die MAC-Adressen von Bluetooth-Geräten in einem Bereich von bis zu 100 Metern um den Detektor. Ein

Vergleich der Zahl der beobachteten Objekte (Bild 4-6) zeigt, dass die Zahl der Bluetooth-Objekte (= aktive Bluetooth-fähige Geräte) zwischen 40 % und 50 % der Zahl der ANPR-Objekte (= Kfz-Kennzeichen) beträgt. Da manche Fahrzeuge mehr als ein aktives Bluetooth-Gerät enthalten können, wird der Anteil der unterschiedlichen Fahrzeuge etwas kleiner sein. Der Vergleich zeigt außerdem, dass die Bluetooth-Anteile keinen tageszeitabhängigen Verlauf aufweisen.

Bluetooth-Messdaten liegen allerdings nur für wenige Tage an mehreren Querschnitten vor, sodass nur für diese Tage Fahrtzeiten generiert werden können. Ein Vergleich der ANPR- und Bluetooth-Daten für diese Tage zeigt, dass die Bluetooth-Werte deutlich höhere Fahrtzeiten bzw. niedrigere Geschwindigkeiten aufweisen. Um die Fahrtzeiten zu vergleichen wurde der Median der ANPR-Daten ausgewählt und dann ein passendes Perzentil bei den Bluetooth-Daten gesucht. Bild 4-7 zeigt einen Vergleich zwischen den Bluetooth-Daten und ANPR-Daten, wenn bei den Bluetooth-Daten die 30 % der schnellsten Beobachtungen ausgewählt werden. Unabhängig davon schwanken die Geschwindigkeiten bzw. Fahrtzeiten bei Bluetooth relativ stark.

Mögliche Einflussfaktoren dieser langsameren Geschwindigkeiten können eine Überrepräsentation von Lkw in den Bluetooth-Daten (höherer Bluetooth-Ausstattungsgrad bei Lkw als bei Pkw) sein oder die Tatsache, dass die Erfassung eines Bluetooth-Gerätes bis zu zehn Sekunden dauern kann (OTTERSTÄTTER, 2013a). Dies könnte zur Folge haben, dass Fahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit (kürzere Aufenthaltsdauer im Erfassungsbereich) mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit detektiert werden, als Fahrzeuge mit niedrigeren Geschwindigkeiten. Dies hat zur Folge, dass bei Bluetooth-Daten andere Filterregeln notwendig sind als bei ANPR-Daten. Deutlich erkennbar ist in Bild 4-7 der Lkw-Einfluss zwischen 02:00 Uhr und 07:00 Uhr bei beiden Datenquellen.

4.3.3 Anforderungserfüllung

Tabelle 4-10 zeigt, in welchem Umfang ein KPI-System basierend auf Bluetooth-Daten (BT) die Anforderungen erfüllt.

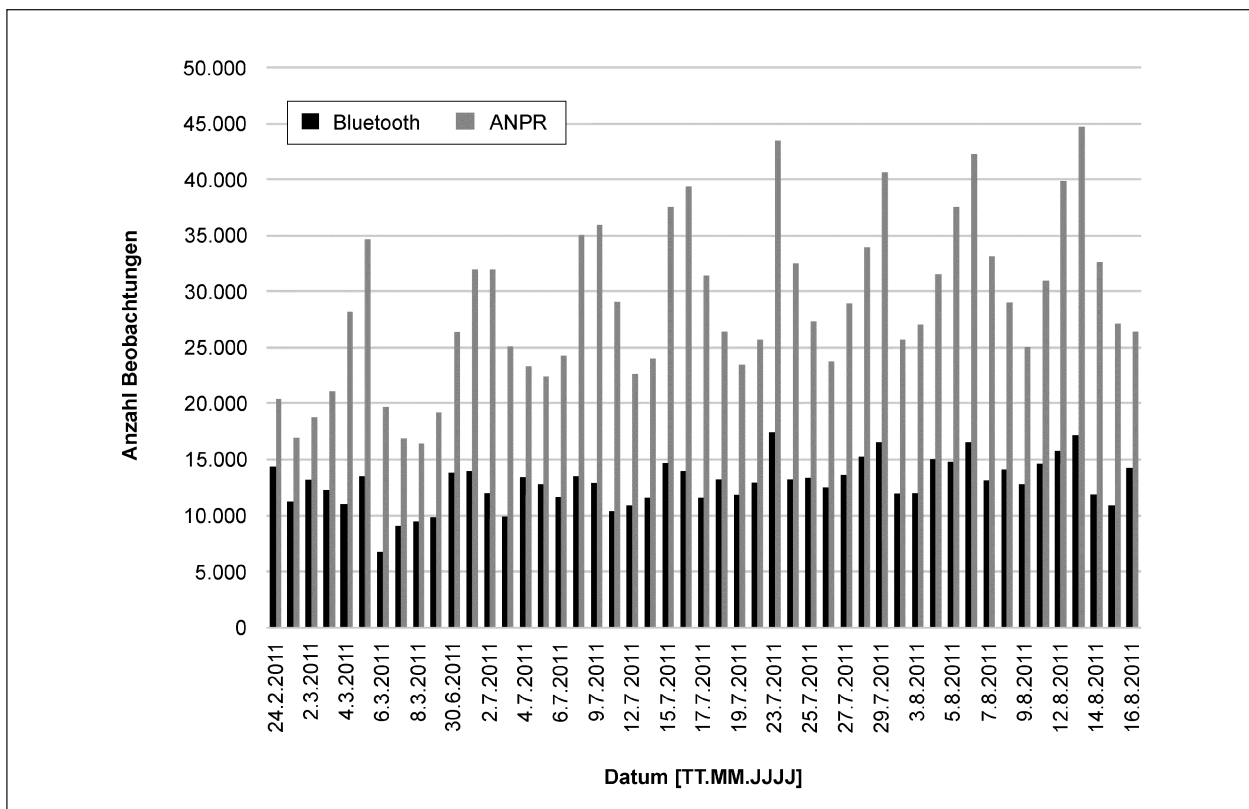


Bild 4-6: Vergleich der Stichprobengröße zwischen ANPR und Bluetooth

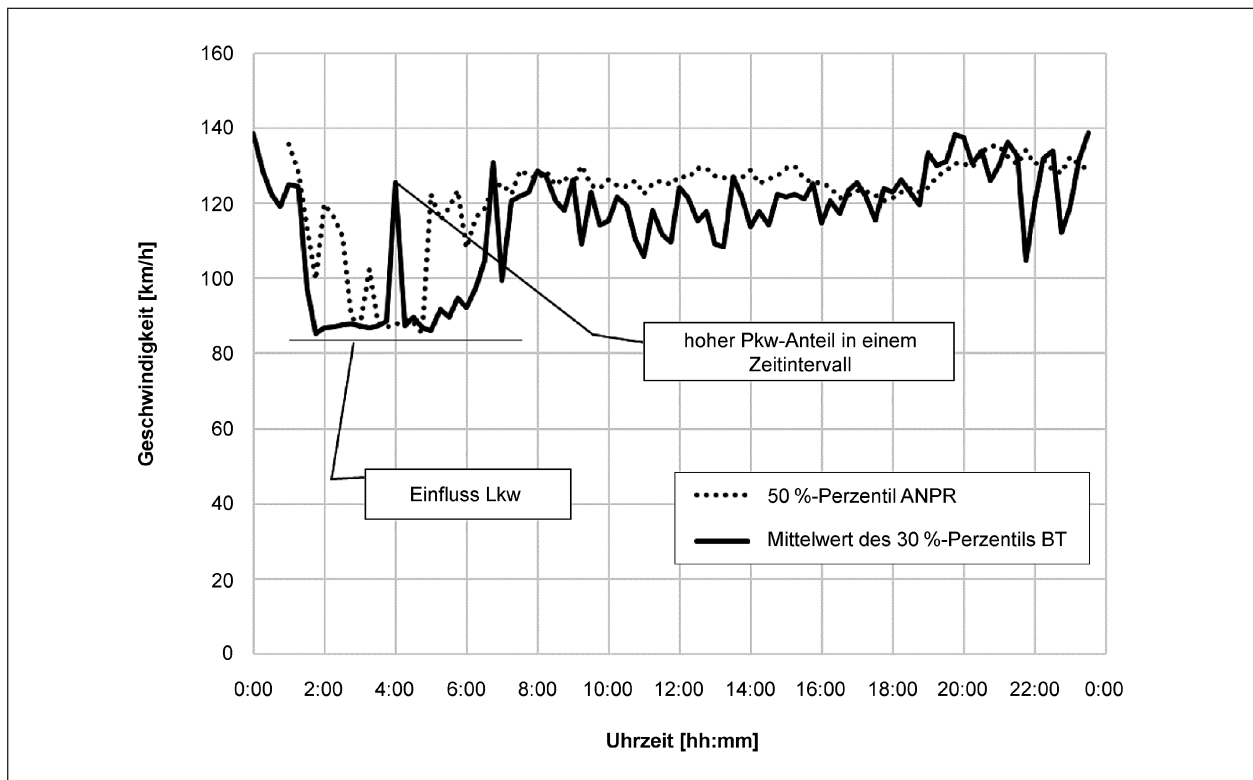


Bild 4-7: Vergleich der Geschwindigkeiten aus ANPR und Bluetooth (BT) für den Streckenzug Hofoldinginger Forst – AD Inntal (03.03.2011, 15-min-Intervalle)

Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität	Anforderungserfüllung
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen Teilstrecke Strecke Netzabschnitt/Teilnetz	- Erfordert zu viele Messstellen + Erfordert eine Messstelle je Anschlussstelle + Erfordert eine Messstelle je Netzknoten
KPI für beliebige Zeiträume	+ Möglich
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen Mittelwert Perzentile	+ Möglich + Direkte Ermittlung der Perzentile aus Einzelfahrtzeiten + Anteil Durchgangsverkehr nimmt jedoch mit Entfernung ab
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	- Möglich, erfordert aber eine Fahrzeugverfolgung über mehrere MQ
Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	Anforderungserfüllung
KPI ungewichtet	+ Möglich
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+ Gewichtung ohne weitere Datenquellen o Absolute Verlustzeit nur mit SDD
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	o Differenzierung Pkw/Lkw erfordert Fahrzeugverfolgung über mehrere MQ
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsleistung Fahrzeuge	- Näherungsweise mit Annahmen zum Ausrüstungsgrad von BT möglich
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	- Näherungsweise mit Annahmen zum Ausrüstungsgrad von BT und bei Differenzierung Pkw/Lkw möglich

Tab. 4-10: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf Bluetooth-Daten (BT)

Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	Anforderungserfüllung
Verkehrsleistung Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	- Über Anzahl unterschiedlicher BT-Devices mit Modellrechnungen (Hochrechnung)
Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen	Anforderungserfüllung
Eignung für Baustellen	+ System funktioniert auch bei Baustellen
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	+ Unabhängig von Schnee & Starkregen
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrzeitquellen	+ Sinnvolle Ergänzung zu SDD und FCD
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	o Wirkungen bekannter Baustellen/Unfälle über abschnittsbezogene Fahrzeiten
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	o Der Abbiegevorgang wird nur als Teil einer Route erfasst, Messquerschnitte an allen Knoten erforderlich
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	- Ort der Störung nicht genau lokalisierbar
Eignung für Kurzfristprognose	o Es können nur Tendenzen (steigende oder fallende Fahrzeiten) angezeigt werden
Eignung für Mittelfristprognose	+ Es können typische Fahrzeiten ermittelt werden
Eignung für Maßnahmenprognose	- Nicht möglich
Anforderung an die Qualität	Anforderungserfüllung
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	+/o Abhängig davon, ob Fremdimplementierung (o) oder Eigenimplementierung (+)
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeiten (Rohdaten)	+ Einzelfahrzeiten genau
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeitverteilungen	o Stichprobengröße und Filterregel für langsame Fahrzeuge beeinflussen Ergebnis
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	- Ort der Störung nicht genau lokalisierbar
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	o Abhängig von Detektordichte, Latenzzeit \approx Fahrzeit zwischen Detektoren
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	+ Ausfall einer Kamera: Wert aus Nachbarstreifen Ausfall eines MQ: Wert aus nächstem MQ
Repräsentativität der Stichprobe	o Zufälligkeit der Stichprobe eingeschränkt
Aussagen zum Stichprobenumfang	+ In Kombination mit SDD
Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung	Anforderungserfüllung
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	+ Für standardisierte KPI-Auswertung ist zentrale Auswertung sinnvoll Räumliche Differenzierung nach Verkehrszentralen möglich
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	o Möglich Zentralenübergreifende Fahrzeitermittlung nicht möglich
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	Systementwicklung erforderlich o Nur Filterregeln erforderlich Keine Modellrechnungen erforderlich
Datenschutzvorgaben erfüllen	o Rechtliche Klärung auf Bundesebene erforderlich Hashcode ist zeitlich begrenzt gültig
Weitergehende Anforderungen	Anforderungserfüllung
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	o Stichprobe zu klein für die Erfassung von Routen
Erfassung von Quellen und Zielen	o Stichprobe zu klein für die Erfassung von Routen
Erweiterung auf Bundesstraßen	- Erfordert viele zusätzliche MQ

Tab. 4-10: Fortsetzung

4.4 KPI-System basierend auf stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung

4.4.1 Systemaufbau

Tabelle 4-11 beschreibt in einfacher Form den Aufbau eines KPI-Systems, das als Datenquelle stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung nutzt.

4.4.2 Testdaten

Für das Projekt Wolke (FRIEDRICH et al., 2011 – 2013) stellte die Verkehrsinformationsagentur Bayern Fahrzeiten des Systems ASDA/FOTO für das in Bild 4-1 dargestellte Gebiet zur Verfügung. Bild 4-8 bis Bild 4-10 zeigen für den Streckenzug Hofoldingen Forst – AD Inntal einen Vergleich von ANPR-Daten und ASDA/FOTO-Daten für drei verschiedene Tage. Sowohl in Bild 4-8 als auch in Bild 4-9 wer-

Art der Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> Stationäre Detektoren, die Verkehrsstärke und lokale Geschwindigkeit erfassen (Kapitel 2.4.2)
Erforderliche Anzahl an Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> Es sind Detektoren nach jeder Anschlussstelle erforderlich Der Detektorabstand soll im Bereich von Engstellen bei < 3 km liegen und sonst bei < 10 km
Datenanbieter	<ul style="list-style-type: none"> Es gibt Anbieter, die Fahrzeitermittlungssysteme basierend auf SDD bereitstellen Es gibt keine Anbieter von Fahrzeitdaten, die mit SDD ermittelt wurden
Rohdaten des Systems	<ul style="list-style-type: none"> Das System liefert eine Heatmap mit räumlich und zeitlich differenzierten Geschwindigkeiten
Aufbereitungsschritte zur Ermittlung von Fahrzeiten	<ul style="list-style-type: none"> Die Messquerschnitte der stationären Detektoren werden in einer digitalen Straßenkarte verortet. Eine Folge benachbarter Messquerschnitte definiert einen Streckenzug, für den die Heatmap erstellt wird. Das Fahrzeitermittlungsverfahren rekonstruiert den Verkehrszustand entlang des Streckenzugs mit einem Algorithmus, der die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke, Dichte und Geschwindigkeit abbildet. Für eine Nachfragegewichtung, die Ermittlung der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwands werden die Verkehrsstärken der stationären Detektoren genutzt. Damit liegen alle Daten vor, die für die Berechnung von Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität und der Fahrzeitzuverlässigkeit erforderlich sind.

Tab. 4-11: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf stationären Detektordaten

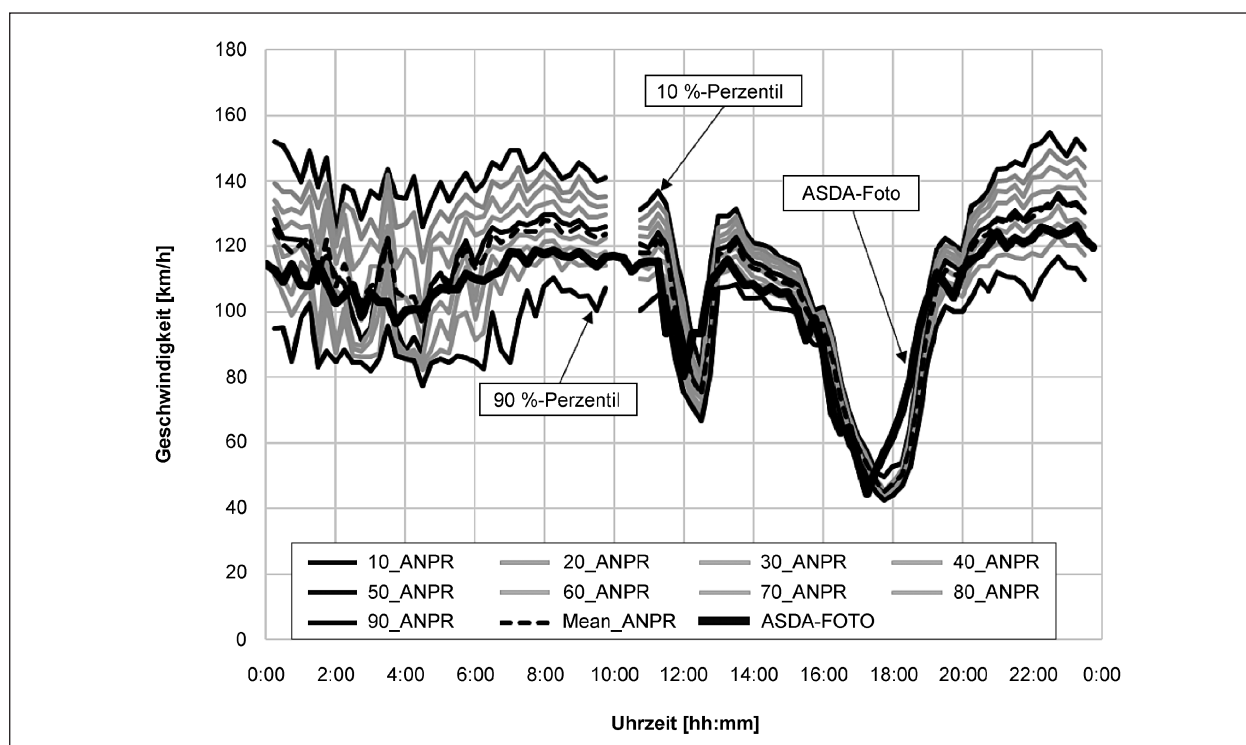


Bild 4-8: Vergleich zwischen ANPR und ASDA/FOTO für den Streckenzug Hofoldingen Forst – AD Inntal (Freitag 04.03.2011, 15-min-Intervalle)

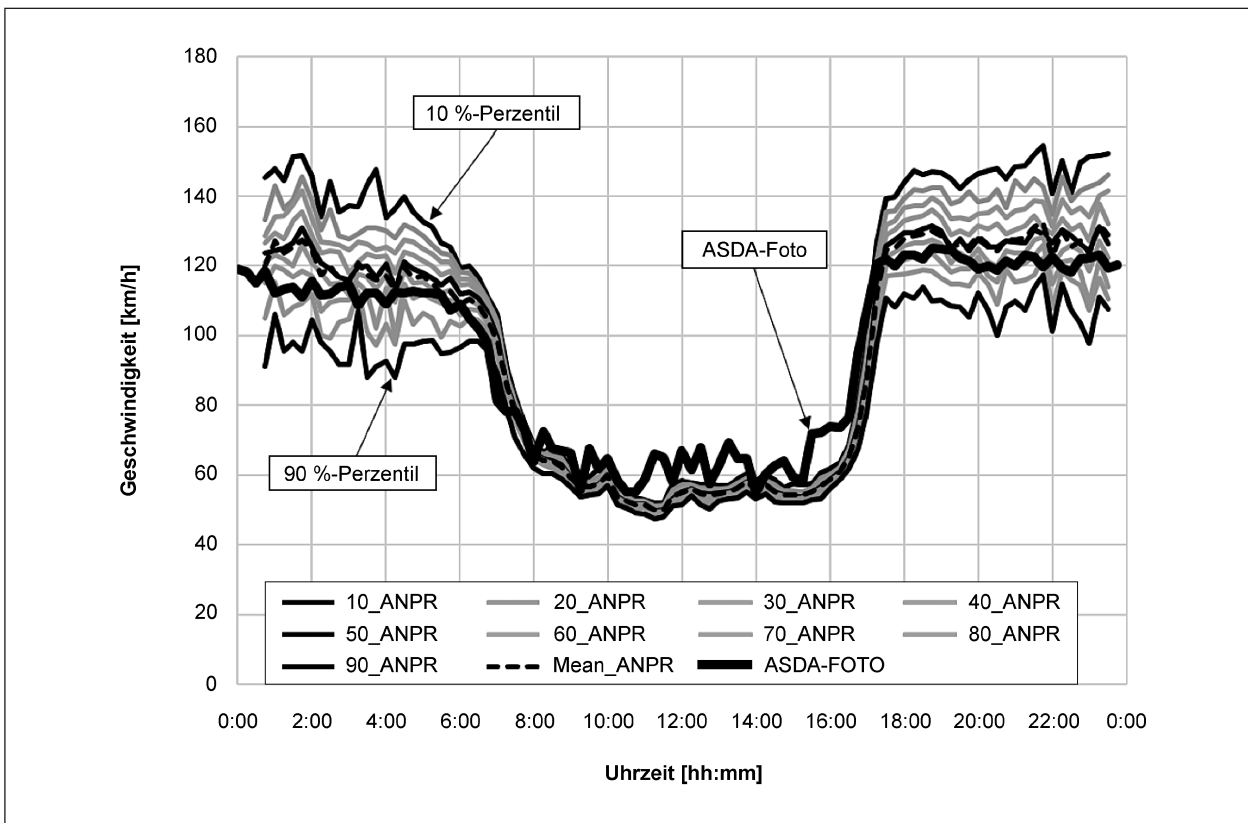


Bild 4-9: Vergleich zwischen ANPR und ASDA/FOTO für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal (Samstag 05.03.2011, 15-min-Intervalle)

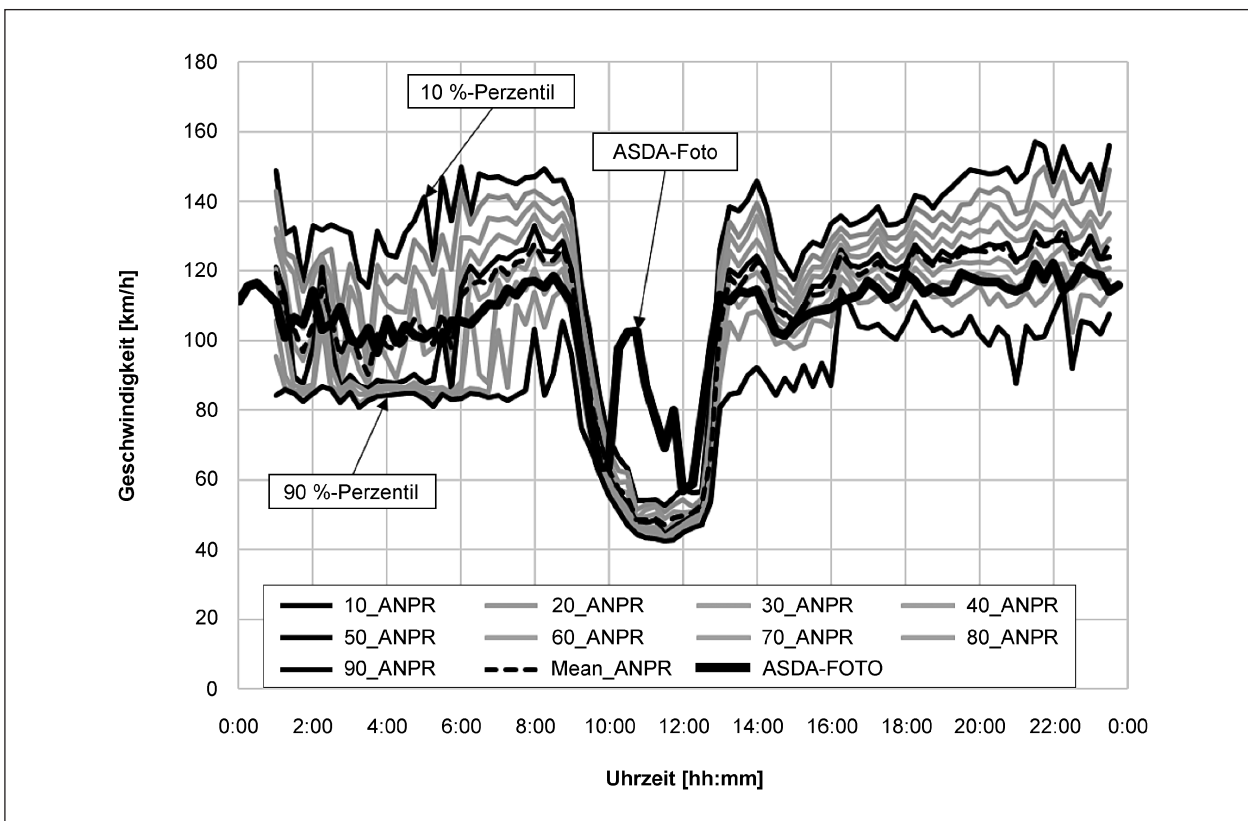


Bild 4-10: Vergleich zwischen ANPR und ASDA/FOTO für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal (Mittwoch 27.04.2011, 15-min-Intervalle)

den die Störungen sowohl von ANPR als auch von ASDA/FOTO gut erkannt und abgebildet. In diesen Fällen liegen die ASDA/FOTO Geschwindigkeiten meist etwas unter dem 50%-Perzentil der ANPR-Daten. In Bild 4-10 wird die von 09:00 Uhr bis 13:00 Uhr auftretende Störung von ASDA/FOTO nicht vollständig korrekt abgebildet. Über alle Tage des Erhebungszeitraums zeigt sich, dass die ASDA/FOTO-Daten für den Streckenzug Hofoldinginger Forst – AD Inntal eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Auf den anderen Streckenzügen (Bild 4-1)

ist die Übereinstimmung im Fall von Störungen weniger gut. Ursache hierfür ist die deutlich geringere Detektordichte auf diesen Streckenzügen.

4.4.3 Anforderungserfüllung

Tabelle 4-12 zeigt, in welchem Umfang ein KPI-System basierend auf stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung die Anforderungen erfüllt.

Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität	Anforderungserfüllung
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen	
Teilstrecke	+ Möglich
Strecke	+ Möglich
Netzabschnitt/Teilnetz	o Messstellen an Rampen erforderlich
KPI für beliebige Zeiträume	+ Möglich
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen	
Mittelwert	+ Modellierter Wert
Perzentile	o Nur über mehrere Zeiträume oder Tage
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	- Nur über zusätzliche Annahmen zur Lkw-Geschwindigkeit im Verkehrsflussmodell
Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	Anforderungserfüllung
KPI ungewichtet	+ Möglich
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+ Über die vorhandenen lokalen Verkehrsstärken
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	- Erfordert Modellerweiterungen
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsleistung Fahrzeuge	+ Über die vorhandenen lokalen Verkehrsstärken
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	+ Über die vorhandenen lokalen Verkehrsstärken
Verkehrsleistung Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	o Über Detektoren in jeder Zufahrt
Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen	Anforderungserfüllung
Eignung für Baustellen	- Detektoren im Baustellenbereich nicht verfügbar
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	+ Induktionsschleifen sind wetterunabhängig
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrtzeitquellen	+ Sinnvolle Ergänzung zu ANPR
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	- System funktioniert nicht im Baustellenbereich
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	o Nur wenn Detektoren auf Rampe (einer, besser zwei)
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	o Ort der Störung wird modelliert und nicht gemessen o Bei Vollsperrung und stationärer Störungsstelle ungenau
Eignung für Kurzfristprognose	+ Modellbasierte Kurzfristprognose möglich
Eignung für Mittelfristprognose	+ Es können typische Fahrtzeiten ermittelt werden
Eignung für Maßnahmenprognose	o Wirkungen von Kapazitätsänderungen auf den Verkehrsfluss modellierbar

Tab. 4-12: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung

Anforderung an die Qualität	Anforderungserfüllung
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	o Erfordert ein Verständnis des Verkehrsflussmodells
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeiten (Rohdaten)	o Abhängig von Detektordichte
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeitverteilungen	Fahrtzeiten werden modelliert und nicht gemessen, Modell muss kalibriert werden Zeitverluste bei Vollsperrung ungenau
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	o Ort der Störung wird modelliert und nicht gemessen
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	+ Es werden nur SDD benötigt
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	o Modell wird ungenauer
Repräsentativität der Stichprobe	Werte werden modelliert
Aussagen zum Stichprobenumfang	
Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung	Anforderungserfüllung
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	KPI können aus den dezentral ermittelten Daten abgeleitet werden. o Die Qualität der KPI wird nicht einheitlich sein, da jeder Streckenzug eine unbekannte spezifische Qualität erreicht
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	+ Fahrtzeitermittlung erfolgt in der Regel für einen Streckenzug/Netzabschnitt - Standard schwer umsetzbar
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	Modellrechnungen erforderlich, Systeme sind verfügbar o Fahrtzeitverteilungen bisher vermutlich nicht Bestandteil der Auswertungen
Datenschutzvorgaben erfüllen	+ Es werden keine personenbezogenen Daten erfasst
Weitergehende Anforderungen	Anforderungserfüllung
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	- Nicht möglich
Erfassung von Quellen und Zielen	- Nicht möglich
Erweiterung auf Bundesstraßen	- Erfordert viele zusätzliche MQ

Tab. 4-12: Fortsetzung

Art der Detektoren	• Mobilfunkantennen, die Orte von SIM-Karten in Mobilfunkgeräten (siehe Kapitel 2.4.3.1) erfassen
Erforderliche Anzahl an Detektoren	• Es sind keine straßenseitigen Einrichtungen erforderlich
Datenanbieter	• Es gibt Anbieter, die Mobilfunkdaten verkaufen • Es gibt keine Anbieter von Fahrtzeitdaten, die mit Mobilfunkdaten ermittelt wurden
Rohdaten des Systems	• Das System liefert für jede SIM-Karte eine Folge von Orten im Mobilfunknetz, an denen die Karte eingeloggt war. Die räumliche Auflösung variiert je nach Art der Schnittstelle. Orte können einzelne Mobilfunkzellen oder Location-Areas (eine Zusammenfassung mehrerer Mobilfunkzellen sein). Für jeden Ort liegt eine Uhrzeit vor.

Tab. 4-13: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)

<p>Aufbereitungsschritte zur Ermittlung von Fahrtzeiten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung eines sog. Best-Server-Plots, der für jeden geografischen Ort die jeweils stärkste Funkzelle definiert • Verschneiden des Best-Server-Plots mit dem Verkehrswegenetz, sodass jede Strecke einer Funkzelle zugeordnet werden kann • Ermittlung möglicher Fahrtrouten im Verkehrswegenetze einschließlich der Schienennetze. Für jede Fahrtroute wird das erwartete Funkzellenmuster ermittelt (Fingerprint einer Route). • Vergleich aller Funkzellenmuster (=Route im Mobilfunknetz) eines Tages mit allen möglichen Fahrtrouten im Verkehrswegenetz. Auswahl einer wahrscheinlichen Fahrtroute. • Zuordnung der Zeiten der Mobilfunkroute zu den Strecken der Fahrtroute. Es entsteht für jede SIM-Karte eine Zeit-Weg-Trajektorie im Verkehrswegenetz. • Identifikation von „langsamen“ Trajektorien, die auf eine Nutzung in einem Lkw hinweisen • Aus den Trajektorien werden für definierte Punkte im Netz (z. B. Anschlussstellen) Fahrtzeiten abgetragen. Die Fahrtzeiten der Trajektorien werden dabei interpoliert. • Aus der mittleren Fahrtzeit aller Trajektorien kann für den Abschnitt eine Heatmap mit tageszeitabhängigen mittleren Geschwindigkeiten ermittelt werden • Für eine Nachfragegewichtung der Kenngrößen kann die Zahl der Trajektorien genutzt werden. Für die Ermittlung der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwands sind Verkehrsstärken aus stationären Detektoren erforderlich. • Damit liegen alle Daten vor, die für die Berechnung von Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität und der Fahrtzeitzuverlässigkeit für den Abschnitt erforderlich sind • Für die Ermittlung abschnittsübergreifender Kenngrößen werden die Heatmaps mehrerer Abschnitte verknüpft
---	---

Tab. 4-13: Fortsetzung

4.5 KPI-System basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)

4.5.1 Systemaufbau

Tabelle 4-13 beschreibt in einfacher Form den Aufbau eines KPI-Systems, das als Datenquelle Mobilfunkdaten (FPD) nutzt.

4.5.2 Testdaten

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Do-IT: Datenoptimierung für integrierte Telematik“ (FRIEDRICH et al., 2005 – 2009) wurden Mobilfunkdaten von T-Mobile Deutschland zur Verfügung gestellt und aufbereitet. Die Mobilfunkdaten liefern Informationen über den Wechsel der Location Area aller Mobilfunkteilnehmer, den Beginn und das Ende eines Telefongesprächs und den Zellwechsel während eines Telefongesprächs. Die Datenerfassung erfolgte für das Autobahnviereck A8, A81, A6 und A5 (Leonberg – Weinsberg – Walldorf – Karlsruhe)

für das Jahr 2008. In Bild 4-11 sind 2 Auswertungen dargestellt, die im Rahmen des Projektes Projekt „Do-IT: (FRIEDRICH et al., 2005 – 2009) erstellt wurden. Die Darstellungen zeigen Bewegungen einzelner Mobilfunkgeräte, die auf Fahrtzeitverlängerungen zwischen zwei Autobahnanschlussstellen schließen lassen. In beiden Bildern lassen sich im ungestörten Zustand die Fahrzeugarten Pkw und Lkw unterscheiden, die dann im Störfall eine ähnliche Geschwindigkeit aufweisen.

4.5.3 Anforderungserfüllung

Tabelle 4-14 zeigt, in welchem Umfang ein KPI-System basierend auf Mobilfunkdaten (FPD) die Anforderungen erfüllt.

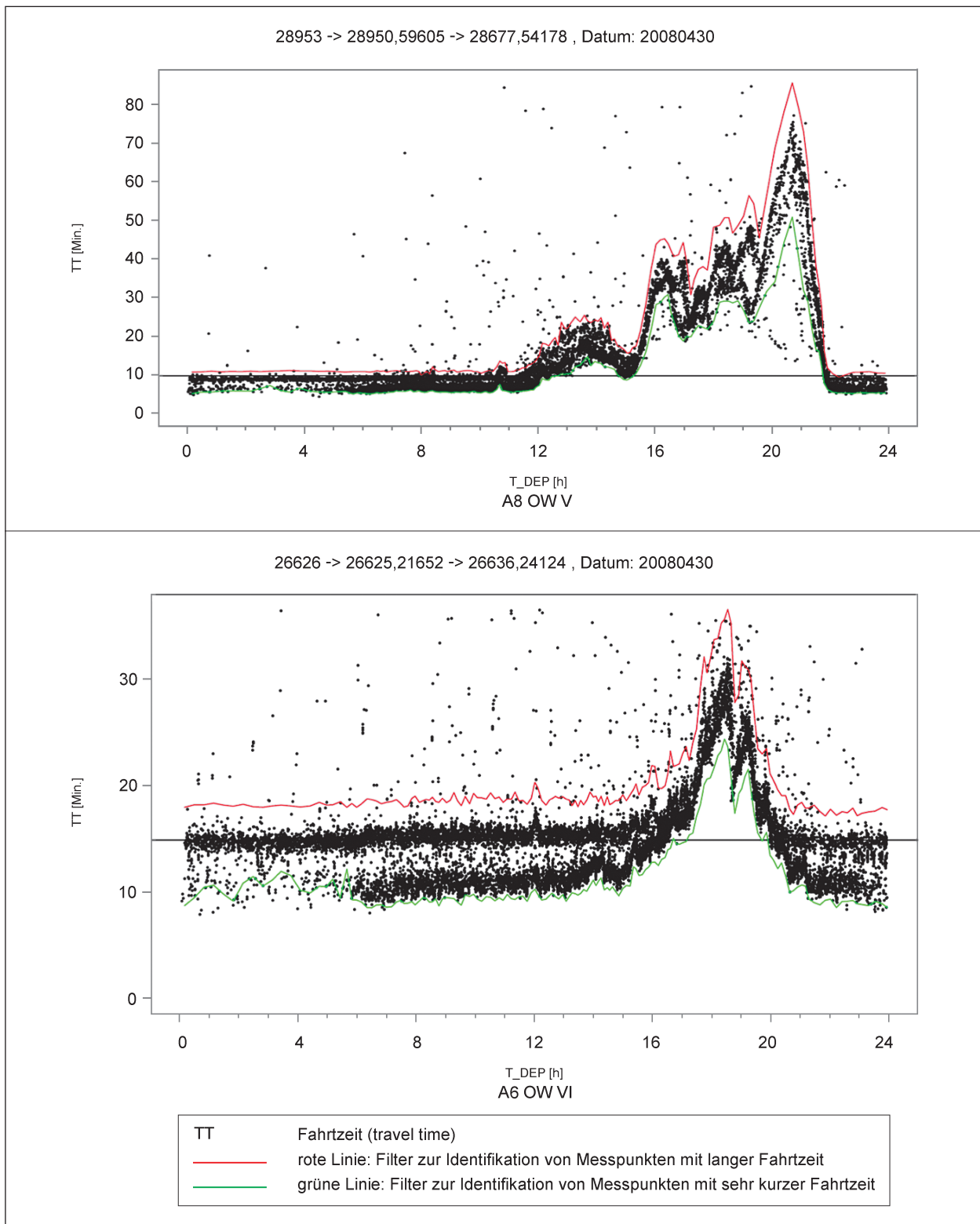


Bild 4-11: Beispiele für eine Zustandserfassung mit Mobilfunkdaten (Quelle: Projekt „Do-IT: Datenoptimierung für integrierte Tele-
matik“ (FRIEDRICH et al., 2005 – 2009))

Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität	Anforderungserfüllung
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen Teilstrecke Strecke Netzabschnitt/Teilnetz	Aussagegenauigkeit steigt mit der Entfernung - Messungen kurzer Abschnitte schwierig o Messungen kurzer Strecken schwierig + Möglich
KPI für beliebige Zeiträume	+ Möglich
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen Mittelwert Perzentile	+ Möglich + Direkte Ermittlung der Perzentile aus Einzelfahrtzeiten Anteil Durchgangsverkehr nimmt jedoch mit Entfernung ab
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	- Möglich, erfordert aber eine Fahrzeugverfolgung über mehrere MQ
Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	Anforderungserfüllung
KPI ungewichtet	+ Möglich
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	Stichprobe möglicherweise verzerrt, Gewichtung ohne weitere Datenquellen nur eingeschränkt möglich Absolute Verlustzeit nur mit SDD
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	o Differenzierung Pkw/Lkw erfordert Fahrzeugverfolgung über mehrere MQ
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsleistung Fahrzeuge	- Nur mit lokalen Verkehrsstärken
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	- Nur mit lokalen Verkehrsstärken
Verkehrsleistung Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	- Über Anzahl unterschiedlicher SIM-Karten mit Modellrechnungen (Hochrechnung)
Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen	Anforderungserfüllung
Eignung für Baustellen	+ Qualität wird durch Baustellen nicht beeinflusst
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	+ Qualität wird durch Wetter nicht beeinflusst
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrtzeitquellen	+ Sinnvolle Ergänzung zu SDD
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	o Wirkungen bekannter Baustellen/Unfälle über abschnittsbezogene Fahrtzeiten
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	- Der Abbiegevorgang wird nur als Teil einer Route erfasst, die räumliche Auflösung ist unzureichend
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	Genauigkeit unklar, hängt von der Erfassungsebene ab - (A- oder A-bis Schnittstelle) wird möglicherweise mit 4G besser
Eignung für Kurzfristprognose	o Es können nur Tendenzen (steigende oder fallende Fahrtzeiten) angezeigt werden
Eignung für Mittelfristprognose	+ Es können typische Fahrtzeiten ermittelt werden
Eignung für Maßnahmenprognose	- Nicht möglich

Tab. 4-14: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)

Anforderung an die Qualität	Anforderungserfüllung
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	+/- Abhängig davon, ob Fremdimplementierung (o) oder Eigenimplementierung (+)
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeiten (Rohdaten)	Genauigkeit steigt mit Fahrtweite → ausreichende Genauigkeit für Netzabschnitte o Keine exakte Ermittlung des Fahrzeugstandorts Lkw können Fahrtzeiten verfälschen ÖV-Nutzer können Fahrtzeiten verfälschen
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeitverteilungen	+ Filterregel für langsame Fahrzeuge und für die Erkennung von Fahrzeugstopps beeinflusst Ergebnis
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	o Abhängig vom Mobilfunknetz
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	o Aufwändige Datenübertragung und Datenaufbereitung
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	- Bei einem Ausfall sind nur historische Daten verfügbar
Repräsentativität der Stichprobe	o Es werden SIM-Karten erfasst o Zufällige Auswahl der Fahrzeuge eingeschränkt
Aussagen zum Stichprobenumfang	+ In Kombination mit SDD
Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung	Anforderungserfüllung
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	Für standardisierte KPI-Auswertung ist zentrale Auswertung + sinnvoll Räumliche Differenzierung nach Verkehrszentralen möglich
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	- Dezentrale Fahrzeitermittlung möglich, aber nicht sinnvoll
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	Systementwicklung erforderlich Regeln zur Identifikation von Verkehrsarten (Pkw, Lkw, ÖV, Rad) erforderlich - Matching-Algorithmus erforderlich Keine Modellrechnungen erforderlich
Datenschutzvorgaben erfüllen	o Rechtliche Klärung auf Bundesebene erforderlich
Weitergehende Anforderungen	Anforderungserfüllung
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	+ Möglich
Erfassung von Quellen und Zielen	+ Möglich auf der Ebene von Anschlussstellen und auf der Ebene von Start- und Zielorten einer Fahrt
Erweiterung auf Bundesstraßen	+ Möglich

Tab. 4-14: Fortsetzung

4.6 KPI-System basierend auf Floating-Car-Data (FCD)

4.6.1 Systemaufbau

Tabelle 4-15 beschreibt in einfacher Form den Aufbau eines KPI-Systems, das als Quelle Floating-Car-Daten (FCD) nutzt.

4.6.2 Testdaten

Zum Test eines auf FCD basierenden KPI-Systems werden Daten der Firma TomTom für das Autobahnviereck A8, A81, A6 und A5 (Leonberg – Weinsberg – Walldorf – Karlsruhe) genutzt. Die Daten liegen für den 19.04.2018 von 8:00 bis 18:00 Uhr vor und haben eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten. Für den Streckenzug Leonberg – Karlsruhe sind zusätzlich TomTom-Daten in 60 Minuten Zeiträumen verfügbar. Die Daten liegen in Form von Geschwindigkeiten je Teilstrecke und Zeitraum vor. Für das gesamte Autobahnviereck ergibt dies ca. 1.600 Teilstrecken mit einer mittleren Länge von rund 240 Metern. Bild 4-12 zeigt eine Heatmap zwischen dem Autobahndreieck Karlsruhe und dem Dreieck Leonberg für den 19.04.2018. Es liegen alle fünf Minuten von 08:00 Uhr bis 18:00 Uhr Geschwindig-

keitsdaten für jede der 231 Strecken vor. Für die Darstellung und Berechnung wurde der Mittelwert der TomTom-Daten gewählt. Die Heatmap wird dann genutzt, um zwischen 8:00 Uhr und 16:25 Uhr in Abständen von einer Minute Zeit-Weg-Trajektorien zu generieren. Die Trajektorien sind in Bild 4-12 zur besseren Übersichtlichkeit nur alle 5 Minuten eingezeichnet.

Aus den Fahrzeiten der Trajektorien können der Mittelwert und Perzentile berechnet werden. In Bild 4-13 (links) ist die Fahrzeitverteilung, der Mittelwert, das 50%-Perzentil, das 70%-Perzentil und das 90%-Perzentil für den ungewichteten Fall dargestellt. Bild 4-13 (rechts) zeigt die Fahrzeitverteilung, die über die von TomTom mitgelieferte „SampleSize“ (Hits) gewichtet ist. Hierbei werden entlang der Trajektorie die Hits aller Teilstrecken zum Einfahrtzeitpunkt in die Teilstrecke aufsummiert und liefern so eine Gewichtung für die einzelnen Trajektorien.

4.6.3 Anforderungserfüllung

Tabelle 4-16 zeigt, in welchem Umfang ein KPI-System basierend auf Floating-Car-Daten die Anforderungen erfüllt.

Art der Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> GNSS-Detektoren in Navigationssystemen, die den Ort und die Zeit des Detektors erfassen (siehe Kapitel 2.4.4)
Erforderliche Anzahl an Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> Es sind keine straßenseitigen Einrichtungen erforderlich Für zeitlich differenzierte Auswertungen ist ein Ausrüstungsgrad von etwa 10 % der Fahrzeuge erforderlich (OFFERMANN, 2001)
Datenanbieter	<ul style="list-style-type: none"> Es gibt kommerzielle Anbieter von aufbereiteten Geschwindigkeitsdaten, die mit FCD ermittelt wurden
Rohdaten des Systems	<ul style="list-style-type: none"> Die Anbieter liefern bereits aufbereitete Geschwindigkeitsdaten, die räumlich (Teilstrecken von etwa 200 m) und zeitlich (< 15 Minuten) differenziert sind (siehe Tabelle 2-15)
Aufbereitungsschritte zur Ermittlung von Fahrzeiten	<ul style="list-style-type: none"> Aus den mittleren Geschwindigkeiten ergibt sich für jede Strecke und für jeden Streckenzug eine räumlich nach Teilstrecken differenzierte Heatmap mit tageszeitabhängigen mittleren Geschwindigkeiten Für eine Nachfragegewichtung der Kenngrößen kann die Zahl der Hits (beobachtete GNSS-Geräte) genutzt werden. Für die Ermittlung der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwands sind Verkehrsstärken aus stationären Detektoren erforderlich. Damit liegen alle Daten vor, die für die Berechnung von Kenngrößen der Verkehrsablaufqualität und der Fahrzeitzuverlässigkeit erforderlich sind

Tab. 4-15: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)

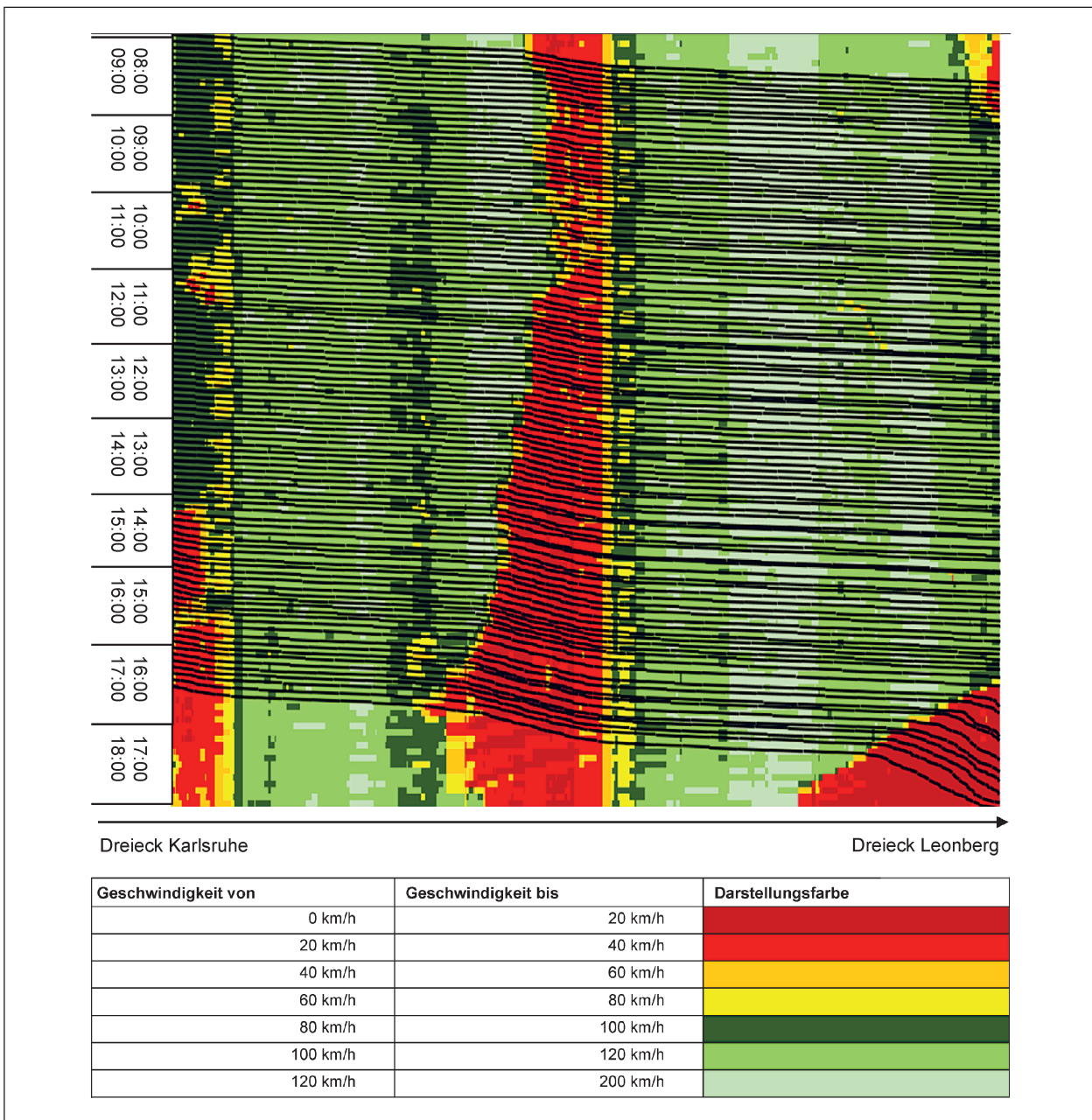


Bild 4-12: Heatmap mit Zeit-Weg-Trajektorien in 1-Minuten-Abständen für den Mittelwert der Geschwindigkeit aus TomTom-Daten in einer zeitlichen Aggregation von 5 Minuten für den Streckenzug Dreieck Karlsruhe – Dreieck Leonberg am Donnerstag, den 19.04.2018

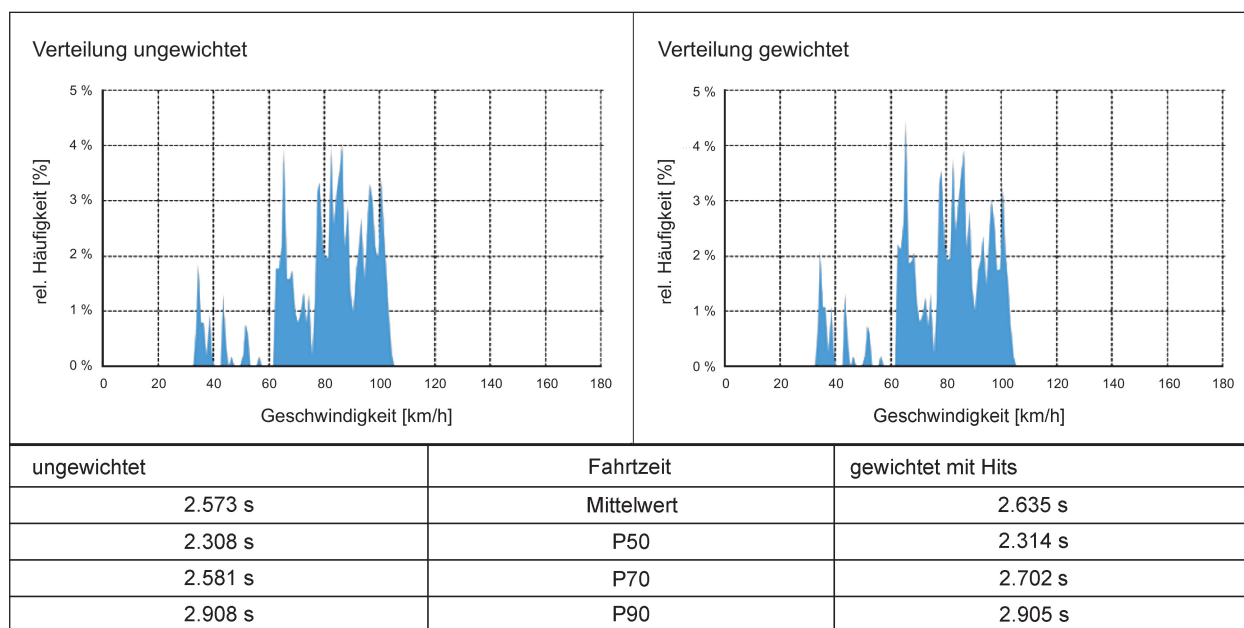


Bild 4-13: Fahrtzeitverteilungen aus den Zeit-Weg-Trajektorien (alle 1 min) für den Mittelwert aus TomTom-Daten in einer zeitlichen Aggregation von 5 Minuten für den Streckenzug Dreieck Karlsruhe – Dreieck Leonberg am Donnerstag, den 19.04.2018

Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität	Anforderungserfüllung
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen Teilstrecke Strecke Netzabschnitt/Teilnetz	+ Möglich
KPI für beliebige Zeiträume	+ Möglich
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen Mittelwert Perzentile	+ Möglich Perzentile dürfen nicht aufsummiert werden o Perzentile eines Untersuchungszeitraums müssen aus den Mittelwerten aller Tage des Untersuchungszeitraums ermittelt werden.
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	Eingeschränkt möglich, wenn Datenanbieter FCD differenziert nach Fahrzeugklasse anbieten o Sonst Nutzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Lkw
Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	Anforderungserfüllung
KPI ungewichtet	+ Möglich
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+ Ohne weitere Datenquellen mit Hits o Absolute Verlustzeit nur mit SDD
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	o Nur wenn Datenanbieter FCD differenziert nach Fahrzeugklasse anbieten
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsleistung Fahrzeuge	- Nur über lokale Verkehrsstärken
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	- Nur über lokale Verkehrsstärken
Verkehrsleistung Personen	- Nur mit Annahmen zum Besetzungsgrad
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	- Nicht möglich

Tab. 4-16: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)

Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen	Anforderungserfüllung
Eignung für Baustellen	+ Qualität wird durch Baustellen nicht beeinflusst
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	+ Qualität wird durch Wetter nicht beeinflusst
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrzeitquellen	+ Sinnvolle Ergänzung zu SDD
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	+ Wirkungen bekannter Baustellen und Unfälle zeitlich und räumlich messbar
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	Derzeit keine fahstreifenbezogene Auswertung möglich, so - dass die Fahrzeiten abbiegender Fahrzeuge nicht separat ausgewiesen werden
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	+ Ort der Störung lokalisierbar
Eignung für Kurzfristprognose	o Es können nur Tendenzen (steigende oder fallende Fahrzeiten) angezeigt werden
Eignung für Mittelfristprognose	+ Es können typische Fahrzeiten ermittelt werden
Eignung für Maßnahmenprognose	- Nicht möglich
Anforderung an die Qualität	Anforderungserfüllung
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	- Aufbereitungsschritte der Anbieter sind unterschiedlich und ändern sich
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeiten (Rohdaten)	+ Bei hohem Lkw-Anteil (Nachts) vermutlich $v_{\text{Messung}} < v_{\text{Realität}}$
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeitverteilungen	+ Wenn Perzentile aus Mittelwerten berechnet werden
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	+ Ort der Störung genau lokalisierbar
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	+ Keine genauen Aussagen möglich, Latenzzeit für die Verkehrsinformation und Verkehrssteuerung ausreichend
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	- Bei einem Ausfall sind nur historische Daten verfügbar
Repräsentativität der Stichprobe	+ Möglicherweise Lkw enthalten
Aussagen zum Stichprobenumfang	+ Über Hits in Kombination mit SDD
Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung	Anforderungserfüllung
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	+ KPI können zentral und dezentral ausgewertet werden Räumliche Differenzierung nach Verkehrszentralen möglich
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	+ Bei Wechsel eines Anbieters sind die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	Geschwindigkeitswerte liegen aufbereitet vor + Perzentile für Netzabschnitte liefern keine korrekten Werte, hier ist eine eigene Aufbereitung erforderlich
Datenschutzvorgaben erfüllen	+ Datenschutz ist Aufgabe des Datenanbieters
Weitergehende Anforderungen	Anforderungserfüllung
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	- Wird derzeit nicht angeboten
Erfassung von Quellen und Zielen	- Wird derzeit nicht angeboten
Erweiterung auf Bundesstraßen	+ Möglich

Tab. 4-16: Fortsetzung

4.7 Vergleich der KPI-Systeme

In Tabelle 4-17 ist eine Gegenüberstellung der KPI-Systeme und der Anforderungen, die in den Kapiteln 4.2 bis Kapitel 4.6 beschrieben wurden, dargestellt. Diese Bewertungen sind Input für die nachfolgende Kosten-Nutzen-Analyse.

Aus der Gegenüberstellung lassen sich folgende zusammenfassende Aussagen zur Anforderungserfüllung ableiten:

- ANPR und Bluetooth (BT) erfüllen die Anforderungen in ähnlicher Weise. Sie liefern Fahrzeiten mit hoher Genauigkeit, haben aber Nachteile bei der Lokalisierung von Störungen.
- Stationäre Detektordaten (SDD) bieten in Kombination mit einer Modellerweiterung als einziges KPI-System Aussagen zu Fahrzeiten und zur Verkehrsnachfrage. SDD ermöglicht außerdem als einziges System eine Kurzfristprognose und eine Maßnahmenprognose. Diesen Vorteilen stehen Einschränkungen bei der Qualität der Fahrzeitdaten gegenüber, die maßgeblich von der Detektordichte und der Kalibrierung des Systems beeinflusst wird. Bei großen Störungen (Vollsperrung) werden Fahrzeiten unterschätzt, da die Geschwindigkeit im Verkehrszustand „Stop-and-Go“ nicht genau modelliert werden können. Der größte Nachteil dieses KPI-Systems ist die Begrenzung auf einen Netzabschnitt und die damit verbundenen Einschränkungen für einen zentralen Einsatz beim Bund. Für jeden Netzabschnitt muss ein eigenes KPI-Teilsystem aufgebaut werden.
- Mobilfunkdaten (FPD) ermöglichen es auf einfache Weise eine große Anzahl von Ortveränderungen zu beobachten. Da keine Fahrzeuge, sondern Sim-Karten erfasst werden und die räumliche Auflösung geringer als bei Floating-Car-Daten ist, sind Aussagen zu Fahrzeitdaten nur für Strecken und nicht für Teilstrecken möglich. Der größte Vorteil von Mobilfunkdaten besteht in der Verfügbarkeit für das gesamte Verkehrswegenetz und in der netzweiten Erfassung von Fahrtrouten.
- Floating-Car-Daten (FCD) sind das KPI-System der Wahl, wenn Fahrzeitdaten einfach, mit hoher Qualität, mit einer einheitlichen Fahrzeitermittlungsmethode und mit wenig straßenseitiger Detektion erfasst werden sollen. Sie sind wetter- und baustellenunabhängig und können sowohl zentral als auch dezentral ausgewertet werden. Derzeit ist nicht klar, wie hoch die Dichte an stationären Detektoren sein muss, um in der Kombination von FCD und SDD Kenngrößen der Verkehrsnachfrage zu ermitteln.
- Aufgrund ihrer komplementären Eigenschaften erfüllt die Kombination von SDD mit Modellerweiterung und FCD eine große Menge der Anforderungen. Diese Kombination wird im Folgenden als ein mögliches hybrides KPI-System beschrieben.

Anforderung	Anforderungserfüllung				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität					
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen					
Teilstrecke	-	-	+	-	+
Strecke	+	+	+	0	+
Netzabschnitt/Teilnetz	+	+	0	+	+
KPI für beliebige Zeiträume	+	+	+	+	+
KPI basieren auf Fahrzeitverteilungen					
Mittelwert	+	+	+	+	+
Perzentile	+	+	0	+	0
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	-	-	-	-	0

Tab. 4-17: Gegenüberstellung der Anforderungen und der Anforderungserfüllung für die fünf KPI-Systeme basierend auf einer primären Datenquelle (ANPR, Bluetooth (BT), stationäre Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung, Mobilfunkdaten (FPD), Floating-Car-Daten (FCD))

Anforderung	Anforderungserfüllung				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage					
KPI ungewichtet	+	+	+	+	+
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+	+	+	0	+
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	0	0	-	0	0
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	-	-	-	-	-
Verkehrsleistung Fahrzeuge	0	-	+	-	-
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	-	-	+	-	-
Verkehrsleistung Personen	-	-	-	-	-
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	+	-	0	-	-
Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen					
Eignung für Baustellen	-	+	-	+	+
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	0	+	+	+	+
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrtzeitquellen	+	+	+	+	+
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	0	0	-	0	+
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	0	0	0	-	-
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	-	-	0	-	+
Eignung für Kurzfristprognose	0	0	+	0	0
Eignung für Mittelfristprognose	+	+	+	+	+
Eignung für Maßnahmenprognose	-	-	0	-	-
Anforderung an die Qualität					
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	+/0	+/0	0	+/0	-
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeiten (Rohdaten)	+	+	0	0	+
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeitverteilungen	+	0	0	+	+
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	-	-	0	0	+
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	0	0	+	0	+
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	+	+	0	-	-
Repräsentativität der Stichprobe	+	0		0	+
Aussagen zum Stichprobenumfang	+	+		+	+
Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung					
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	+	+	0	+	+
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	0	0	0	-	+
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	0	0	0	-	+
Datenschutzvorgaben erfüllen	0	0	+	0	+
Weitergehende Anforderungen					
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	+	0	-	+	-
Erfassung von Quellen und Zielen	+	0	-	+	-
Erweiterung auf Bundesstraßen	-	-	-	+	+

Tab. 4-17: Fortsetzung

4.8 Einsatz hybrider KPI-Systeme

Die in Tabelle 4-17 beschriebenen KPI-Systeme nutzen immer eine primäre Datenquelle (ANPR, Bluetooth (BT), stationäre Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung, Mobilfunkdaten (FPD), Floating-Car-Daten (FCD)). In der Praxis werden von den Verkehrszentralen bereits heute unterschiedliche Datenquellen genutzt, sodass ein hybrider Ansatz zur Bestimmung von KPI aus mehreren Gründen sinnvoll ist:

- Es existiert keine Möglichkeit, mit einer Datenquelle sowohl die Zahl der Fahrzeuge als auch die Qualität des Verkehrsablaufs für Teilstrecken zeitnah und genau zu erfassen.
- Es existieren bereits zahlreiche Messstellen, an denen kontinuierlich Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten und meteorologische Daten erfasst werden.
- Für spezifische Anforderungen des Verkehrsmanagements kommen auf mehreren Netzabschnitten des BAB-Netzes bereits unterschiedliche Datenquellen zum Einsatz, die für ein KPI-System genutzt werden können.

Für ein hybrides KPI-System, das mehrere Datenquellen kombiniert, wird im Folgenden ein dreistufiger Ansatz vorgestellt:

- Stufe 0: KPI-Basissystem mit stationären Detektordaten (SDD).
- Stufe 1: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD) und Floating-Car-Data (FCD).
- Stufe 2: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD), Floating-Car-Data (FCD) und lokalen Erweiterungen.

4.8.1 Stufe 0: KPI-Basissystem mit stationären Detektordaten (SDD)

Ein KPI-Basissystem mit stationären Messstellen liefert Daten über lokale Verkehrsstärken und lokale Geschwindigkeiten differenziert nach Pkw und Lkw. Damit kann die Verkehrsleistung im Netz direkt gemessen werden. Die Qualität des Verkehrsablaufs kann mit lokalen Geschwindigkeiten allerdings nur sehr grob abgeschätzt werden. Anders als bei dem in Kapitel 4.4 beschriebenen KPI-System basierend auf stationären Detektordaten (SDD) mit Modell-

erweiterung wird hier unterstellt, dass die lokal gemessenen Geschwindigkeiten ohne Nachbearbeitung repräsentativ für den gesamten Abschnitt sind, dem der Detektor zugeordnet ist. Die Detektoren dieses KPI-Basissystems sind auf vielen Strecken des BAB-Netzes bereits verfügbar. Ein einheitliches System zur Ermittlung der KPI muss noch geschaffen werden. Da SDD in hoher zeitlicher Auflösung vorliegen, sind beliebige zeitliche Aggregationen möglich. Tabelle 4-18 zeigt die Eigenschaften des KPI-Basissystems.

4.8.2 Stufe 1: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD) und Floating-Car-Data (FCD)

Das KPI-Basissystem wird durch die Nutzung kommerzieller FCD so erweitert, dass die Verkehrsablaufqualität quantifiziert werden kann. Je nach zeitlicher Auflösung der FCD ist ein derartiges KPI-System für die Anwendungsfälle Eckwerte, Engpassanalyse, Verfügbarkeit oder Real-Time (siehe Tabelle 3-1) einsetzbar:

- Stufe 1.1: KPI-System für die Anwendungsfälle Eckwerte und Engpassanalyse
FCD werden in größeren Zeitabständen (z. B. jährlich) für alle Teilstrecken aggregiert nach Verkehrstagesstypen und Tageszeiten (z. B. Hauptverkehrszeiten typischer Werktage) beschafft und ausgewertet. Die Ermittlung der KPI erfolgt an einer zentralen Stelle. Die Aussagen der KPI beziehen sich auf mittlere Jahreswerte differenziert nach Verkehrstag und Tageszeit.
- Stufe 1.2: KPI-System für Anwendungsfall Verfügbarkeit
FCD werden in größeren Zeitabständen (z. B. jährlich) für alle Teilstrecken als stündliche Werte oder feiner beschafft. Die Auswertung nutzt mittlere Trajektorien, die für das gesamte Jahr erstellt werden und auch Aussagen über Perzentile ermöglichen. Sie können außerdem mit Baustellendaten verschnitten werden. Die Ermittlung der KPI erfolgt an einer zentralen Stelle. Die Aussagen der KPI beziehen sich auf Mittelwerte und Perzentile für beliebige Zeiträume.
- Stufe 1.3: KPI-System für Anwendungsfall Real-Time
FCD werden kontinuierlich (online) für alle Teilstrecken beschafft. Die Daten werden dezentral

für das Verkehrsmanagement und die Betriebsdienstoptimierung genutzt. Zusätzlich erfolgt eine Ermittlung großräumiger KPI an einer zentralen Stelle. Die momentanen Werte der KPI

können mit historischen KPI-Werten verglichen werden. Aussagen der KPI beziehen sich auf Mittelwerte und Perzentile für beliebige Zeiträume.

Beschreibung	Das KPI-System basiert auf dem heutigen Stand der SDD und einer Erweiterung der Detektoren, so dass jede Strecke des BAB-Netzes mit mindestens einem Messquerschnitt erfasst wird.
Datenquellen	<ul style="list-style-type: none"> • SDD • Baustellendaten
Datenlieferant	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrszentralen
Eingangsdaten	<p>Kenngrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsstärken Pkw, Lkw • lokale Geschwindigkeiten Pkw, Lkw <p>räumliche Auflösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • mindestens ein Messquerschnitt je BAB-Strecke <p>zeitliche Auflösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • < 60 Minuten
Datenaufbereitung	<p>Vorgehensweise</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erstellung einer einfachen Heatmap. Die Geschwindigkeit einer Strecke wird direkt aus der lokalen Geschwindigkeit übernommen. Die räumliche Differenzierung ergibt sich direkt aus der Detektordichte. • Ableitung von Fahrtzeiten und Fahrtzeitverteilungen aus der Heatmap mit mittleren Fahrtzeit-Trajektorien (z. B. alle 5 Minuten) • Gewichtung mit lokalen Verkehrsstärken • Verkehrsleistung direkt aus Verkehrsstärke und Streckenlänge • Differenzierung nach Pkw und Lkw • Verschneidung mit Baustellendaten möglich <p>Häufigkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • jährlich • bei Bedarf öfters <p>Datenaufbereitung und Datenauswertung</p> <ul style="list-style-type: none"> • zentrale Stelle
KPI	<p>Kenngrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> • alle KPI können grundsätzlich berechnet werden <p>räumliche Auflösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Strecken • Netzabschnitte <p>zeitliche Auflösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • es sind beliebige Auflösungen möglich
Qualität	<p>Fahrtzeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> • bei einem Messquerschnitt pro Strecke gering • bei höherer Dichte befriedigend <p>Verkehrsleistung</p> <ul style="list-style-type: none"> • hoch

Tab. 4-18: Eigenschaften des KPI-Basissystems der Stufe 0

Beschreibung	Das KPI-Basissystem der Stufe 0 wird durch die Nutzung kommerzieller FCD so erweitert, dass die Verkehrsablaufqualität quantifiziert werden kann.
Datenquellen	<ul style="list-style-type: none"> • FCD
Datenlieferant	<ul style="list-style-type: none"> • Kommerzielle Anbieter

Tab. 4-19: Eigenschaften des KPI-Systems der Stufe 1

Eingangsdaten	<p>Kenngroößen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeiten aus FCD (Mittelwerte, Perzentile) <p>räumliche Auflösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teilstrecken von etwa 200 m <p>zeitliche Auflösung je nach Anwendungsfall</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stufe 1.1 Eckwerte und Engpassanalyse: Verkehrstage und Tageszeiten eines Jahres • Stufe 1.2 Verfügbarkeit: stündlich oder feiner für alle Kalendertage • Stufe 1.3 Real-Time: kontinuierlich (online)
Datenaufbereitung	<p>Vorgehensweise</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aus den mittleren Geschwindigkeiten ergibt sich für jede Strecke und für jeden Streckenzug eine räumlich nach Teilstrecken differenzierte Heatmap mit zeitabhängigen mittleren Geschwindigkeiten. • Stufe 1.1: Ableitung von Fahrzeiten einer Strecke oder eines Streckenzugs durch Aufsummierung der Mittelwerte. • Stufe 1.2 und 1.3: Ableitung von Fahrzeiten und Fahrzeitverteilungen aus der Heatmap mit mittleren Fahrzeit-Trajektorien (z. B. alle 5 Minuten) • Gewichtung mit den Verkehrsstärken aus den SDD <p>Häufigkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stufe 1.1 und 1.2: jährlich • Stufe 1.3: kontinuierlich und zu definierten Zeitpunkten (Tagesbericht, Monatsbericht, ...) <p>Datenaufbereitung und Datenauswertung</p> <ul style="list-style-type: none"> • zentrale Stelle • bei Stufe 1.3 zusätzlich dezentrale Datennutzung
KPI	<p>Kenngroößen</p> <ul style="list-style-type: none"> • alle KPI können berechnet werden, bei Stufe 1.1 nur Mittelwerte <p>räumliche Auflösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teilstrecken • Strecken • Netzabschnitte <p>zeitliche Auflösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stufe 1.1 Eckwerte und Engpassanalyse: Mittelwerte eines Jahres • Stufe 1.2 Verfügbarkeit: Mittelwerte und Perzentile für beliebige Zeiträume • Stufe 1.3 Real-Time: zusätzlich aktuelle Werte (online)
Qualität	<p>Fahrzeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> • hoch <p>Verkehrsleistung</p> <ul style="list-style-type: none"> • hoch

Tab. 4-19: Fortsetzung

4.8.3 Stufe 2: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD), Floating-Car-Data (FCD) und lokalen Erweiterungen

Das KPI-System der Stufe 1 wird für ausgewählte Netzabschnitte erweitert. Die Erweiterung kann sowohl eine modellbasierte Fahrzeitermittlung als auch die Nutzung von ANPR- oder Bluetooth-Daten umfassen:

- Stufe 2.0 KPI-System mit SDD und modellbasierter Fahrzeitermittlung
Die Stufe 2.0 baut direkt auf der Stufe 0 auf und verzichtet auf die Nutzung von FCD. Die SDD

werden für eine modellbasierte Fahrzeitermittlung genutzt. Dabei steht der Anwendungsfall Verkehrsmanagement im Vordergrund. Die Stufe 2.0 entspricht dem in Kapitel 4.4 beschriebenen KPI-System, das allerdings nur auf Netzabschnitten mit einer hohen Stauwahrscheinlichkeit eingesetzt wird.

- Stufe 2.1 KPI-System mit SDD und FCD und modellbasierter Fahrzeitermittlung
Diese Erweiterung nutzt die zusätzlichen Analyse- und Prognosemöglichkeiten einer modellbasierten Fahrzeitermittlung. Es wird auf Netzab-

schnitten mit einer hohen Stauwahrscheinlichkeit eingesetzt.

- Stufe 2.2 KPI-System mit SDD und FCD und ANPR/Bluetooth
Diese Erweiterung nutzt ANPR- oder Bluetooth-Daten, um Aussagen über die Routenwahl, Abbiegeanteile und die Befolungsraten von Verkehrsbeeinflussungssystemen machen zu können. Es kann auf Teilnetze mit Alternativrouten und einer Netzsteuerung begrenzt werden.

4.8.4 Anforderungserfüllung eines mehrstufigen KPI-Systems

Tabelle 4-20 gibt einen Überblick über die Eigenschaften und die Anwendungsfälle der oben beschriebenen Ausbaustufen. In Tabelle 4-21 ist die Anforderungserfüllung für jede Ausbaustufe der beschriebenen hybriden KPI-Systeme dargestellt.

Die Gegenüberstellung der hybriden KPI-Systeme zeigt, dass die Einsatzbereiche und die Anforderungserfüllung der KPI-Systeme mit jeder Stufe zunehmen. Die Zahl der positiven Bewertungen steigt (fast) in jeder Zeile von links nach rechts. Eine Ausnahme bildet die Stufe 2.0, die dem Grundsystem aus Kapitel 4.4 – stationäre Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung – entspricht. Es ergeben sich folgende zusammenfassende Aussagen:

- Für die Anwendungsfälle Eckwerte und Engpassanalyse ist die Stufe 1.1 ausreichend.
- Die für den Anwendungsfall Real-Time wünschenswerte Kurzzeitprognose ist Bestandteil der Stufe 2.1.
- Für Teilnetze mit einer Netzsteuerung ist die Stufe 2.2 eine sinnvolle Erweiterung.

	Hybrides KPI-System						
	Stufe 0	Stufe 1.1	Stufe 1.2	Stufe 1.3	Stufe 2.0	Stufe 2.1	Stufe 2.2
Anwendungsfall							
Eckwerte	(☒)	☒	☒	☒	(☒)	☒	☒
Engpassanalyse	(☒)	☒	☒	☒	(☒)	☒	☒
Verfügbarkeit	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☒
Real-Time	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒
Datenquellen							
SDD	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
FCD für typische Tageszeiten und Verkehrstage, offline	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
FCD < 60 min, offline	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐
FCD < 60 min, online	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒
modellbasierte Fahrzeitermittlung	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐
ANPR oder Bluetooth	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
Ort der Datenauswertung							
zentrale Stelle des Bundes	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
dezentral in den Verkehrszentralen	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒
Häufigkeit der Auswertung							
in größeren Zeitabständen	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
kontinuierlich	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒
(☒) Aussage nur eingeschränkt gültig, da direkt aus SDD abgeleitete Fahrzeitendaten keine ausreichende Qualität aufweisen							

Tab. 4-20: Eigenschaften eines mehrstufigen KPI-Systems

	Anforderungserfüllung						
	Stufe 0	Stufe 1.1	Stufe 1.2	Stufe 1.3	Stufe 2.0	Stufe 2.1	Stufe 2.2
Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität							
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen							
Teilstrecke	-	+	+	+	0	+	+
Strecke	+	+	+	+	+	+	+
Netzabschnitt/Teilnetz	+	+	+	+	-	+	+
KPI für beliebige Zeiträume	+	-	+	+	+	+	+
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen - Mittelwerte	(+)	+	+	+	+	+	+
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen - Perzentile	(+)	-	+	+	+	+	+
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	(+)	0	0	0	0	0	0
Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage							
KPI ungewichtet	+	+	+	+	+	+	+
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+	+	+	+	+	+	+
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	(+)	0	0	0	0	0	0
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	-	-	-	-	-	-	-
Verkehrsleistung Fahrzeuge	+	+	+	+	+	+	+
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	+	+	+	+	+	+	+
Verkehrsleistung Personen	-	-	-	-	-	-	-
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	-	-	-	-	+	+	+
Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen							
Eignung für Baustellen	-	+	+	+	-	+	+
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	+	+	+	+	+	+	+
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	(+)	-	+	+	+	+	+
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	-	-	-	-	-	-	0
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	-	-	+	+	+	+	+
Eignung für Kurzfristprognose	-	-	-	0	+	+	0
Eignung für Mittelfristprognose	+	-	0	+	+	+	+
Eignung für Maßnahmenprognose	-	-	-	-	0	0	-
Anforderung an die Qualität							
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	+	0	0	+/0	+/0	+/0	+
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeiten (Rohdaten)	-/0*	+	+	+	0/+	+	+
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeitverteilungen	-	0	+	+	0/+	+	+
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	-	+	+	+	0/+	+	+
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	+			+	+	+	+
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	0	+	+	+	0	+	+
Repräsentativität der Stichprobe	+	+	+	+	+	+	+
Aussagen zum Stichprobenumfang	+	+	+	+	+	+	+
(+) Aussage nur eingeschränkt gültig, da direkt aus SDD abgeleitete Fahrtzeitendaten keine ausreichende Qualität aufweisen							
* Die Qualität von Fahrtzeitendaten aus SDD kann über die Detektordichte beeinflusst werden							

Tab. 4-21: Anforderungserfüllung für sechs Ausbaustufen eines hybriden KPI-Systems

	Anforderungserfüllung						
	Stufe 0	Stufe 1.1	Stufe 1.2	Stufe 1.3	Stufe 2.0	Stufe 2.1	Stufe 2.2
Anforderung an die Datenaufbereitung							
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	o	+	o	o	o	o	o
Datenschutzvorgaben erfüllen	+	+	+	+	+	+	o
Weitergehende Anforderungen							
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	-	-	-	-	-	-	+
Erfassung von Quellen und Zielen	-	-	-	-	-	-	+
Erweiterung auf Bundesstraßen	-	+	+	+	-	-	-
Bundesweite Vergleichbarkeit	+/o	+	+	+	o	+	+
(+) Aussage nur eingeschränkt gültig, da direkt aus SDD abgeleitete Fahrzeitendaten keine ausreichende Qualität aufweisen * Die Qualität von Fahrzeitendaten aus SDD kann über die Detektordichte beeinflusst werden							

Tab. 4-21: Fortsetzung

4.9 Empfehlungen für KPI

In den Kapiteln 2.1 bis 2.3 werden verschiedene Kenngrößen zur Beschreibung der Fahrzeit, der Zuverlässigkeit und der Verkehrsnachfrage dargestellt. Um alle relevanten Aspekte der Verkehrs-

ablaufqualität zu berücksichtigen, sollte ein KPI-System die in Tabelle 4-22 dargestellten Kenngrößen ausweisen. Die Kenngrößen sollten nach Pkw und Lkw (bzw. Leicht- und Schwerverkehr) differenziert und mit der Nachfrage gewichtet werden.

KPI	Einheit	Berechnungsvorschrift	Bedeutung
Verkehrsleistung	[Fz•km]	$L_{si} = l_s \cdot q_{si}$	quantifiziert die Verkehrsnachfrage
Verkehrszeitaufwand bei Soll-Geschwindigkeit	[Fz•h]	$T_{si}^{Target} = t_s^{Target} \cdot q_{si}$ $= \underset{i \in I}{MIN} (t_{si}^{P50}) \cdot q_{si}$	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 „Stautunden“ (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
Fahrzeitindex	[-]	$f_{si}^{TTI, P50} = \frac{t_{si}^{P50}}{\underset{i \in I}{MIN} (t_{si}^{P50})}$	beschreibt die bei regelmäßigen Störungen üblicherweise zu erwartende Fahrzeitverlängerung „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 Fahrzeitverlängerung „unplanmäßige Verlustzeit“
$i \in I$ Menge I der Zeiträume i eines Tages, z. B. $I = 96$ bei Zeiträumen der Länge 15 Minuten $s \in S$ Menge S der Strecken (oder Teilstrecken) s eines Streckenzugs S			

Tab. 4-22: Vorschlag für die Auswahl von KPI

KPI	Einheit	Berechnungsvorschrift	Bedeutung
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	[-]	$f_{sl}^{PI,WT} = \frac{\sum_{i \in I} f(t_{si}^{Curr}, t_s^{Target})}{I}$ $f(t_i^{Curr}, t^{Target}) \begin{cases} 1, & \text{wenn } t_i^{Curr} \leq t^{Target} \\ 0, & \text{wenn } t_i^{Curr} > t^{Target} \end{cases}$	beschreibt die Verfügbarkeit der Verkehrsanlagen (Betreibersicht)
$i \in I$ Menge I der Zeiträume i eines Tages, z. B. $I = 96$ bei Zeiträumen der Länge 15 Minuten $s \in S$ Menge S der Strecken (oder Teilstrecken) s eines Streckenzugs S			

Tab. 4-22: Fortsetzung

5 Kosten-Nutzen-Analyse

Im folgenden Kapitel werden die in den Kapiteln 4.1 bis 4.6 entwickelten Konzepte nach ihren Aufwänden und der Anforderungserfüllung in Bezug auf die definierten Anwendungsfälle bewertet. Bei der Betrachtung der KPI steht im Vordergrund, inwieweit die diskutierten Bewertungsverfahren auf dem gesamten Autobahnnetz eingesetzt werden können. Hierbei wird in manchen Fällen auch auf die Erweiterung auf das Netz der Bundesstraßen Bezug genommen.

Für die Bewertung der Aufwände sind für jedes dieser KPI-Konzepte die Kosten abzuschätzen (vgl. Kapitel 5.1.2). Bei den Systemkosten sind zum einen die Datenbeschaffungskosten zu berücksichtigen. Hierbei kann es sich um den kommerziellen Datenerwerb handeln oder aber auch um die Kosten für Aufstellung und Unterhalt von Erfassungsggeräten. Da es sich um sehr große Datenmengen handelt, sind auch die Kosten der Datenspeicherung nicht zu vernachlässigen. Hierbei sind die Kosten von Cloudlösungen bzw. einer Speicherung der Daten in eigenen Serverzentren zu berücksichtigen. Die Kosten für den Aufbau des Systems zur Auswertung der KPI lassen sich in einmalige Systemaufbaukosten, laufende Betriebskosten und wiederkehrende Wartungskosten aufteilen.

Ein Ziel des folgenden Abschnitts ist es, eine übersichtliche tabellarische Darstellung der einzelnen Kostenanteile für jedes KPI-Verfahren zu entwickeln. Dabei wird für alle Kostenkomponenten eine qualifizierte Schätzung aus Sicht der Autoren vorgenommen, welche in vielen Punkten von der Einschätzung des zuständigen Entscheidungsträgers abweichen kann. Vornehmliches Ziel ist daher, die

Durchführung der Kosten-Nutzen-Analyse zu demonstrieren, aber nicht verwendbare Ergebnisse zu liefern.

Bei der Nutzenbewertung (vgl. Kapitel 5.2) steht im Vordergrund, inwieweit die oben diskutierten Einsatzmöglichkeiten (vgl. Kapitel 3) durch das jeweilige KPI-Konzept abgedeckt werden. Der Grad der Anforderungserfüllung wird in Nutzenpunkte übersetzt. Das hierfür entwickelte Bewertungssystem (s. u.) lässt auch eine individuelle Gewichtung der Anforderungen sowie der Anwendungsfälle zu, um Sensitivitätsanalysen durchführen zu können.

Zur Bewertungssynthese wird in Kapitel 5.3 die Ermittlung eines Wirksamkeit-Kosten-Quotienten (WKQ) vorgeschlagen. Hier fließen die aus der Anforderungserfüllung abgeleiteten Nutzenpunkte und die geschätzten annualisierten Kosten ein. Das Ergebnis des WKQ ist als ein Wert zu verstehen, der angibt, wie viele Nutzenpunkte die einzelnen Konzepte pro eingesetzter Kosteneinheit (in Millionen Euro) erreichen. Der WKQ ist im Gegensatz zu einem Nutzen-Kosten-Verhältnis nicht direkt interpretierbar, sondern nur im Vergleich mehrerer Varianten und zur Aufstellung einer Reihenfolge zu verwenden.

Zusätzlich zur Bewertung der einzelnen Datenerfassungsmethoden werden in Kapitel 5.4 die hybriden Systeme, die in Kapitel 4.8 beschrieben werden, bezüglich ihrer Kosten und Nutzen untersucht. Zum Vergleich der hybriden Lösungen wird anstelle der Verwendung des WKQ die Nutzenbewertung in den Vordergrund gestellt, um insbesondere die Zusatznutzen der hybriden Systeme gegenüber der Basislösung der Stufe 0 besser herausarbeiten zu können. Diese Nutzendifferenz soll dann den Mehr-

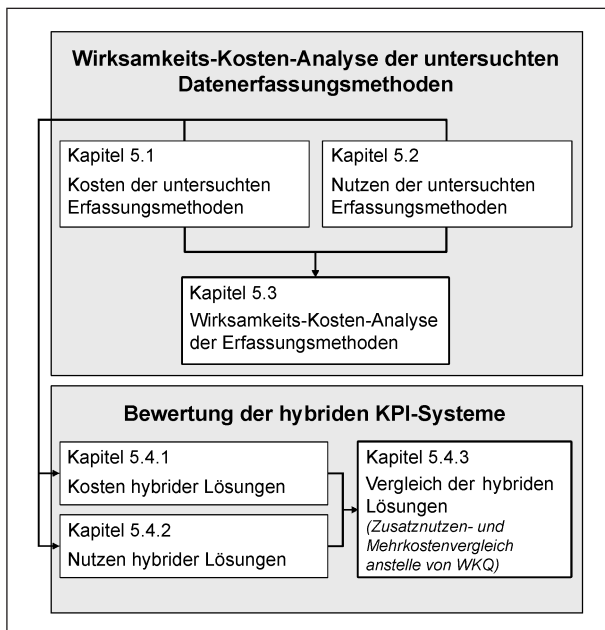


Bild 5-1: Vorgehensweise Kosten-Nutzen-Analyse

kosten der Systeme im Vergleich zur Stufe 0 lediglich gegenübergestellt werden.

Die in diesem Kapitel getroffenen Kostenannahmen wurden in einer Excel-Mappe zusammengestellt und den jeweiligen Nutzen gegenübergestellt. Diese Excel-Mappe (Dateiname: „Bewertungssystem.xlsx“) wurde als Berechnungswerkzeug im Rahmen dieses Arbeitspaketes entwickelt. Mit diesem Werkzeug lassen sich alle von den Autoren getroffenen Annahmen zu Kosten und Nutzen und die Gewichtung in Bezug auf die Anwendungsfelder flexibel anpassen, um verschiedene Szenarien zu berechnen. Da es sich bei den Annahmen gerade in Bezug auf die Kosten um qualifizierte aber vereinfachte Schätzungen handelt, soll der jeweilige Entscheidungsträger für die Durchführung der Kosten-Nutzen-Analyse alle Annahmen prüfen und durch eigene Kostenkalkulationen ersetzen (in den Excel-Tabellen sind die editierbaren Felder gelb markiert). Eine Anleitung zur Anwendung des Berechnungswerkzeuges befindet sich in der Excel-Mappe im Tabellenblatt „Anleitung“.

5.1 Kosten der untersuchten Erfassungsmethoden

Nahezu sämtliche in diesem Kapitel genannten Kosten sind sehr grobe Schätzungen, die weitgehend auf Analogieschlüssen und einer Vielzahl von Annahmen beruhen. Für die unterschiedlichen Techniken existieren wenige bis keine Erfahrungen,

von Versuchen abgesehen, bei denen aber jeweils nur die Funktionsweise der Technik im Mittelpunkt stand.

Bei den KPI-Systemen mit stationärer Datenerfassung dominieren die Baukosten. Unterstellt wird bei der Kostenkalkulation, dass die erforderliche Messtechnik vorhandene Anlagen nutzt (z. B. Brücken, Masten, Schaltkästen, Stromversorgung). Hier besteht allerdings eine hohe Unsicherheit, da Erfahrungen mit verschiedenen Überwachungssystemen zeigen, dass in den meisten Fällen zusätzliche bauliche Anlagen errichtet werden.

Die Errichtung baulicher Anlagen an Autobahnen erfordert einen großen Aufwand, insbesondere für Planung und Absicherung der kurzzeitigen Baumaßnahmen. Dieser Aufwand kann reduziert werden, wenn die Anlagen zur Datenerfassung zusammen mit anderen Baumaßnahmen erstellt werden. Dies würde jedoch die vollständige Inbetriebnahme aller Messquerschnitte, welche Voraussetzung für ein bundesweit einheitliches KPI-System ist, unter Umständen um mehrere Jahre verzögern.

Die geschätzten Kosten für bauliche Anlagen werden deshalb ausgewiesen, aber mit einem Faktor auf Null gesetzt.

Für die Verwendung der Daten externer Anbieter gilt, dass die genannten Kosten aus Standard-Preislisten stammen und nicht aus einem auf diesen Anwendungsfall angepassten Angebot (siehe Kapitel 5.1.2.5).

Die Kosten einer Zentrale werden überwiegend nicht durch den regulären, weitgehend automatisierten Betrieb der Datenauswertung bestimmt. Hier dominieren die Personalkosten einschließlich der Kosten, die mehr oder weniger direkt von der Zahl der Mitarbeiter abhängen. Die Aufgaben des Personals bestehen darin, die Daten so auszuwerten, dass damit sowohl eine Unterstützung der strategischen Planung als auch des operationellen Betriebs stattfinden kann. Welche dies im Einzelnen sind, und welche zusätzlichen Informations- und Servicedienste sich für die Nutzer, für Medien oder die Politik entwickeln werden, ist weitgehend spekulativ.

5.1.1 Angaben zum Autobahnnetz und zur Anzahl der Erhebungsquerschnitte

Die Anzahl der Messquerschnitte bestimmt neben der Qualität auch die Kosten eines KPI-Systems.

Die Mindestanforderung ist, für jede Autobahnstrecke zwischen zwei Knotenpunkten (Anschlussstellen bzw. Autobahnkreuze und -dreiecke) die notwendigen Daten zu erfassen.

Struktur des Autobahnnetzes

Das Autobahnnetz in Deutschland hat eine Länge von ca. 13.000 km. Mit einer Anzahl von 2.600 Autobahnknotenpunkten ergibt sich eine durchschnittliche Autobahnstreckenlänge von 5,0 km. Die Autobahnstreckenlänge variiert in Abhängigkeit der Siedlungsdichte und damit auch zwischen den Bundesländern (Tabelle 5-1).

Messquerschnitte für stationäre Erfassungsmethoden

Messquerschnitte, an denen (nur) die Menge der Fahrzeuge gemessen wird, sind erforderlich in der Anzahl der Teilstrecken, die eine gleiche Verkehrsstärke aufweisen. In einigen Fällen wird man die beiden Fahrtrichtungen nicht am gleichen Ort, sondern in einem größeren Abstand zueinander messen. Möglicherweise wird man auch aus systemati-

schen Gründen versuchen, in Fahrtrichtung immer möglichst nahe vor oder hinter einem Knotenpunkt zu messen. Dies kann den erforderlichen baulichen Aufwand deutlich erhöhen.

Bei Erhebungsmethoden, bei denen die Fahrzeuge an mehreren Messquerschnitten so identifiziert werden, dass eine Zuordnung erfolgen kann (Kennzeichenerfassung oder Bluetooth), ist es nicht erforderlich, für die Rampen der Autobahnknotenpunkte eigene Erhebungsquerschnitte vorzusehen. Die Belastungen und Fahrzeiten können durch den Abgleich der Erhebungsquerschnitte, die an die Autobahnknotenpunkte angrenzen, rechnerisch ermittelt werden.

An einem Messquerschnitt, für den hier die Kosten ausgewiesen werden, wird der Verkehr für beide Richtungen gemessen. Dieser wird bei diesen Messtechniken in einer Vielzahl von Fällen aus zwei baulich getrennten Anlagen bestehen.

Anders ist dies bei einer Erfassung über Schleifen: Nur wenn Schleifen auch in die Rampen gelegt werden, ist es möglich, Aussagen über die Zahl der aus- und einfahrenden Fahrzeuge (und nicht nur über die Differenz) an den Anschlussstellen zu tref-

Bundesland	Länge des Autobahnnetzes [km]	Anzahl der Autobahnknotenpunkte	Durchschnittliche Autobahnstreckenlänge [km]
Baden-Württemberg	1.054	171	6,2
Bayern	2.515	466	5,4
Berlin	77	52	1,5
Brandenburg	806	118	6,8
Bremen	80	28	2,9
Hamburg	81	37	2,2
Hessen	984	213	4,6
Mecklenburg-Vorpommern	578	62	9,3
Niedersachsen	1.444	286	5,0
Nordrhein-Westfalen	2.224	581	3,8
Rheinland-Pfalz	877	176	5,0
Saarland	240	79	3,0
Sachsen	567	91	6,2
Sachsen-Anhalt	416	64	6,5
Schleswig-Holstein	545	109	5,0
Thüringen	521	72	7,2
Deutschland	13.009	2.605	5,0

Quelle: <https://www.statistikportal.de/de/transport-und-verkehr/ueberoertlicher-verkehr>, Abruf am 31.05.2019
BASt Autobahnverzeichnis 2016

Tab. 5-1: Autobahnnetz in den Bundesländern

fen sowie über die Zahl der Abbiegevorgänge an Autobahnkreuzen und Autobahndreiecken. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn man die Daten nutzen möchte, um mit Hilfe eines Verkehrsmodells die Routen zu bestimmen.

Bei dieser Methode wird man die Erhebungsquerschnitte nicht an einer geeigneten Stelle (bezüglich nutzbarer Stromversorgungs- und Kommunikationsinfrastruktur) zwischen zwei Knotenpunkten positionieren, sondern ist mehr oder weniger gezwungen, alle Rampen eines Knotenpunktes mit Schleifen auszustatten. Bei einem vierarmigen Knotenpunkt sind daher normalerweise 12 richtungsbezogene Messquerschnitte erforderlich. Vor Ort werden viele in enger räumlicher Nähe liegen und eine Einheit bilden (Zusammenführung in einem Schaltkasten), dennoch ist davon auszugehen, dass erheblich mehr Punkte mit Anlagen zur Stromversorgung und Datenübermittlung ausgestattet werden müssen.

An einem Messquerschnitt, für den hier Kosten ausgewiesen werden, werden die Abbiegebeziehungen eines Knotenpunktes mit bis zu 12 baulich getrennten Anlagen gemessen.

Erforderliche Anzahl Messquerschnitte

Zur Festlegung der Anzahl der Erhebungsquerschnitte für ein KPI-System gibt es unterschiedliche Kriterien:

- Es soll in jedem Abschnitt des Autobahnnetzes ein Erhebungsquerschnitt liegen. Daraus ergibt sich eine Zahl von etwa 2.600 Messquerschnitten. Die gleiche Zahl ergibt sich, wenn man die Abbieger an den Knotenpunkten mit Schleifen erfasst.
- Der Abstand zwischen zwei Querschnitten soll – im Mittel – nicht mehr als 5 km betragen. Lange Abschnitte sind entsprechend zu teilen. Daraus ergeben sich schätzungsweise etwa zusätzliche 250 Messquerschnitte. Bei einer Schleifendetektion sind stattdessen an neuralgischen Punkten (Änderungen im Querschnitt) zusätzliche Detektoren auf der Hauptfahrbahn sinnvoll.
- Wenn man einige der Autobahnraststätten (ca. 390) als Knotenpunkte berücksichtigt, erhöht dies ebenfalls die Zahl der Erfassungsquerschnitte. Ein Teil der dadurch erfolgenden Teilungen ist bereits im oben genannten Punkt enthalten.

Für unsere Betrachtung wird im Folgenden von 3.000 Messquerschnitten ausgegangen.

Netzelemente für KPI

Die Zahl der Messquerschnitte und die Zahl der Netzelemente, für die KPI ermittelt werden, werden sich unterscheiden. Einerseits wird man KPI immer richtungsbezogen auswerten. Andererseits erscheint es sinnvoll, KPI auch für solche Abschnitte getrennt zu betrachten, die zwar eine einheitliche Verkehrsstärke, jedoch Unterschiede im Querschnitt aufweisen. Für längere besondere Netzelemente wie Brücken und Tunnel kann es ebenfalls nützlich sein, KPI gesondert auszuweisen. Gleiches gilt für Autobahnstrecken mit starken Wechseln im Höhenprofil (Steigung und Gefälle) sowie für längere Rampen an Autobahnkreuzen und Autobahndreiecken. Die abweichenden Belastungen dieser Elemente kann man rechnerisch bestimmen.

Bei der Verwendung von FPD und FCD wird man die entsprechenden Informationen auf die Netzelemente beziehen. Hier besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Netzelemente beliebig zu splitten und ein sehr feines Raster zu definieren. Sinnvoll erscheint es, auch Parkplätze und Autobahnraststätten als separate Netzelemente zu definieren, um zu vermeiden, dass Pausen auf Parkplätzen und Raststätten als Stau interpretiert werden. Spezifische Aussagen zu diesen Elementen (z. B. Aufenthaltsdauer) sind dann ergänzend möglich.

Unterschiedliche Dimensionierung in Abhängigkeit des KPI-Systems

Um einen sinnvollen Vergleich zu ermöglichen, berücksichtigt die nachfolgende Kostenkalkulation nicht, dass man – je nach Erhebungsmethode – das KPI-System unterschiedlich dimensionieren würde. Im Falle einer Umsetzung würde man aber voraussichtlich genau dies tun, um die spezifischen Vorteile auszunutzen und das Nutzen-Kosten-Verhältnis zu optimieren. Auch hybride Systeme bleiben zunächst unbeachtet. Die Überlegungen hierzu sind dennoch entscheidungsrelevant.

- Ein KPI-System mit einer Kennzeichenerfassung mit Kameras (ANPR) entfaltet seine Vorteile vor allem in engmaschigen Teilnetzen mit hohen Belastungen und häufigen Störungen, auf die mit betrieblichen Maßnahmen reagiert werden kann. Ein solches System erscheint in dünn

besiedelten Regionen und für Autobahnen mit seltenen Störungen zu teuer. In den Ballungsräumen ist es hingegen sinnvoll, auch die hochbelasteten, mehrstreifigen Straßen des untergeordneten Netzes einzubeziehen, die mit dem Autobahnnetz in Wechselwirkung stehen. Gegen eine generelle Ausweitung auf Bundesstraßen spricht neben den hohen Kosten auch der zu erwartende Widerstand von Bürgern und Kommunen gegen die Optik der Brücken.

- Bei der Datenerfassung mittels Bluetooth können die einzelnen Messstellen mit geringerem Aufwand erstellt werden und sind daher entsprechend kostengünstiger. Die Informationsqualität ist dagegen deutlich geringer als bei einer Kennzeichenerfassung, weil nur eine Teilmenge des Verkehrs erfasst wird. Durch ein wesentlich dichteres Messstellennetz, das auch große Teile des Bundesstraßennetzes einbeziehen sollte, ergibt sich ebenfalls ein sinnvolles KPI-System.
- Bei der Datenerfassung mittels Schleifen ist es sinnvoll, vor allem auch die Vielzahl von Schleifen und Infrarot-Detektoren an bestehenden Lichtsignalanlagen (LSA) im untergeordneten Netz einzubeziehen, die noch nicht an eine Verkehrsleitzentrale angebunden sind. Der Vorteil ergibt sich vor allem durch die bi-direktionale Kommunikation zwischen den LSA und der Zentrale. Ein solches System führt zu regionalen Verkehrsleitzentralen (in Ergänzung zu schon bestehenden Verkehrsleitzentralen in den Ballungsräumen), in denen die operativen Maßnahmen durchgeführt werden. Der Informationsfluss von aggregierten Daten erfolgt von den regionalen Verkehrsleitzentralen zur Zentrale.
- Bei der Verwendung von FPD und FCD entstehen auf der Ebene der Datenerfassung beim Verkehrsteilnehmenden und bei der Übermittlung in die Zentrale keine höheren Aufwendungen, wenn das System auf Bundesstraßen und andere Straßen ausgeweitet wird. Ein höherer Aufwand entsteht lediglich in der Zentrale bei der (automatisierten) Auswertung der Daten. Der Informationsfluss über Störungen erfolgt von der Zentrale in regionale Verkehrsleitstellen, die die operativen Maßnahmen durchführen.
- Der hohe Aufwand, der bei einem ANPR-System für die Installation der Kameras erforderlich ist, scheint nur dann gerechtfertigt, wenn man an den Messquerschnitten zugleich weitere aktuelle Daten erfasst. Dies können meteorologische

Daten (Niederschlagsart, Niederschlagshöhe, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Sichtweite, Helligkeit, Temperatur in Bodenhöhe, Temperatur der Fahrbahn, Nässe der Fahrbahn) und Umweltdaten (Schadstoffe, Lärm) sein. Bei der Wahl dieser Technik ist es daher naheliegend, einen großen Teil der Messquerschnitte zu einem multifunktionalen Informations- und Datenpunkt auszubauen, an dem auch die Anzeige von Warnungen, Störungen, Umleitungsempfehlungen und Fahrtzeiten stattfindet.

5.1.2 Kosten der untersuchten Datenerfassungssysteme

Unabhängig vom Datenerfassungssystem müssen die Softwarelizenz- und die Systementwicklungskosten, die bei der Errichtung eines KPI-Systems anfallen, berücksichtigt werden. Diese Kosten werden am Beispiel der auch für die Entwicklung des Prototyps verwendeten Software PTV Optima (Traffic Supervisor) geschätzt. Neben den jährlichen Kosten (Software-Lizenzkosten: ca. 100.000 EUR; Kosten für Hardware: ca. 5.000 EUR; jährliche Kartenupdates inkl. Aufwand für Map-Matching: ca. 10.000 EUR), müssen hierbei auch initiale Kosten für die Systemeinrichtung (ca. 50.000 EUR) angesetzt werden. Im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren würden sich so Kosten in Höhe von 1.200.000 EUR ergeben. Zur Vereinfachung werden im ersten Schritt für alle im Folgenden betrachteten Systeme die gleichen Kosten angesetzt, auch wenn sich aufgrund der Datenerhebungstechnik und des Anwendungsfalls auch Unterschiede in der Einrichtung und Pflege eines solchen Systems ergeben können.

5.1.2.1 Kosten für ein KPI-System basierend auf ANPR-Daten

Annahmen zur Technik

In einem Querschnitt werden beide Richtungen erfasst.

Die Kameras werden auf speziellen Brücken montiert, die alle Fahrstreifen überspannen. Diese Brücken müssen auch (im Gegensatz zu den meisten Schilderbrücken) für Wartungsarbeiten begehbar sein.

Für alle Fahrstreifen einschließlich Standstreifen ist eine separate Kamera erforderlich. Im Durchschnitt wird von 7 Kameras ausgegangen. Die Kameras

müssen witterungsgeschützt sein und (über Infrarottechnik) auch Aufnahmen bei Dunkelheit ermöglichen.

Vor Ort erfolgt eine Aufbereitung der Daten. Über eine Bildauswertungssoftware werden die Kennzeichen aus den Kamerabildern ausgelesen und verschlüsselt.

Der Strombedarf jedes Messquerschnitts macht im Normalfall eine Anbindung an das Strom- und Datennetz durch Kabel erforderlich.

Annahmen zu den Kosten eines Querschnitts

Alle Kosten enthalten auch die Kosten für Montage, Absicherung usw.; Planungskosten werden als Anteil der Gesamtkosten auf diese aufgeschlagen.

Die Kosten für Bauwerke (Brücken) werden ausgewiesen, aber nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass in allen Abschnitten solche Brücken bereits vorhanden und für ein solches System nutzbar sind. Durch Veränderung des Faktors „Relevanz“ kann diese Annahme verändert werden (siehe Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Kosten“, vgl. Kapitel 5.1.3).

Die Kosten für die Anbindung an das Strom- und Datennetz werden ausgewiesen, aber nur zu 50 % berücksichtigt. Dahinter steht die Annahme, dass entweder nur eine Erweiterung erforderlich ist oder nur für ein Teil der Querschnitte eine neue Kabelanbindung geschaffen werden muss. Speziell bei den Kosten für die Energie- und Datenanbindung ist von einer sehr großen Streuung der Kosten auszugehen.

Basis der Kostenschätzung

Die Kosten für einen ANPR-Messquerschnitt lassen sich aus der „Section-Control“-Geschwindigkeitsüberwachung ableiten. Ein solches System wurde auf der B6 südlich von Hannover zwischen Laatzen und Gleidingen für eine Fahrtrichtung installiert. Die B6 hat dort 2 Fahrstreifen je Richtung. In Presseartikeln (Neue Presse vom 20.12.2018⁸) wurden Gesamtkosten von 450.000 EUR angegeben. Per Gerichtsbeschluss wurde dieser Probetrieb zur Ge-

schwindigkeitsüberwachung im März 2019 durch das Verwaltungsgericht Hannover verboten (Aktenzeichen 7 B 859/19). Hersteller der Anlage war die Firma Jenoptik aus Jena, die diese Technik vorwiegend in anderen europäischen Ländern vertreibt. Für eine ANPR-Messung, die nicht der Geschwindigkeitsüberwachung dient, ist die Erstellung eines hochauflösenden Fotos des Fahrers nicht erforderlich. Dies reduziert den Aufwand. Dennoch ist von durchschnittlichen Gesamtkosten von mindestens 200.000 EUR je Querschnitt (2 Richtungen, durchschnittlich zusammen 5 Fahrstreifen) auszugehen.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

Es wird davon ausgegangen, dass eine Zentrale mit ca. 20 Mitarbeitern erforderlich ist, um die Anlagen zu steuern, die Daten auszuwerten und darauf aufbauende Analysen zu erstellen. Die jährlichen Personalkosten je Mitarbeiter (Vollzeitäquivalent) werden mit 75.000 € angesetzt. Als Referenzwert wurde ein entsprechender Betrag von 71.000 € für den Landesbetrieb IT des Landes Baden-Württemberg für das Jahr 2017 ermittelt. (Vorheft des Staatshaushaltsplans BW 2018/2019). Hier wird eine vergleichbare Mitarbeiterstruktur vermutet.

Baukosten (oder Miete) für Gebäude, die Ausstattung der Arbeitsplätze, Sachkosten usw. ergeben sich durch Annahmen über den Flächenbedarf und die Sachmittelausstattung pro Mitarbeiter. Die Kosten für Standard-Bürogebäude betragen in Deutschland derzeit ca. 30.000 € je Arbeitsplatz (Erfahrungswert) ohne Grundstückskosten. Wegen des überdurchschnittlichen Technik-Aufwandes wird von Gebäudebaukosten von 50.000 € je Mitarbeiter ausgegangen. Für die kalkulatorischen jährlichen Kosten ist es nicht entscheidend, ob von einem Neubau, einem Bestandgebäude oder einer Anmietung ausgegangen wird. Für die gesamte Arbeitsplatzausstattung inkl. Dienstfahrzeugen wird nochmals von 50.000 € je Mitarbeiter ausgegangen. Die Kosten für die Datenverarbeitung sind abhängig vom Umfang der Daten, die in der Zentrale verarbeitet werden. Die Verarbeitung der Daten erfolgt in einem Rechenzentrum, das über Schutzeinrichtungen (Zugangskontrolle, unterbrechungsfreie Stromversorgung, Brandschutz) verfügen muss, die dem Schutzbedarf der Daten entsprechen. Für das ANPR-System wird hier ein mittlerer Aufwand unterstellt, weil viele Verarbeitungsschritte bereits dezentral an den Messquerschnitten erfolgen. Die Erstellungskosten für das Rechenzentrum werden mit

⁸ <https://www.neuepresse.de/Hannover/Meine-Stadt/Laatzen-Section-Control-ab-sofort-scharf>

500.000 € veranschlagt. Die Betriebskosten (Lizenzkosten, Strom, Kühlung, Wartung, Archivierung) werden mit jährlich 25 % der einmaligen Investitionskosten kalkuliert (Erfahrungen und Schätzung auf der Basis von diversen Presseartikeln).

(siehe Kapitel 5.1.2) wird annualisiert und mit jährlichen Kosten von 120.000 € berücksichtigt. Der größte Baustein davon sind angenommene jährliche Lizenzkosten von 100.000 € (Tabelle 5-2).

Die Kosten für ein den Erfordernissen angepasstes Datenerfassungssystem zur Berechnung der KPI

Kosten für ein KPI-System basierend auf ANPR-Daten	
Anzahl Messquerschnitte	3.000
Kosten für die Verkehrsdatenerfassungseinrichtung <u>eines</u> Messquerschnitts	
Investitionskosten Datenerfassungseinrichtungen (ANPR)	
Planungskosten (20 %)	15.600 EUR
Baukosten (Brücke), nicht relevant	(100.000 EUR)
Kameras	50.000 EUR
Energieversorgung, Kommunikationssystem, relevanter Anteil zusätzlich: aber nicht relevant	25.000 EUR (25.000 EUR)
Dezentrale Datenaufbereitung, Interface-Modul, Software	3.000 EUR
Summe Investitionskosten (nur relevante Anlagenteile)	93.600 EUR
Jährliche Kosten (nur für relevante Anlagenteile)	
Abschreibung der Investitionskosten	14.660 EUR
Betrieb-, Unterhalts- und Wartungskosten	19.000 EUR
Summe jährliche Kosten	33.660 EUR
Kosten für <u>alle</u> Messquerschnitte	
Investitionskosten	280.800.000 EUR
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen (gerundet auf 100.000)	101.000.000 EUR
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	500.000 EUR
Baukosten (Bürogebäude für 20 Planstellen)	1.000.000 EUR
Technische Ausstattung (inkl. Arbeitsplätze)	1.000.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	500.000 EUR
Dateneinkauf	0 EUR
Summe Investitionskosten	3.000.000 EUR
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten (20 Planstellen)	1.500.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	150.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung über 10 Jahre	300.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	125.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	2.200.000 EUR
Gesamtkosten des Systems (Messtellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>283.800.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>103.200.000 EUR</u>

Tab. 5-2: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf ANPR-Daten

5.1.2.2 Kosten für ein KPI-System basierend auf Bluetooth-Daten (BT)

Annahmen zur Technik

In einem Querschnitt werden in der erforderlichen Anzahl sogenannte Bluetooth-Beacons installiert. Diese Sender aktivieren die Bluetooth-Funktion bei Geräten, die in die Reichweite des Senders kommen. Die Anzahl der erforderlichen Sender/Sensoren hängt von der örtlichen Situation ab.

Die Sender/Sensoren werden an vorhandenen Masten oder Ähnlichem in der Nähe der Fahrbahn installiert. Es wird analog zum ANPR-System angenommen, dass keine Baukosten für die Trägerstruktur entstehen, was bei dieser Technik als weitgehend realistisch anzusehen ist. Vor Ort erfolgt eine Aufbereitung der Daten (Verschlüsselung).

Der Strombedarf jedes Messquerschnitts ist gering. Dies macht auch eine Stromversorgung über Solarpaneele möglich. Die Datenübermittlung kann über das Mobilfunknetz erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass in der Hälfte der Fälle auf eine vorhandene Strom- und Datenverbindung zurückgegriffen werden kann. Es wird jeweils die örtlich günstigste Lösung realisiert.

Annahmen zu den Kosten eines Querschnitts

Alle Kosten enthalten auch die Kosten für Montage, Absicherung usw.; Planungskosten werden als Anteil der Gesamtkosten auf diese aufgeschlagen.

Die Kosten für Bauwerke (Masten) werden ausgewiesen, aber nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass in allen Abschnitten solche Masten bereits vorhanden und für ein solches System nutzbar sind. Durch Veränderung des Faktors

„Relevanz“ kann diese Annahme verändert werden (siehe Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Kosten“, vgl. Kapitel 5.1.3).

Die Kosten für die Anbindung an das Strom- und Datennetz werden ausgewiesen, aber nur zu 50 % berücksichtigt. Dahinter steht die Annahme, dass für einen Teil der Querschnitte eine nutzbare Kabelanbindung bereits vorhanden ist.

Annahme zur Anzahl der Querschnitte

Der Einsatz der Bluetooth-Technik ist nur sinnvoll, wenn man den Nachteil der Technik im Vergleich mit ANPR (geringe Erfassungsquote) durch den Vorteil der geringeren Kosten je Querschnitt kompensiert. Angenommen wird, dass auf dem Autobahnnetz mit einem durchschnittlichen Abstand von 1 km ein Messquerschnitt errichtet wird (ca. 13.000 Querschnitte). An Knotenpunkten sind zusätzliche Querschnitte erforderlich (ca. 2.000). Es werden hauptsächlich bereits vorhandene Masten und Brücken verwendet. Durch das dichte Netz der Sensoren wäre ein zeitweiliger Ausfall eines Standortes leichter verkraftbar.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

Siehe Kapitel 5.1.2.1!

Im Unterschied zum ANPR-System müssen wegen der größeren Zahl von Querschnitten in der Zentrale auch deutlich größere Datenmengen verarbeitet werden. Der Aufwand erhöht sich auch, weil die Daten ohne Richtungsbezug erfasst werden. Im Vergleich mit ANPR wird ein um 50 % höherer Aufwand erwartet. Dieser wird bei der Anzahl der Personalstellen und allen davon abhängigen Kosten berücksichtigt.

Kosten für ein KPI-System basierend auf Bluetooth-Daten (BT)	
Anzahl Standorte	15.000
Kosten für die Verkehrsdatenerfassungseinrichtung <u>eines</u> Standortes	
Investitionskosten Datenerfassungseinrichtungen (Bluetooth)	
Planungskosten (20 %)	2.000 EUR
Baukosten (Masten)	(10.000 EUR)
Sensoren	5.000 EUR
Energieversorgung, Kommunikationssystem, relevante Anlagenteile	5.000 EUR
zusätzlich: nicht relevante Anlagenteile	(5.000 EUR)
Dezentrale Datenaufbereitung, Interface-Modul, Software	-
Summe Investitionskosten (nur relevante Anlagenteile)	12.000 EUR

Tab. 5-3: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf Bluetooth-Daten (BT)

Kosten für ein KPI-System basierend auf Bluetooth-Daten (BT)	
Jährliche Kosten	
Abschreibung der Investitionskosten	1.700 EUR
Betrieb-, Unterhalts- und Wartungskosten	2.000 EUR
Summe jährliche Kosten	3.700 EUR
Kosten für <u>alle</u> Standorte	
Investitionskosten (nur relevante Anlagenteile)	180.000.000 EUR
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	55.500.000 EUR
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	760.000 EUR
Baukosten (Bürogebäude für 30 Planstellen)	1.500.000 EUR
Technische Ausstattung (inkl. Arbeitsplätze)	1.500.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	800.000 EUR
Dateneinkauf	0 EUR
Summe Investitionskosten	4.600.000 EUR
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten (30 Planstellen)	2.250.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	225.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibungen über 10 Jahre	460.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	200.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	3.500.000 EUR
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>184.600.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>58.800.000 EUR</u>

Tab. 5-3: Fortsetzung

5.1.2.3 Kosten für ein KPI-System basierend auf stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung

Annahmen zur Technik

In einem Querschnitt bzw. Knotenpunkt werden alle Abbiegebeziehungen mit Schleifendetektoren erfasst. Durch diese Feinauflösung aller Messquerschnitte sind deutlich mehr Punkte mit Strom und Datenkommunikation auszustatten. Bei langen Abschnitten (> 5 km) werden zusätzliche Schleifen vorgesehen. In der Summe ergibt sich die gleiche Zahl von angenommenen Messquerschnitten.

Baukosten für eine Trägerstruktur (Brücken oder Masten) fallen nicht an. Baukosten entstehen durch die Fräsarbeiten an der Fahrbahn.

Vor Ort müssen die Daten nur gesammelt weitergeleitet werden. Verschlüsselungsverfahren o. ä. sind nicht erforderlich.

Der Strombedarf jedes Messquerschnitts ist gering. Dies macht eine Stromversorgung über Solarpaneele möglich. Die Datenübermittlung kann über das Mobilfunknetz erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass in der Hälfte der Fälle auf eine vorhandene Strom- und Datenverbindung zurückgegriffen werden kann. Es wird jeweils die örtlich günstigste Lösung realisiert.

Annahme zur Anzahl der Querschnitte

Es existieren bereits an sehr vielen Autobahnknotenpunkten Schleifen zur Erfassung der Verkehrs-

Kosten für ein KPI-System basierend auf stat. Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung	
Anzahl zusätzliche Standorte	10.000
Kosten für die Verkehrsdatenerfassungseinrichtung <u>eines</u> Standortes	
Investitionskosten Datenerfassungseinrichtungen (ANPR)	
Planungskosten (20 %)	5.600 EUR
Baukosten (Belagsarbeiten)	(4.000 EUR)
Sensoren	16.000 EUR
Energieversorgung, Kommunikationssystem, relevanter Anteil	10.000 EUR
zusätzlich: nicht relevanter Anteil	(10.000 EUR)
Dezentrale Datenaufbereitung, Interface-Modul, Software	2.000 EUR
Summe Investitionskosten (nur relevante Anlagenteile)	33.600 EUR
Jährliche Kosten (relevante Anlagenteile)	
Abschreibung der Investitionskosten	5.160 EUR
Betrieb-, Unterhalts- und Wartungskosten	6.800 EUR
Summe jährliche Kosten	11.960 EUR
Kosten für <u>alle</u> Standorte	
Investitionskosten (nur relevante Anlagenteile)	336.000.000 EUR
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	119.600.000 EUR
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	260.000 EUR
Baukosten (Bürogebäude für 10 Planstellen)	500.000 EUR
Technische Ausstattung (inkl. Arbeitsplätze)	500.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	300.000 EUR
Dateneinkauf	0 EUR
Summe Investitionskosten	1.600.000 EUR
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten (10 Planstellen)	750.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	75.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	160.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	75.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	1.200.000 EUR
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>337.600.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>120.800.000 EUR</u>

Tab. 5-4: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung

stärken. Ein Ausbau für alle Knotenpunkten ist unabhängig von diesem Projekt geplant und daher als „Nullfall“ anzusehen.

Um mit dieser Technik KPI zu ermitteln, die über die Bestimmung der Verkehrsstärken hinausgehen, ist eine deutlich größere Zahl von Messquerschnitten erforderlich. Angenommen wird, dass auf dem Au-

tobahnnetz mit einem durchschnittlichen Abstand von 1 km ein Messquerschnitt errichtet wird (ca. 13.000 Querschnitte). Unter der Annahme, dass davon bereits ca. 3.000 bestehen oder unabhängig von diesem Projekt geplant sind, ergibt sich ein Bedarf an 10.000 zusätzlichen Querschnitten. An jeden Messquerschnitt sind Schleifendetektoren für alle Fahrbahnen in beiden Richtungen erforderlich.

Annahmen zu den Kosten eines Querschnitts

Alle Kosten enthalten auch die Kosten für Montage, Absicherung usw. Planungskosten werden als Anteil der Gesamtkosten auf diese aufgeschlagen.

Die Kosten für Bauwerke (Fräsen der Fahrbahn) werden ausgewiesen, aber nicht berücksichtigt. Durch Veränderung des Faktors „Relevanz“ kann diese Annahme verändert werden (siehe Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Kosten“, vgl. Kapitel 5.1.3).

Die Kosten für die Anbindung an das Strom- und Datennetz werden ausgewiesen, aber nur zu 50 % berücksichtigt. Dahinter steht die Annahme, dass nur für einen Teil der Querschnitte eine neue Kabelanbindung geschaffen werden muss.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

Siehe Kapitel 5.1.2.1!

Im Unterschied zu den vorgenannten Systemen müssen in der Zentrale geringere Datenmengen erfasst werden. Im Vergleich mit der ANPR-Technik sind schätzungsweise nur halb so viele Planstellen erforderlich. Die Kosten für die Zentrale reduzieren sich entsprechend dem geringeren Personalbedarf.

5.1.2.4 Kosten für ein KPI-System basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)

Wie in Kapitel 2.4.3.1 beschrieben, werden bei dieser Technik Reisezeiten aus der Bewegung von Mobilfunkgeräten abgeleitet. Hierfür wird der Wechsel eines Geräts in eine andere Mobilfunkzelle bzw. in einen anderen Mobilfunkzellenverbund (Location Area) als Bewegung interpretiert. Um nun aus einer Sequenz von Funkzellenwechseln eine Reisezeit auf einer angenommenen Route ableiten zu können, müssen die zu verwendenden Floating Phone Daten also die tatsächlichen Funkzellenwechsel auf Ebene einzelner Geräte beinhalten. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens (Stand: September 2019) gibt es in Deutschland keinen Anbieter eines Datenprodukts, das diese Anforderungen erfüllt.

Insbesondere aufgrund der Bestimmungen des Datenschutzes ist zu erwarten, dass die Mobilfunkdatenanbieter auch in Zukunft solche personenbeziehbaren Daten nicht in dem beschriebenen Rohzustand anbieten werden. Es ist vielmehr davon

auszugehen, dass die erste Stufe der Rohdatenverarbeitung von den Mobilfunkbetreibern selbst vorgenommen werden wird, um Datenprodukte zu erzeugen, die datenschutzkonform sind und auf dem deutschen Markt angeboten werden dürfen. Für einige anders gelagerte Anwendungsfälle haben manche Anbieter⁹ bereits entsprechende Produkte aus ihren Rohdaten entwickelt.

Für die Kostenschätzung für Mobilfunkdaten wird deshalb analog zu FCD (vgl. Kapitel 5.1.2.5) davon ausgegangen, dass für die Erstellung eines KPI-Systems auf Basis von FPD, Nutzungslizenzen von Datenanbietern gekauft werden müssen. Die Aufwände für die Aufbereitung der Daten sind also entsprechend gering anzusetzen, da – wie auch bei FCD – keine Verarbeitung von Rohdaten nötig ist. Neben den Anschaffungskosten der Datenlizenzen und den Kosten für die Zentrale (siehe Kapitel 5.1.2.1) werden lediglich Kosten für die Speicherung, Verarbeitung und Analyse der gelieferten Daten angesetzt.

Aufgrund der oben genannten fehlenden Informationen für FPD und aufgrund der Vergleichbarkeit zu FCD bei Vorgehensweise und Datennutzung, werden die gleichen Kosten angesetzt, wie bei FCD.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

Siehe Kapitel 5.1.2.1!

Im Unterschied zu den vorgenannten Systemen müssen in der Zentrale sehr große Datenmengen erfasst werden. Da in der Zentrale keine Betreuung stationärer Anlagen erforderlich ist, sind in der Zentrale nur schätzungsweise 10 Planstellen erforderlich. Die Kosten der Zentrale bestimmen sich durch den (geringeren) Personalbedarf und die (größeren) Datenmengen.

Annahmen zu den Kosten der FPD-Daten

Die Kosten für die FPD-Daten werden bei einer Vertragslaufzeit von 10 Jahren mit 10 Mio. Euro angenommen.

⁹ z. B. Telefonica NEXT (<https://next.telefonica.de/loesungen/transport-analytics>), Stand: 2.9.2019 oder Motionlogic (<https://www.motionlogic.de/blog/de/loesungen/>), Stand: 2.9.2019

Kosten für ein KPI-System basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)	
Anzahl Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für <u>alle</u> Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	
<hr/>	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	2.500.000 EUR
Bürogebäude (für 10 Planstellen)	500.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	500.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	1.500.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	10.000.000 EUR
Summe Investitionskosten	15.000.000 EUR
<hr/>	
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	750.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	75.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	1.500.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	375.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	2.800.000 EUR
<hr/>	
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>15.000.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>2.800.000 EUR</u>

Tab. 5-5: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)

5.1.2.5 Kosten für ein KPI-System basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)

Für die Schätzung der Kosten für FCD werden die den Autoren derzeit zur Verfügung stehenden Preislisten der drei Anbieter HERE, INRIX und TomTom verwendet. Wegen Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Datenanbietern dürfen die Preiskalkulationen nicht offengelegt werden. Die Preisberechnung für die Lizenzierung von Echtzeitdaten basiert je nach Anbieter entweder auf der Einwohnerzahl in einem Gebiet oder der Länge des abgefragten Streckennetzes. Da die Standard-Preislisten den hier beschriebenen Anwendungsfall in der Regel nicht in allen Aspekten abdecken, mussten einige Preise geschätzt bzw. an manchen Stellen extrapoliert werden (z. B. Fortschreibung der Preisfaktoren zur Berechnung der Bevölkerungsklassen oder der Vertragslaufzeit).

Folgende Annahmen wurden für die Preisberechnung getroffen:

- Inhalt: Echtzeit-Geschwindigkeitsdaten,
- Gebiet mit einer Bevölkerung von ca. 82 Mio.,
- Streckennetzlänge: 13.000 km (richtungsgetrennt 26.000 km),
- Aktualisierungsfrequenz der Echtzeitdaten: 1 Minute,
- Lizenz umfasst nicht die Anzeige der Daten im Internet,
- Jährlicher Preis für eine Vertragslaufzeit von 10 Jahren.

Auf Basis dieser Annahmen liegen die Preise je nach Anbieter und Berechnungsmethode zwischen 200.000 EUR und 2.800.000 EUR pro Jahr. Diese Preise repräsentieren einen von den Anbietern empfohlenen Marktpreis. Erfahrungsgemäß bieten die Datenanbieter in der Regel Sonderangebote für große Projekte an. Die Preise sind also volatil und die berechneten Preisspannen können nur als Indi-

kator gelten. Für die Kosten im Methodenvergleich wird ein Preis von 1.000.000 EUR pro Jahr angenommen.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

Siehe Kapitel 5.1.2.1!

Wie bei einem KPI-System, das auf Floating Phone Daten basiert, müssen in der Zentrale sehr große Datenmengen erfasst werden. Da in der Zentrale keine Betreuung stationärer Anlagen erforderlich ist, sind in der Zentrale nur schätzungsweise 10 Planstellen erforderlich. Für Kosten der Zentrale bestimmen sich durch den (geringeren) Personalbedarf und die (größeren) Datenmengen.

Annahmen zu den Kosten der FCD-Daten

Die Kosten für die FCD-Daten werden bei einer Vertragslaufzeit von 10 Jahren mit 10 Mio. Euro angenommen.

5.1.3 Zusammenstellung der Kosten

Die Kosten, die in den Tabellen 5-2 bis 5-6 enthalten sind, wurden in der Excel-Mappe Bewertungssystem.xlsx zusammengestellt und berechnet (siehe Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Kosten“). Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei vielen Annahmen gerade in Bezug auf die Kosten um qualifizierte, aber vereinfachte Schätzungen. Alle Werte sollen vom zuständigen Entscheidungsträger geprüft und auf Basis eigener Kostenkalkulationen angepasst werden. In der Tabelle sind die editierbaren Felder gelb markiert. Werte in blauer Schrift wurden auf volle 100.000 EUR gerundet.

5.2 Nutzen der untersuchten Erfassungsmethoden

In den Tabellen des Kapitels 4 werden die Grade, mit denen durch die verschiedenen Erfassungsmethoden die Anforderungen der betrachteten Anwendungen erfüllt werden können, qualitativ mit

Kosten für ein KPI-System basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)	
Anzahl Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für alle Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	2.500.000 EUR
Bürogebäude (für 10 Planstellen)	500.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	500.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	1.500.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	10.000.000 EUR
Summe Investitionskosten	15.000.000 EUR
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	750.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	75.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	1.500.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	375.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	2.800.000 EUR
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	15.000.000 EUR
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	2.800.000 EUR

Tab. 5-6: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)

den Symbolen „+“, „+/o“, „o“, „o/-“ und „-“ bewertet. Dies ergibt einen Überblick über Stärken und Schwächen der einzelnen Erfassungsmethoden. Für die Zusammenfassung der Ergebnisse in einer Bewertungssynthese werden diese fünf Stufen in eine Wertungsskala transformiert (Tabelle 5-7).

Diese Skalierung von 0 bis 100 entspricht den Prozentwerten für die Erfüllung der betrachteten Kriterien.

Neben dieser Festlegung wird das Zielsystem dreistufig mit Gewichtungsfaktoren versehen, deren

Kriterienerfüllungsgrad einer Methode	
Ausprägung	Numerische Quantifizierung
-	0
-/o	25
o	50
o/+	75
+	100

Tab. 5-7: Kriterienerfüllungsgrad

Werte ebenfalls jeweils von 0 bis 100 skaliert werden:

- Auf der Ebene der vier Anwendungen – die Summe der Anwendungsgewichte soll 100 sein.
- Auf der Ebene der sechs Anforderungen – die Summe der Anforderungsgewichte einer Anwendung soll 100 sein.
- Auf der Ebene der Teilziele – die Summe der Gewichte der Teilziele einer Anforderung soll 100 sein.

Die von den Autoren initial vorgeschlagenen Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 5-8 aufgelistet (siehe auch Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Bewertung“).

Die dort genannten Faktoren beschreiben eine Konfiguration, bei der die Anwendungen gleich gewichtet und die Teilzielfaktoren relativ ausgeglichen gewählt sind. Mit einer anderen Wahl von Gewichtungsfaktoren lassen sich die Eignungen der Erfassungsmethoden bei geänderten Zielen, Randbedingungen oder Schwerpunkten anpassen. Der zu-

Gewichtungsfaktoren zur Bewertung der Datenerfassungsmethoden				
Anwendung	Eckwerte	Engpassanalyse	Verfügbarkeit	Management
Anwendungsgewicht	25	25	25	25
1. Erfassung der Verkehrsablaufqualität	15	15	15	15
KPI für Teilstrecken	15	15	15	15
KPI für Strecken	15	15	15	15
KPI für Netzabschnitte/Teilnetze	15	15	15	15
KPI für beliebige Zeiträume	15	15	15	15
KPI basierend auf Fahrtzeitverteilungen - Mittelwert	15	15	15	15
KPI basierend auf Fahrtzeitverteilungen - Perzentile	15	15	15	15
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	10	10	10	10
2. Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	25	30	25	20
KPI ungewichtet	15	15	15	15
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	15	15	15	15
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	15	15	15	15
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	15	15	15	15
Verkehrsleistung Fahrzeuge	10	10	10	10
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	10	10	10	10
Verkehrsleistung Personen	10	10	10	10
Anzahl Fahrten (Anzahl unterschiedlicher Fz)	10	10	10	10

Tab. 5-8: Vorgeschlagene Gewichtungsfaktoren zur Bewertung der Datenerfassungsmethoden

Gewichtsfaktoren zur Bewertung der Datenerfassungsmethoden				
Anwendung	Eckwerte	Engpassanalyse	Verfügbarkeit	Management
Anwendungsgewicht	25	25	25	25
3. Verschiedene Einsatzbedingungen	15	20	30	20
Eignung bei Baustellen	15	15	15	15
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	15	15	15	15
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrzeitquellen	10	10	10	10
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	10	10	10	10
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	10	10	10	10
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	10	10	10	10
Eignung für Kurzfristprognose	10	10	10	10
Eignung für Mittelfristprognose	10	10	10	10
Eignung für Maßnahmenprognose (z. B. Wirkung einer geplanten Baustelle)	10	10	10	10
4. Qualität, die das Konzept bereitstellen soll	25	20	10	20
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	15	15	15	15
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeiten (Rohdaten)	15	15	15	15
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeitverteilungen	15	15	15	15
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	15	15	15	15
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	10	10	10	10
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	10	10	10	10
Repräsentativität der Stichprobe	10	10	10	10
Aussagen zum Stichprobenumfang	10	10	10	10
5. Datenaufbereitung und Datenhaltung	5	5	5	5
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	25	25	25	25
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	25	25	25	25
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	25	25	25	25
Datenschutzvorgaben erfüllen	25	25	25	25
6. Weitergehende Anforderungen	5	5	5	15
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	30	30	30	30
Erfassung von Quellen und Zielen	30	30	30	30
Erweiterung auf Bundesstraßen	40	40	40	40

Tab. 5-8: Fortsetzung

	Erfassungsmethode				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Nutzen	60,0	56,5	57,4	56,3	66,1

Tab. 5-9: Beispielhafte Ergebnisse der Nutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen

ständige Entscheidungsträger soll hier die vorgeschlagenen Werte durch Gewichtungsfaktoren auf

Basis seiner eigenen Zielvorstellungen und Priorisierungen ersetzen.

Aus der Kombination der Nutzenerfüllungsgrade mit den Bewertungsgewichten ergeben sich die Gesamtnutzen der Methoden.

Mit den gewählten Gewichtungsfaktoren ergeben sich die in Tabelle 5-9 genannten Nutzen für die fünf Erfassungsmethoden (siehe auch Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Nutzen“).

5.3 Wirksamkeits-Kosten-Analyse der Erfassungsmethoden

Im Rahmen einer solchen Bewertung sind den Nutzen die Kosten gegenüberzustellen. Die Nutzen können nicht monetarisiert werden, deshalb soll ein Wirksamkeits-Kosten-Quotient (WKQ) ermittelt werden. Der WKQ beschreibt das Verhältnis zwischen dem Nutzen (der Wirksamkeit) eines Verfahrens und den dafür aufzuwendenden Kosten.

Zur Verbesserung der Anschaulichkeit werden dabei die Kostenterme dimensionslos dargestellt und vor der Berechnung durch 10^6 geteilt.

Mit den gewählten Ansätzen für die Wirksamkeit und die Kosten erhält man das in Tabelle 5-10 ge-

	Erfassungsmethode				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Wirksamkeit	60,0	56,5	57,4	56,3	66,1
Kosten	103,2	58,8	120,8	2,8	2,8
WKQ	0,58	0,96	0,48	20,11	23,62

Tab. 5-10: Beispielhafte Gegenüberstellung von Nutzen und Kosten – Wirksamkeits-Kosten-Quotient für die getroffenen Annahmen und Schätzungen

zeigte beispielhafte Ergebnis (siehe auch Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Analyse“).

Mit den angenommenen Kosten und Gewichtungskoeffizienten zur Bewertung ergibt sich somit das beste Ergebnis beim Einsatz von FCD.

Anhand der eingesetzten Excel-Anwendung lassen sich leicht Sensitivitätsbetrachtungen vornehmen. Wenn beispielsweise statt der gleichen Gewichtungsfaktoren für die vier Anwendungen jeweils das volle Gewicht auf eine einzelne Anwendung gelegt wird, erhält man die in Tabelle 5-11 dargestellten Wirksamkeits-Kosten-Quotienten (siehe auch Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Analyse“, Zeile 14-19).

Es zeigt sich eine Stabilität der WKQ, eine Unabhängigkeit der Eignung der Erfassungsmethoden von den Aufgaben der unterschiedlichen Anwendungsfälle (vgl. auch Bild 5-2).

Durch die im Vergleich zu FCD und FPD hohen Kosten der drei anderen Erfassungsmethoden wird eine kostenunabhängige vergleichende Bewertung der Nutzen der einzelnen Methoden erschwert. Tabelle 5-12 und Bild 5-3 zeigen beispielhaft die Ergebnisse der gleichen Sensitivitätsanalyse nur in Bezug auf die Nutzen.

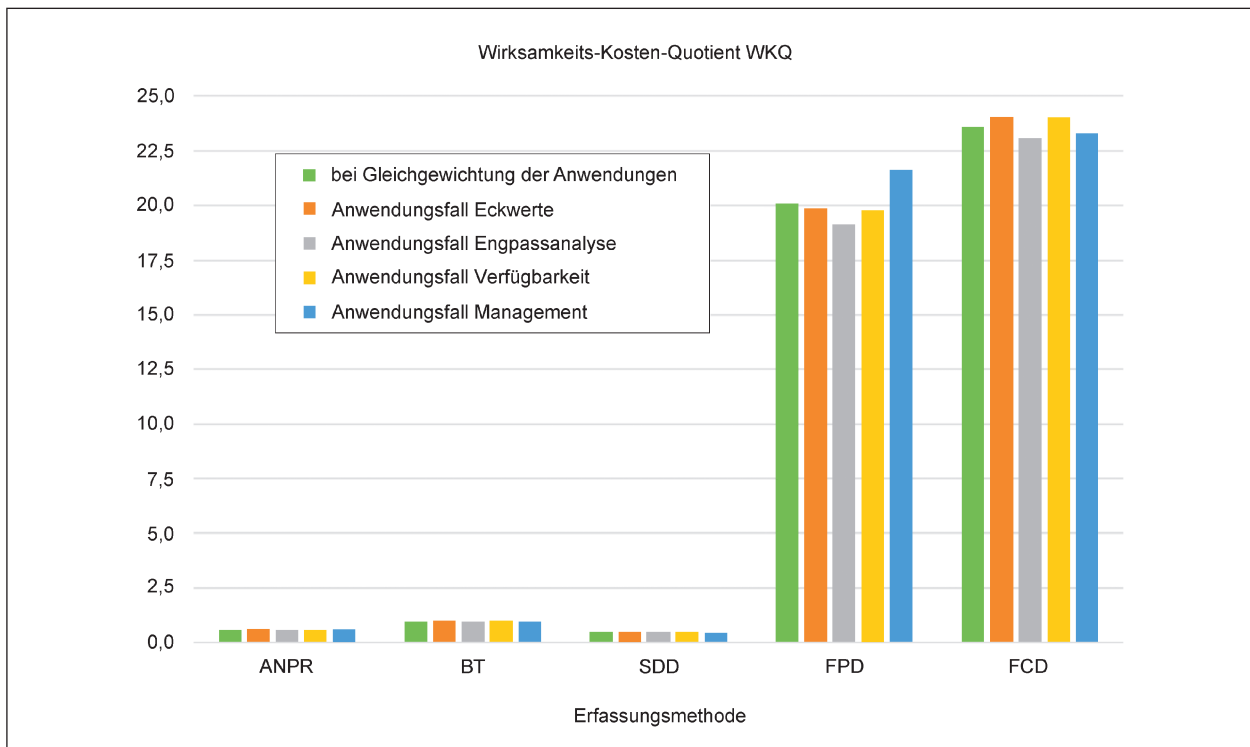


Bild 5-2: Diagramm beispielhafter Wirksamkeits-Kosten-Quotienten für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse

WKQ	Erfassungsmethode				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Gleichgewicht der Anwendungen	0,58	0,96	0,48	20,11	23,62
100 % für Eckwerte	0,61	0,98	0,49	19,84	24,04
100 % für Engpassanalyse	0,58	0,94	0,48	19,15	23,08
100 % für Verfügbarkeit	0,56	0,98	0,49	19,78	24,04
100 % für Management	0,59	0,94	0,44	21,65	23,30

Tab. 5-11: Beispielhafte Wirksamkeits-Kosten-Quotienten für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse

Nutzenpunkte	Erfassungsmethode				
	ANPR	BT	SDD	FPD	FCD
Gleichgewicht der Anwendungen	60,0	56,5	57,4	56,3	66,1
100 % für Eckwerte	62,5	57,5	59,6	55,6	67,3
100 % für Engpassanalyse	59,5	55,5	58,1	53,6	64,6
100 % für Verfügbarkeit	57,4	57,7	58,9	55,4	67,3
100 % für Management	60,6	55,1	53,1	60,6	65,3

Tab. 5-12: Beispielhafte Nutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse

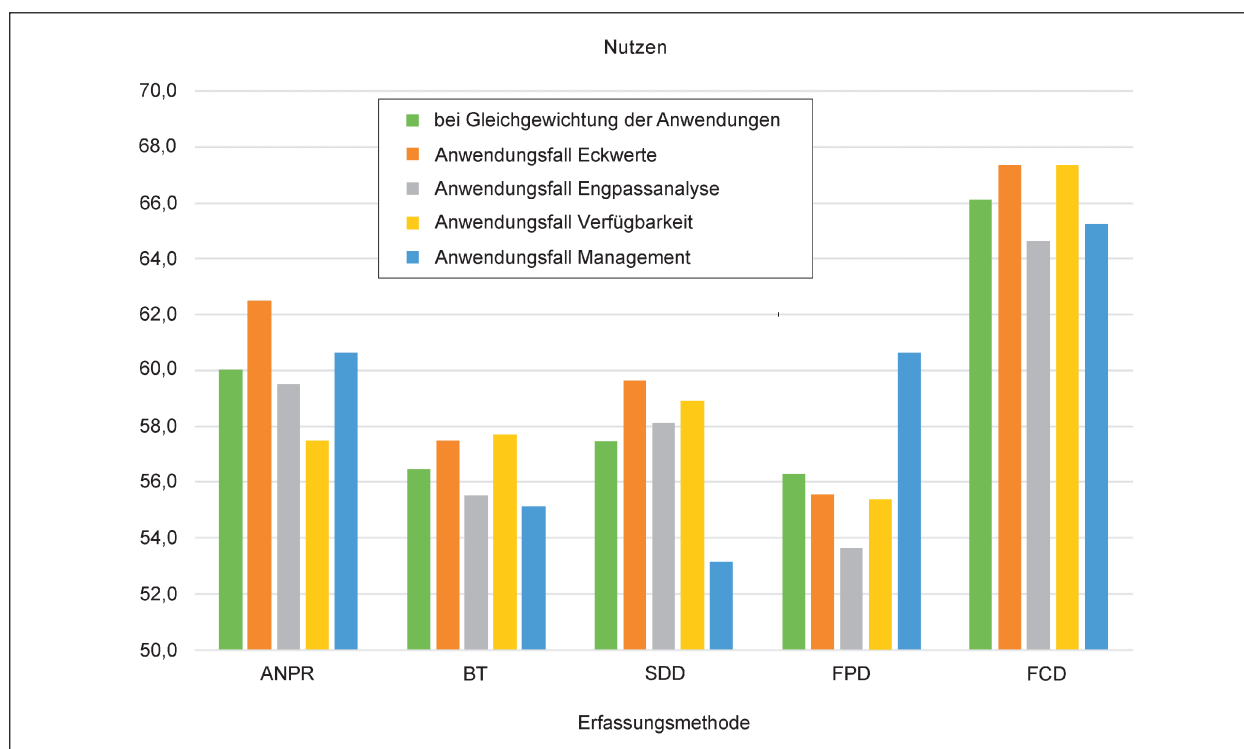


Bild 5-3: Diagramm beispielhafte Nutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse

5.4 Bewertung der hybriden KPI-Systeme

In diesem Kapitel sollen die in Kapitel 4.8 genannten ausgewählten hybriden KPI-Systeme untersucht werden. Dabei sollen die Kostenkomponenten analog zum dort beschriebenen Baukastensystem individuell zusammengestellt werden. Die Nutzenanalyse soll jeweils auf die Anwendungsfälle abzielen, für die das jeweilige KPI-System empfohlen wurde.

5.4.1 Kosten hybrider Lösungen

5.4.1.1 Stufe 0: Kosten für ein KPI-Basis-system mit SDD

Annahmen zur Technik und zur Anzahl der Messquerschnitte

Im Unterschied zu der im Kapitel 5.1.2.3 beschriebenen Lösung mit einer starken Erhöhung der An-

zahl der Messquerschnitte geht das Basissystem nur von den bereits existierenden bzw. bereits geplanten Messquerschnitten aus. Über diese wird die Anzahl der Fahrzeuge (und gegebenenfalls deren Geschwindigkeit) auf allen Autobahnstrecken gemessen. Soweit für die KPI-Bestimmung Geschwindigkeiten benötigt werden, ist deren Qualität durch die geringe Anzahl dafür geeigneter Messquerschnitte eingeschränkt. Ein grober Rückschluss auf die Verkehrsqualität ist mit Hilfe des Fundamental-diagramms aus den Verkehrsstärken oder aus der Saldierung der Verkehrsstärken benachbarter Messquerschnitte (Veränderung der Fahrzeugdichte) möglich.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

Sowohl die Anzahl der zu betreuenden Messstellen als auch die Menge der Daten ist vergleichsweise gering. Es wird von einem Bedarf von 10 Personalstellen in der Zentrale ausgegangen.

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 0	
Anzahl zusätzlicher Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für <u>alle</u> zusätzlichen Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	
<hr/>	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	220.000 EUR
Bürogebäude (für 10 Planstellen)	500.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	500.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	100.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	-
Summe Investitionskosten	1.300.000 EUR
<hr/>	
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	750.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	75.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	130.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	25.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	1.100.000 EUR
<hr/>	
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>1.300.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>1.100.000 EUR</u>

Tab. 5-13: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 0

5.4.1.2 Stufe 1: Kosten für ein KPI-System mit SDD und FCD

Annahmen zur Technik

Das Basissystem (Stufe 0) wird um die Nutzung von FCD-Daten erweitert. Die Verkehrsstärkedaten aus den SDD-Messquerschnitten werden mit den FCD-Daten, die die Verkehrsqualität beschreiben, kombiniert.

In Stufe 1.1 erfolgt die Berechnung der KPI rückwirkend für Tagestypen oder Stundengruppen.

In Stufe 1.2 erfolgt die Berechnung der KPI ebenfalls rückwirkend, aber häufiger und deshalb zeitnäher.

In Stufe 1.3 werden sowohl die SDD als auch die FCD-Daten in Echtzeit verknüpft und ergeben ein ständig aktuelles Lagebild über die Verkehrssituation auf den deutschen Autobahnen.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

In den Stufen 1.1 und 1.2 ist die Zahl der zu betreuenden Messstellen als auch die Menge der Daten vergleichsweise gering.

In Stufe 1.1 wird von einem Bedarf von 12 Personalstellen in der Zentrale ausgegangen.

In Stufe 1.2 erhöht sich dieser Bedarf auf 15 Personalstellen.

In Stufe 1.3 werden ständig sehr große Datenmengen verarbeitet. Die Zentrale muss rund um die Uhr besetzt sein. Entsprechend erhöht sich der Bedarf auf schätzungsweise 30 Personalstellen. Nicht berücksichtigt ist der zusätzliche Personalaufwand für die regionale Netzsteuerung auf der Grundlage der berechneten Echtzeit-Daten.

Annahmen zu den Kosten für FCD

Die Herleitung der Kosten für FCD wurden im Kapitel 5.1.2.5 beschrieben. Bei dieser Kostenschätzung wurde der Einsatz von Real-Time-Daten zugrunde gelegt, die auch für die spätere Analyse gespeichert werden können sollen. Diese Anforderung trifft hier nur auf die Stufe 1.3 sowie auf die Stufen 2.1 und 2.2 zu. Für die Stufen 1.1 und 1.2 reicht dagegen die Verwendung von historischen Daten aus, wobei die Stufe 1.1 niedrigere Anforderungen an

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.1	
Anzahl zusätzlicher Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für <u>alle</u> zusätzlichen Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	
<hr/>	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	760.000 EUR
Bürogebäude (für 12 Planstellen)	600.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	600.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	200.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	2.400.000 EUR
Summe Investitionskosten	4.600.000 EUR
<hr/>	
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	900.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	90.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	460.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	50.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	1.600.000 EUR
<hr/>	
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>4.600.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>1.600.000 EUR</u>

Tab. 5-14: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.1 mit FCD pro Verkehrstag

den zeitlichen Detailierungsgrad aufweist als die Stufe 1.2.

Wie bereits in Kapitel 5.1.2.5 beschrieben, werden für die Schätzung der Kosten für FCD die den Autoren derzeit zur Verfügung stehenden Preislisten der drei Anbieter HERE, INRIX und TomTom verwendet. Wegen Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Datenanbietern dürfen die Preiskalkulationen nicht offengelegt werden. Auf Basis der oben getroffenen Annahmen werden für die Datenbeschaffung folgende Preise angenommen:

- Stufe 1.1: 240.000 €/Jahr,
- Stufe 1.2: 400.000 €/Jahr.

Diese Preise repräsentieren einen von den Anbietern empfohlenen Marktpreis. Erfahrungsgemäß bieten die Datenanbieter in der Regel Sonderangebote für große Projekte an. Die Preise sind also volatil und die berechneten Preise können nur als Indikator gelten.

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.2	
Anzahl zusätzlicher Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für <u>alle</u> zusätzlichen Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	
<hr/>	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	1.160.000 EUR
Bürogebäude (für 15 Planstellen)	750.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	750.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	300.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	4.000.000 EUR
Summe Investitionskosten	7.000.000 EUR
<hr/>	
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	1.125.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	112.500 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	700.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	75.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	2.100.000 EUR
<hr/>	
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>7.000.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>2.100.000 EUR</u>

Tab. 5-15: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.2 mit FCD pro Kalendertag

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.3	
Anzahl zusätzlicher Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für <u>alle</u> zusätzlichen Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	

Tab. 5-16: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.3 mit kontinuierlichen FCD

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.3	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	2.920.000 EUR
Bürogebäude (für 30 Planstellen)	1.500.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	1.500.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	1.600.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	10.000.000 EUR
Summe Investitionskosten	17.500.000 EUR
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	2.250.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	225.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	1.750.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	400.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	4.700.000 EUR
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>17.500.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>4.700.000 EUR</u>

Tab. 5-16: Fortsetzung

5.4.1.3 Stufe 2: Kosten für ein KPI-System mit SDD, FCD und lokalen Erweiterungen

Annahmen zur Technik

In das Basissystem (Stufe 0) werden in Stufe 2 alle vorhandenen Messquerschnitte mit ANPR und Bluetooth-Technik integriert, um mit minimalem Aufwand aus Daten, die für die Netzsteuerung und -überwachung in regionalen Leitstellen ohnehin anfallen, KPI zu generieren.

Für die Stufen 2.1 und 2.2 wird das System um die Nutzung von FCD erweitert.

Für einige Netzbereiche werden zusätzlich entweder modellbasierte Fahrzeiten (Stufe 2.1) oder aus ANPR- oder Bluetooth-Messquerschnitten (Stufe 2.2) abgeleitete Fahrzeiten, Abbiegeanteile und Routen ergänzt. Der Aufwand ist nur zur Erstellung eines ständig aktuellen Lagebildes, das auch die Wirkung von regelnden Eingriffen misst, sinnvoll.

Die Komplexität des Verkehrsmodells in Stufe 2.1 oder die Anzahl der zusätzlichen Messquerschnitte ist beliebig. Im Fall von Stufe 2.1 wird zur Kostenkalkulation davon ausgegangen, dass für 10 Regionen Verkehrsmodelle aufgebaut werden, die zusammen etwa die Hälfte der Streckenlänge des Autobahnnetzes abdecken.

Annahmen über die Anzahl der Messquerschnitte

Im Fall von Stufe 2.2 wird davon ausgegangen, dass sich die Zahl der ergänzenden Messquerschnitte gegenüber der Datenerhebung ausschließlich über ANPR bzw. Bluetooth halbiert. Angenommen werden für diese Stufe folglich 1.500 Messquerschnitte mit ANPR.

Annahmen zu den Kosten der Zentrale

In der Stufe 2 besteht der Aufwand in der Herstellung einer einheitlichen Datenbasis aus unterschiedlichen Datenquellen (SDD, ANPR, Bluetooth) bei einer geringen bis mittleren Datenmenge.

In beiden Stufen 2.1 und 2.2 sind die zu Datenmengen sehr hoch. Die Verschneidung von drei unterschiedlichen Datenquellen in Echtzeit ist komplex und der dafür erforderliche Aufwand lässt sich aus bisherigen Erfahrungen nur mit größten Unsicherheiten abschätzen.

In Stufe 2.1 ist durch zusätzliche Verwendung von Verkehrsmodellen in Realtime ein höherer Aufwand für das Rechenzentrum kalkuliert. In Stufe 2.2 ist dagegen ein etwas höherer Personalaufwand wahrscheinlich, da die „eigene“ Datenerhebung an ANPR-Messquerschnitten betreut werden muss.

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.0	
Anzahl zusätzlicher Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für <u>alle</u> zusätzlichen Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	
<hr/>	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	600.000 EUR
Bürogebäude (für 20 Planstellen)	1.000.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	1.000.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	1.000.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	Nicht relevant
Summe Investitionskosten	3.600.000 EUR
<hr/>	
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	1.500.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	150.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	360.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	250.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	2.400.000 EUR
<hr/>	
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>3.600.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>2.400.000 EUR</u>

Tab. 5-17: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.0 mit SDD und modellbasierter Fahrtzeitermittlung

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.1	
Anzahl zusätzlicher Messquerschnitte	Nicht relevant
Kosten für <u>alle</u> zusätzlichen Messquerschnitte	Nicht relevant
Investitionskosten	
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	
<hr/>	
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	3.200.000 EUR
Bürogebäude (für 35 Planstellen)	1.750.000 EUR
Arbeitsplatzausstattung	1.750.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	2.500.000 EUR
Dateneinkauf (10-Jahres-Vertrag)	10.000.000 EUR
Summe Investitionskosten	19.200.000 EUR
<hr/>	
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten	2.650.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	262.500 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung	1.920.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	625.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	5.600.000 EUR

Tab. 5-18: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.1 mit modellbasierten Fahrtzeiten

Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.1	
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>19.200.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>5.600.000 EUR</u>

Tab. 5-18: Fortsetzung

Kosten für eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.2	
Anzahl Messquerschnitte	1.500
Kosten für die Verkehrsdatenerfassungseinrichtung <u>eines</u> Messquerschnitts	
Investitionskosten Datenerfassungseinrichtungen (ANPR)	
Planungskosten (20 %)	15.600 EUR
Baukosten (Brücke), nicht relevant	(100.000 EUR)
Kamera	50.000 EUR
Energieversorgung, Kommunikationssystem davon nicht relevant	25.000 EUR (25.000 EUR)
Dezentrale Datenaufbereitung, Interface-Modul, Software	3.000 EUR
Summe Investitionskosten (nur relevante Anlagenteile)	93.600 EUR
Jährliche Kosten	
Abschreibung der Investitionskosten	14.660 EUR
Betrieb-, Unterhalts- und Wartungskosten	19.000 EUR
Summe jährliche Kosten	33.660 EUR
Kosten für <u>alle</u> Messquerschnitte	
Investitionskosten	140.400.000 EUR
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen (relevante Anlagenteile)	50.500.000 EUR
Investitionskosten der Zentrale	
Planungskosten (20 %)	3.200.000 EUR
Baukosten (Bürogebäude für 40 Planstellen)	2.000.000 EUR
Technische Ausstattung (inkl. Arbeitsplätze)	2.000.000 EUR
Rechenzentrum, Datenverarbeitung, Cloud	2.000.000 EUR
Dateneinkauf	10.000.000 EUR
Summe Investitionskosten	19.200.000 EUR
Jährliche Kosten der Zentrale	
Personalkosten (20 Planstellen)	3.000.000 EUR
Sachkosten (10 % der Personalkosten)	300.000 EUR
Jährliche Kosten für Abschreibung über 10 Jahre	1.920.000 EUR
Betrieb, Wartung, Pflege, Lizenzgebühren des Rechenzentrums	500.000 EUR
KPI-System	120.000 EUR
Summe jährliche Kosten	5.800.000 EUR
Gesamtkosten des Systems (Messstellen und Zentrale)	
Investitionskosten	<u>159.600.000 EUR</u>
Jährliche Kosten inkl. Abschreibungen	<u>56.300.000 EUR</u>

Tab. 5-19: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.2 mit ANPR/Bluetooth

5.4.2 Nutzen hybrider Lösungen

Wie bereits in der Einleitung zu Kapitel 5 erwähnt, wird im Unterschied zu Kapitel 5.3 für die hybriden Systeme nicht der Wirksamkeits-Kosten-Quotient (WKQ) je Anwendungsfall ermittelt. Anstelle des WKQ soll bei der Bewertung der hybriden Systeme die Nutzenbewertung in den Vordergrund gestellt werden, um insbesondere die Nutzenzugewinne gegenüber dem Basisfall der Stufe 0 herauszuarbeiten.

Vorgehensweise:

- Der Basisfall der Stufe 0 wird sowohl kosten- als auch nutzenseitig als gegeben angesehen.
- Für die hybriden Systeme der Stufen 1 und 2 werden die zusätzlichen Nutzen gegenüber dem Basisfall mit einem dreistufigen System bewertet:
 - 0: kein zusätzlicher Nutzen,
 - 1: mittlerer zusätzlicher Nutzen,
 - 2: großer zusätzlicher Nutzen.
- Außerdem werden die zusätzlichen Kosten berechnet und der Nutzenbewertung gegenübergestellt.

Die Bewertung der Zusatznutzen orientiert sich an der Anforderungserfüllung der genannten hybriden Systeme, die in Kapitel 4.8.4 in Tabelle 4-21 erwähnt wird. Tabelle 5-20 zeigt die vorgeschlagene Zusatznutzenbewertung (siehe auch „Bewertungssystem.xlsx“ im Tabellenblatt „Bewertung_HybrideSysteme“).

Die hybriden Systeme der Stufe 1.3 sowie der Stufen 2.0, 2.1 und 2.2 sind für die Verwendung für alle vier Anwendungsfälle geeignet und werden daher im folgenden Kapitel auch miteinander verglichen. Die hybriden Systeme der Stufen 1.1 und 1.2 sind für spezielle Anwendungsfälle konzipiert (Eckwerte und Engpassanalyse, bzw. Verfügbarkeit), daher werden diese Stufen auch nur für die Anwendungsfälle bewertet, für die sie angewendet werden können. Bei der Nutzenbewertung muss außerdem berücksichtigt werden, dass die Stufen 2.0, 2.1 und 2.2 insbesondere für stark belastete Strecken bzw. für die regionale Anwendung konzipiert sind und nicht im gesamten Netz angewendet werden würden. Die Stufe 2.0 sieht als einziges hybrides System keine bundesweite Verwendung von FCD vor, sodass mit dieser Stufe die Anforderung, ein KPI zu erstellen, das bundesweite Vergleichsanalysen zulässt, nicht erfüllt werden kann. Die so erhobenen Daten über die Verkehrsablaufqualität sind für die

Anforderung	Hybride Systeme, Stufe					
	1.1	1.2	1.3	2.0	2.1	2.2
Erfassung der Verkehrsablaufqualität						
KPI für Teilstrecken	2	2	2	1	2	2
KPI für Strecken	2	2	2	2	2	2
KPI für Netzabschnitte/Teilnetze	2	2	2	1	2	2
KPI für beliebige Zeiträume	0	2	2	2	2	2
KPI basierend auf Fahrtzeitverteilungen – Mittelwert	2	2	2	2	2	2
KPI basierend auf Fahrtzeitverteilungen – Perzentile	0	1	2	2	2	2
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	1	1	1	1	1	1
Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage						
KPI ungewichtet	1	1	1	0	1	1
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	1	1	1	2	2	2
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	1	1	1	2	2	2
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	0	0	0	0	0	0
Verkehrsleistung Fahrzeuge	1	1	1	1	1	1
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	1	1	1	2	2	2
Verkehrsleistung Personen	0	0	0	0	0	0
Anzahl Fahrten (Anzahl unterschiedlicher Fz)	0	0	0	0	0	0

Tab. 5-20: Vorgeschlagene Bewertung der Zusatznutzen der hybriden Systeme im Vergleich zum Basisfall der Stufe 0

Anforderung	Hybride Systeme, Stufe					
	1.1	1.2	1.3	2.0	2.1	2.2
verschiedene Einsatzbedingungen						
Eignung bei Baustellen	2	2	2	2	2	2
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	2	2	2	2	2	1
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrzeitquellen	0	0	0	2	0	0
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	0	1	1	1	1	1
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen/Rampen	0	0	0	2	2	2
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	0	2	2	2	2	2
Eignung für Kurzfristprognose	0	0	1	2	2	1
Eignung für Mittelprognose	2	2	2	2	2	2
Eignung für Maßnahmenprognose (z. B. Wirkung einer geplanten Baustelle)	0	0	0	1	1	0
Qualität, die das Konzept bereitstellen soll						
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	0	0	1	2	1	1
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeiten (Rohdaten)	2	2	2	0	2	2
Hohe Genauigkeit bei den Fahrzeitverteilungen	1	2	2	0	2	2
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	2	2	2	0	2	2
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	0	0	2	2	2	1
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	2	2	2	1	2	2
Repräsentativität der Stichprobe	2	2	2	2	2	2
Aussagen zum Stichprobenumfang	2	2	2	1	2	2
Datenaufbereitung und Datenhaltung						
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes						
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen						
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	1	1	1	1	1	1
Datenschutzvorgaben erfüllen	0	0	0	0	0	0
Weitergehende Anforderungen						
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	0	0	0	1	1	2
Erfassung von Quellen und Zielen	0	0	0	0	0	1
Erweiterung auf Bundesstraßen	2	2	2	0	1	1
Bundesweite Vergleichbarkeit	2	2	2	0	1	1

Tab. 5-20: Fortsetzung

verschiedenen Netzteile sehr unterschiedlich und schwer vergleichbar. Während die Vergleichbarkeit innerhalb einer zeitlichen Reihe gegeben ist, sollten die resultierenden KPI nicht zum überregionalen Vergleich verwendet werden. Dies schließt etwa eine Anwendung für die Engpassanalyse aus. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen, wurde in die Nutzenbewertung die zusätzliche Anforderung „Bundesweite Vergleichbarkeit“ unter dem Oberziel „Weitergehende Anforderungen“ eingefügt. Um der anwendungsfallspezifischen Konzeption der hybriden Lösungen Rechnung zu tragen, wurde die Gewichtung der Anforderungserfüllung überarbeitet.

Tabelle 5-21 zeigt das vorgeschlagene Ergebnis der Anpassung.

Die vorgeschlagene angepasste Bewertung der Zusatznutzen der hybriden Systeme, sowie die angepasste Gewichtung unter Berücksichtigung der Anwendungsfälle ist ebenfalls in der angefügten Excel-Mappe „Bewertungssystem.xlsx“ im Tabellenblatt „Bewertung_HybrideSysteme“ zu finden. Die daraus resultierenden vorgeschlagenen Zusatznutzenbewertungen befinden sich im Tabellenblatt „Nutzen_HybrideSysteme“.

Gewichtung Anforderung	25	25	25	25
Anforderung	Eckwerte	Engpassanalyse	Verfügbarkeit	Management
Erfassung der Verkehrsablaufqualität	30	25	25	25
KPI für Teilstrecken	0	10	15	15
KPI für Strecken	10	20	15	15
KPI für Netzabschnitte/Teilnetze	40	15	15	15
KPI für beliebige Zeiträume	0	0	15	15
KPI basierend auf Fahrtzeitverteilungen – Mittelwert	40	40	15	15
KPI basierend auf Fahrtzeitverteilungen – Perzentile	0	0	15	15
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	10	15	10	10
Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage	30	25	25	25
KPI ungewichtet	25	25	25	15
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	40	40	40	40
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	15	15	15	15
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	0	0	0	0
Verkehrsleistung Fahrzeuge	10	10	10	10
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	10	10	10	10
Verkehrsleistung Personen	0	0	0	0
Anzahl Fahrten (Anzahl unterschiedlicher Fz)	0	0	0	10
Verschiedene Einsatzbedingungen	5	20	25	15
Eignung bei Baustellen	50	20	20	20
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	0	15	20	20
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrtzeitquellen	0	0	0	0
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	50	25	15	10
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen/Rampen	0	15	15	10
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	0	15	15	10
Eignung für Kurzfristprognose	0	0	0	10
Eignung für Mittelprognose	0	10	0	10
Eignung für Maßnahmenprognose				
(z. B. Wirkung einer geplanten Baustelle)	0	0	15	10
Qualität, die das Konzept bereitstellen soll	20	10	15	15
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	15	15	10	10
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeiten (Rohdaten)	40	40	30	20
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeitverteilungen	15	15	25	15
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	0	0	10	15
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	0	0	0	15
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	10	10	10	10
Repräsentativität der Stichprobe	10	10	10	10
Aussagen zum Stichprobenumfang	10	10	5	5

Tab. 5-21: Vorgeschlagene angepasste Gewichtung der Anforderungserfüllung je Anwendungsfall

Gewichtung Anforderung	25	25	25	25
Anforderung	Eckwerte	Engpassanalyse	Verfügbarkeit	Management
Datenaufbereitung und Datenhaltung	5	5	5	5
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	0	0	0	0
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	0	0	0	0
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	60	60	50	50
Datenschutzvorgaben erfüllen	40	40	50	50
Weitergehende Anforderungen	10	15	5	15
Erfassung von Routen/Durchgangsverkehrsanteilen	0	20	30	40
Erfassung von Quellen und Zielen	0	20	30	30
Erweiterung auf Bundesstraßen	0	30	30	20
Bundesweite Vergleichbarkeit	100	30	10	10

Tab. 5-21: Fortsetzung

Zusatznutzenbewertung je Anwendungsfall	Stufe 1.1	Stufe 1.2	Stufe 1.3	Stufe 2.0	Stufe 2.1	Stufe 2.2
Eckwerte	1,46	1,52	1,55	1,12	1,64	1,64
Engpassanalyse	1,17	1,32	1,34	1,22	1,52	1,53
Verfügbarkeit		1,38	1,43	1,31	1,61	1,67
Management			1,30	1,20	1,40	1,50
Mehrkosten in Mio. EUR	0,5	1,0	3,6	1,3	4,5	55,2

Tab. 5-22: Beispielhafte Zusatznutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen je Anwendungsfall für hybride Systeme mit Gegenüberstellung der Mehrkosten in Mio. EUR pro Jahr im Vergleich zum hybriden System der Stufe 0

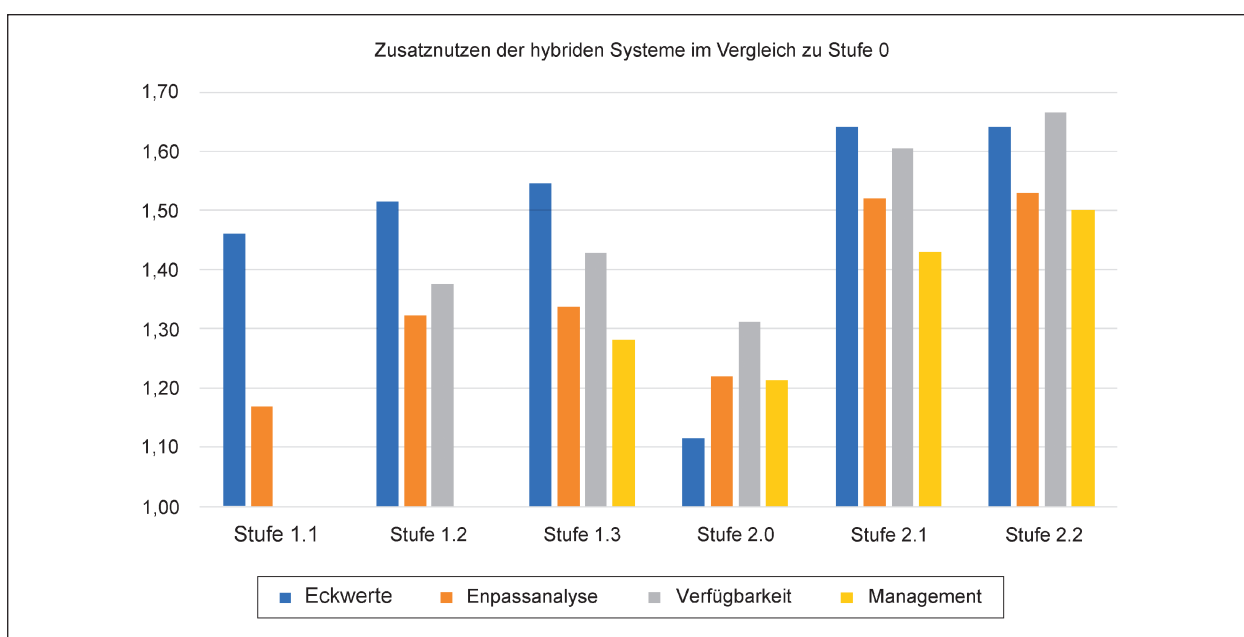


Bild 5-4: Beispielhafte Zusatznutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen je Anwendungsfall für hybride Systeme

5.4.3 Vergleich der hybriden Lösungen

Analog zur vergleichenden Analyse der verschiedenen Erfassungsmethoden (vgl. Kapitel 5.3) wurde die Nutzenbewertung auf Basis der in Kapitel 5.4.2 getroffenen Annahmen durchgeführt, wobei der Zusatznutzen je hybridem System bezogen auf den jeweiligen Anwendungsfall beispielhaft ermittelt wurde.

Tabelle 5-22 und Bild 5-4 zeigen das Ergebnis der Nutzenbewertung (max. zu erreichender Wert ist 2, siehe auch Bewertungssystem.xlsx, Tabellenblatt „Analyse_HybrideSysteme“):

Das Ergebnis zeigt, dass die hybriden Systeme der Stufen 1.1 und 1.2 trotz vergleichsweise niedriger Kosten einen hohen Zusatznutzen für die Anwendungsfälle haben, für die sie konzipiert waren. In Bezug auf den Nutzen trifft diese Aussage auch für die Stufe 1.3 zu, was aber aufgrund der höheren Zusatzkosten konterkariert wird.

Die Stufen 2.1 und 2.2 zeigen einen deutlichen Zusatznutzen im Vergleich zur Stufe 0, was aber insbesondere bei der Stufe 2.2 mit sehr hohen Zusatzkosten einhergeht. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass diese hybriden Systeme mit lokaler Erweiterung nur auf den Teilen des Netzes Verwendung finden würden, bei denen eine genauere Betrachtung der Verkehrssituation (etwa durch ANPR oder modellierte Fahrtzeitermittlung) sinnvoll ist und die zusätzlichen Kosten rechtfertigt. Bei Stufe 2.0 zeigt sich durchweg ein geringerer Zusatznutzen im Vergleich zu den hybriden Systemen, die FCD verwenden, was unter anderem daran liegt, dass dieses System keine bundesweiten Vergleichsanalysen ermöglicht. Da aber die Zusatzkosten sehr gering ausfallen und hochwertige KPI sozusagen als Nebenprodukt abgeworfen werden, hat die Stufe 2.0 regional sicherlich eine Daseinsberechtigung.

6 Prototypische Umsetzung mit einer webbasierten Benutzeroberfläche

Der Prototyp zur exemplarischen Umsetzung eines KPI-Systems soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Entgegennahme der einlaufenden Verkehrskenngrößen verschiedener Quellen,

- Datenfusion und Ermittlung harmonisierter Verkehrskenngrößen für alle detektierten Netzelemente (KPI-Berechnung),
- Bereitstellung der berechneten Daten,
- übersichtliche Darstellung der KPI,
- grafische Darstellung der Verkehrslage,
- grafischer Überblick von historischen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten.

Grundlage des Prototyps ist die bestehende Softwarelösung PTV Optima, die viele der genannten Anforderungen bereits erfüllt: Es handelt sich um eine webbasierte Anwendung mit englischsprachiger Benutzeroberfläche, die Daten aus verschiedenen Quellen entgegennehmen und fusionieren kann. Sie kann KPI berechnen und die Verkehrslage sowie berechnete Kenngrößen übersichtlich grafisch darstellen. Durch die offenen Daten-Schnittstellen und die Möglichkeit, eigene Erweiterungen und Auswertungen zu definieren, kann PTV Optima an zusätzliche Anforderungen angepasst werden, die im Zuge dieses Projekts entwickelt werden. Zudem handelt es sich um ein auf dem Markt verfügbares Software-Produkt, das kontinuierlich gewartet und weiterentwickelt wird; außerdem kann auf den regulären technischen Produktsupport zurückgegriffen werden.

6.1 Aufbau des Prototyps

PTV Optima wird in der Regel im Verkehrsmanagement im operationalen Betrieb angewendet. Kombiniert mit einem Verkehrsmodell können aufbauend auf der aktuellen Verkehrslage Kurzfristprognosen (z. B. für 15, 30 oder 60 Minuten) berechnet werden. Wie für das vorliegende Projekt erforderlich, erfolgt die Erfassung der aktuellen Situation mit Echtzeit-Verkehrsdaten, die aus verschiedenen Quellen – wie Detektoren oder FCD – stammen können. Durch die Fusion und übersichtliche Darstellung aller relevanten Informationen liefert die Software Entscheidungshilfen für Verkehrs- oder Netzbeeinflussungsmaßnahmen.

Für den Prototyp wurde die Variante Optima Data Analytics verwendet. Dabei handelt es sich um den Betrieb eines Systems mit Schwerpunkt auf der Datenanalyse ohne Kopplung an ein Verkehrsmodell. In dieser Variante kann das System (Echtzeit-)Inputdaten aus verschiedenen Quellen sammeln, geographisch verorten, in eine (GIS-)Datenbank ab-

speichern und fusionieren, Kenngrößen (KPI) berechnen und auf übersichtliche Art darstellen.

Zudem kann der Echtzeit-Betrieb auf Basis historischer Daten simuliert werden. Der Vorteil daran ist, dass auch Daten, die derzeit nicht in Echtzeit verfügbar sind (z. B. Baustellen-/Unfalldaten, Detektor- bzw. Zählwerte), zur Entwicklung und exemplarischen Darstellung eines KPI-Systems herangezogen werden können. Die Echtzeit-Simulation erlaubt vergleichende Analysen mit unterschiedlichen Einstellungen (*ceteris paribus*) durch wiederholte Simulationen desselben vordefinierten Zeitraums (z. B. Zeit und Strecke mit bekannter Störung). Die Verwendung von historischen Daten anstelle von Echtzeitdaten bietet zusätzlich einen Vorteil, da FCD-basierte Echtzeit-Daten i. d. R. ohne Unterscheidung des Verkehrssystems, ohne Stichprobengröße, Mittelwerte oder Perzentile geliefert werden, die bei historischen FCD enthalten sind. Für die Analysephase hat die Verwendung der historischen Geschwindigkeitsdaten der FCD-Anbieter also einen Mehrwert.

6.2 Inhalt des Prototyps – zugrundeliegende verkehrliche Daten

6.2.1 Streckennetz und Floating-Car-Data von TomTom

Grundlage des Prototyps war das Autobahnviereck bestehend aus A5, A8, A81 und A6 zwischen Hei-

delberg, Karlsruhe, Stuttgart und Heilbronn. Diese Autobahnstrecken wurden mit FCD-basierten historischen Geschwindigkeitsdaten von TomTom versorgt (siehe auch Kapitel 6.5). Aus diesem Datensatz wurden insbesondere die Geschwindigkeiten bzw. Fahrtzeiten und die Stichprobengrößen (Anzahl Messungen von TomTom – qHits) für die Berechnung von KPI herangezogen (siehe Kapitel 6.3). Allerdings wurden nur die Autobahnstrecken (Functional Road Class 0) mit historischen Geschwindigkeitsdaten versorgt, also waren KPI-Auswertungen nur auf den Autobahnen möglich.

Folgende Daten von TomTom wurden verwendet:

1. Streckennetz: TomTom MultiNet

- Release: 2016-12,
- Streckenauswahl: Autobahnviereck A5-A8-A81-A6 (inkl. Anschlussstellen).

2. FCD-basierte historische Geschwindigkeitsdaten: TomTom Stats

- Streckenauswahl: nur Strecken der Functional Road Class 0 (Autobahnstrecken),
- Abgefragter Zeitraum: 16.04.2018 – 22.04.2018,
- Ausgewählte Wochentaggregation: tagesfeine Abfrage aller Wochentage von Montag – Sonntag,

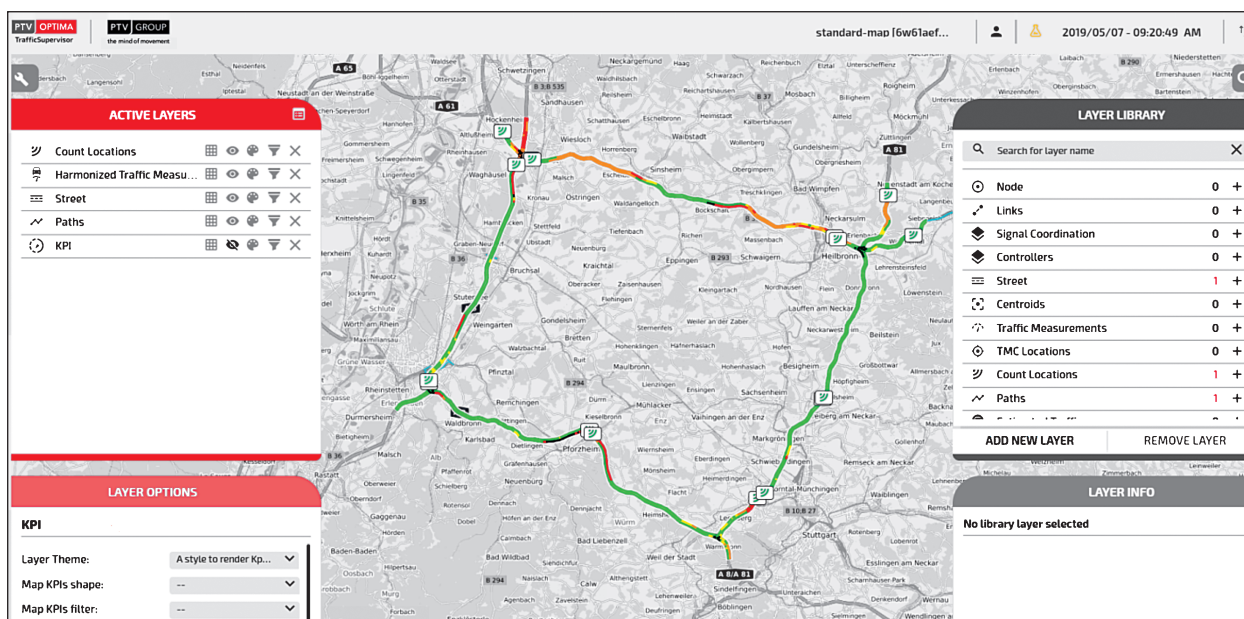


Bild 6-1: Netzauswahl des Prototyps (PTV Optima) inkl. Dauerzählstellen der BAST (Datenquelle: TomTom, Hintergrundkarte: Open Street Map)

- Zeitliche Granularität der abgefragten Daten: 5-Minuten-Zeitscheiben,
- Ausgewähltes Verkehrssystem: „Private“ (es werden nur Daten einer Auswahl von Fahrzeugen abgefragt, die sich laut TomTom größtenteils aus privaten Pkw zusammensetzt).

6.2.2 Zählstellendaten

Außerdem wurden die Dauerzählstellen der BAST ins Streckennetz eingebaut und die Daten des Analysezeitraums aufbereitet und bereitgestellt. Hierbei handelte es sich um die in Tabelle 6-1 genannten 9 bzw. richtungsgetreunt 18 Zählstellen.

Die Zählendaten liegen stundenfein vor. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den qHits von TomTom wurden diese in der Datenbank des Prototyps auf 5-Minuten-Zeitscheiben heruntergebrochen (einfache Division des Stundenwertes durch 12).

6.2.3 Hochrechnung von Verkehrsstärken

Damit im Prototyp auch verkehrsstärkengewichtete KPI dargestellt werden können, flächendeckende Verkehrsstärkendaten aber fehlen, wurden die Tom-

Tom Hits anhand der Zählstellendaten hochgerechnet. Die Stunden-Zählwerte an den 18 Dauerzählstellen der BAST wurden mit den auf Stunden aggregierten TomTom Hits an den Strecken verglichen, denen die Dauerzählstellen zugewiesen wurden.

Die Datenbasis war aufgrund des begrenzten Zeitraums von nur einer Woche, für den die TomTom Daten vorlagen, aus Sicht des AN nicht ausreichend, um statistisch valide differenzierte Hochrechnungsfaktoren abzuleiten, die etwa eine wochentagspezifische, tageszeitabhängige oder regions- bzw. abschnittsfeine Hochrechnung gerechtfertigt hätten. Stattdessen wurde die ermittelte durchschnittliche Abdeckungsquote von TomTom von etwa 15 % herangezogen, um einen pauschalen Hochrechnungsfaktor von 6,67 zu bestimmen. Alle TomTom Hits wurden mit diesem Faktor multipliziert, um die Verkehrsmenge im gesamten Streckennetz hochzurechnen. Eine differenziertere Hochrechnung wurde im Rahmen der Datenanalyse vorbereitet und kann bei Bedarf umgesetzt werden.

Hier soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Hochrechnung der Verkehrsstärken lediglich bei der KPI-Berechnung bzw. bei der Erstellung der KPI-Templates zum Einsatz kommt. Die hochge-

BAST-Nr	Name	Richtung	StrNr	VonKnotenNr	NachKnotenNr
8016	Walldorf	Heilbronn	3705980	2670063	2774420
8016	Walldorf	Mannheim	3705084	3076430	2789141
8018	St. Leon	Heidelberg	3705956	2746524	2746525
8018	St. Leon	Karlsruhe	3705780	2615154	2517019
8023	Karlsruhe	Heidelberg	3522740	2672312	2992303
8023	Karlsruhe	Basel	3524941	2787308	2787309
8059	Neckarsulm	Nürnberg	3252766	2781803	2742069
8059	Neckarsulm	Mannheim	3252032	2872744	2821997
8077	Pforzheim-Ost	Stuttgart	3714707	2523076	2597741
8077	Pforzheim-Ost	Karlsruhe	3717387	3105533	2741146
8084	Neuenstadt	Würzburg	3247482	2549427	2615238
8084	Neuenstadt	Stuttgart	3247058	2807149	2788260
8086	Pleidelsheim	Würzburg	3152966	2551057	2774803
8086	Pleidelsheim	Stuttgart	3152854	2679026	2679027
8088	Korntal	Würzburg	3148771	3130102	2627557
8088	Korntal	Stuttgart	3153695	2745157	2580485
8091	Schwabbach	Nürnberg	3316122	2944355	2944356
8091	Schwabbach	Mannheim	3315475	2940062	2940063

Tab. 6-1: Berücksichtigte Dauerzählstellen im Untersuchungsgebiet

rechneten Verkehrsstärken werden also nur für die Berechnung verkehrsstärkengewichteter KPI herangezogen. Die Verkehrsstärkendiagramme (Flow Charts), die über die Streckenobjekte im Prototyp aufgerufen werden können, zeigen dagegen noch die ursprünglich gelieferten TomTom Hits.

Die gewählte Vorgehensweise stellt eine Vereinfachung dar, die für die exemplarische Umsetzung im Prototyp aus Sicht des AN ausreichend ist. Im Betreiberkreis wurde diskutiert, wie zuverlässig die Ergebnisse bei der Hochrechnung von Hits sein können und wie eine ausreichende Qualität erreicht werden kann. Dies kann durch eine Clusteranalyse über die Zählstellendaten und TomTom Hits für einen längeren Zeitraum analysiert werden, um Aussagen über die Robustheit einer Hochrechnung von Verkehrsstärken treffen zu können (Frage: Welche Zählstellendichte ist notwendig, um eine Mindestqualität der Hochrechnung zu erreichen?).

6.2.4 Baustelleninformationen

Die von der BAST zur Verfügung gestellten Informationen zu Baustellen in Baden-Württemberg wurden ebenfalls berücksichtigt. Diese wurden zunächst danach ausgewählt, ob sie sich auf dem ausgewählten Streckennetz befanden und ob sie in der betrachteten Woche im April 2018 in Betrieb waren. Die so getroffene Auswahl der Baustellen wurde ins Streckennetz als Information auf den Strecken eingepflegt.

Folgende Informationen wurden übernommen:

- Auswahl der Strecken, die von der Baustelle betroffen waren,
- Geschwindigkeitsbeschränkung während der Baustellenphase,
- Art der Maßnahme (Erneuerung an der Decke, Um- und Ausbauarbeiten, Ausbau).

Mithilfe dieser Information können gezielt die Strecken herausgefiltert werden, die bei der Berechnung eines KPI berücksichtigt werden sollen. Der Prototyp lässt folgende Filterung zu:

- alle Strecken,
- nur Strecken ohne Baustelle,
- nur Strecken mit Baustelle.

6.3 Erstellung von KPI im Prototyp

Um im Prototyp-System KPI berechnen zu können, muss zuerst ein sog. KPI-Template angelegt werden, also eine Vorlage mit der Rechenanweisung zur Berechnung eines KPI-Wertes auf Basis der vorliegenden Daten. Im bereitgestellten Prototyp wurden bereits fünf KPI-Templates angelegt:

- TRAVEL TIME
Aktuelle Fahrtzeit von TomTom [min].
- TOMTOM RAW DATA QUALITY INDICATORS
Auswertung der Stichprobengröße von TomTom (qHits) zur Erfassung der Abdeckungsqualität.
- AVERAGE SPEED
Aktuelle Durchschnittsgeschwindigkeiten von TomTom [km/h].
- TRAVEL TIME RATIOS
Reisezeitindex berechnet aus dem Verhältnis der aktuellen Reisezeit von TomTom mit der Reisezeit bei freiem Verkehrsfluss [%]¹⁰.
- QUEUED STATE AGGREGATIONS
Aggregationen von TomTom Geschwindigkeiten oder Hits u. a. zur Berechnung verkehrsstärkengewichteter Fahrtzeitverluste.

Bei Bedarf können weitere KPI-Templates angelegt werden.

Auf Basis dieser KPI-Templates können nun KPI angelegt werden. Dabei kann die räumliche Aggregation definiert (s. u.) und zwischen verschiedenen weiteren Ausgestaltungsmöglichkeiten gewählt werden:

- Streckenfilter/räumliche Auswahl,
- Aggregationseinstellung (Summe, Anzahl, Durchschnitt, Min/Max, Verlustzeit/Fahrzeug etc.),
- zeitliche Aggregation (zwischen 5 Minuten und 1 Woche),
- Darstellungszeitintervall (gemäß den vorliegenden Daten voreingestellt auf 300 Sekunden),

¹⁰ von TomTom durch Berücksichtigung der Fahrtzeiten in Nachtstunden ermittelter Wert

- Visualisierungseinstellungen (Verbesserungsrichtung, Datenbereich, Qualitätsschwellenwerte).

Wie in Kapitel 3 beschrieben, können die untersuchten Anwendungsfelder verschiedenen räumlichen und zeitlichen Aggregationen zugeordnet werden (vgl. Bild 3-1).

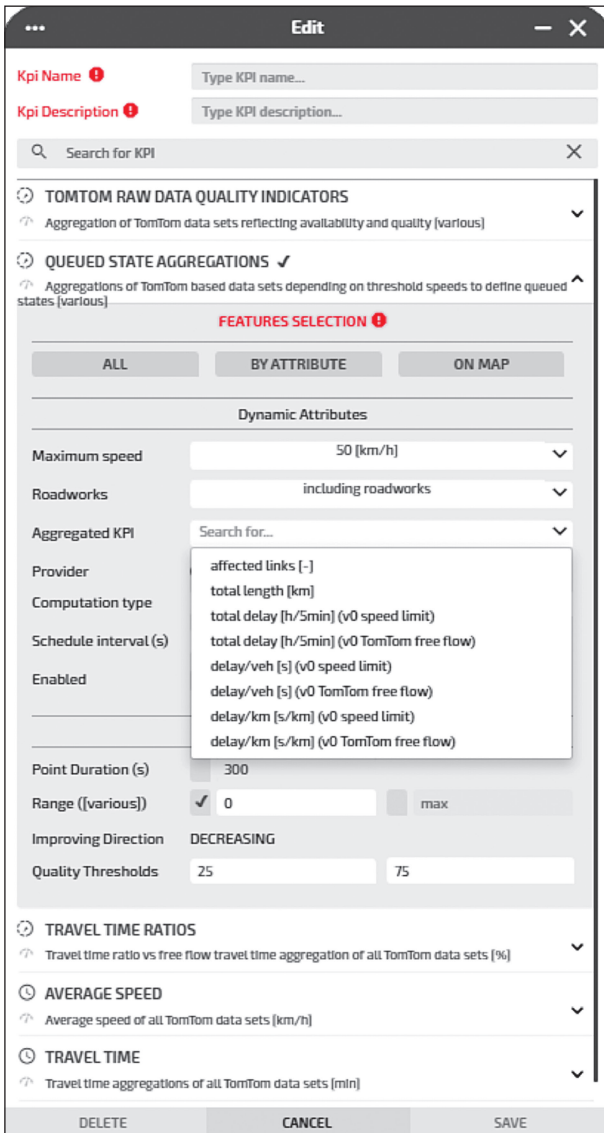


Bild 6-2: KPI Einstellungsmöglichkeiten (PTV Optima)

Räumliche Aggregation

Das System bietet die Möglichkeit, Daten räumlich aggregiert zu berechnen und darzustellen. Es können sogenannte vordefinierte Pfade (pre-defined paths) angelegt werden, um Netzabschnitte oder Strecken auszuwählen. Alternativ können die Daten auch für alle Strecken im Untersuchungsraum oder in Teilgebieten (Anschlussstellen/Autobahnkreuze) räumlich aggregiert werden. Diese Funktionalität kann somit auch für regionale Auswertungen verwendet werden.

Neben der direkten räumlichen Auswahl können außerdem Filter verwendet werden, um Strecken auszuwählen, die bei der KPI-Berechnung berücksichtigt werden sollen. Als Beispiel kann hier die Filterung von Baustellenstrecken genannt werden, die in Kapitel 6.2 beschrieben wird (siehe Unterkapitel „Baustelleninformation“).

Im bereitgestellten Prototyp sind bereits einige vordefinierte KPI mit räumlicher Auswahl vorhanden. Die Nutzer haben darüber hinaus die Möglichkeit, frei wählbare eigene räumliche Aggregationen zu erstellen.

Zeitliche Aggregation

Analysen mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen sind in der derzeit verfügbaren Version nur eingeschränkt innerhalb von Optima möglich. Als Verkehrsmanagementsoftware, die üblicherweise im operationalen Betrieb eingesetzt wird, ist es in der Lage, Daten in Echtzeit entgegenzunehmen und zu speichern. Die in der Datenbank gespeicherten Daten können für die letzten Stunden oder Tage angezeigt und analysiert werden (im vorliegenden Prototyp zwischen 5 Minuten und 1 Woche). Um größere Zeiträume, wie Monate oder Jahre, aggregiert zu analysieren, müssen die vom System gespeicherten Daten exportiert und extern weiterverarbeitet werden. Für den Prototypen können für die vordefinierten Pfade (s. o.) beispielhafte Auswertungen

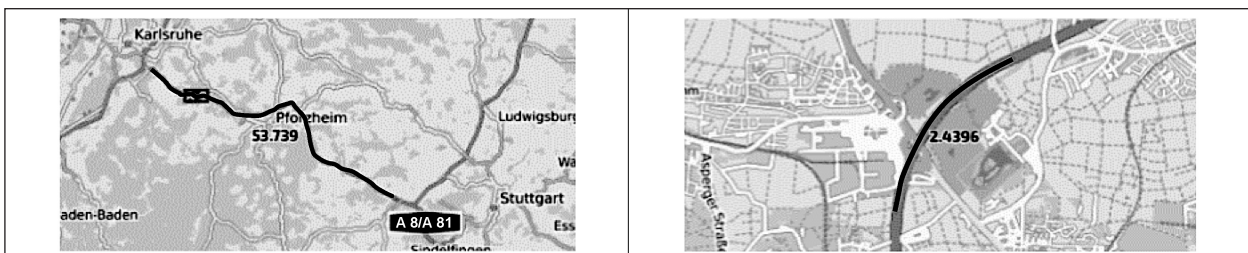


Bild 6-3: Räumliche Aggregation mit vordefinierten Pfaden am Beispiel der A8 (links); Anschlussstelle Ludwigsburg auf der A81 (rechts); (Hintergrundkarte: Open Street Map)

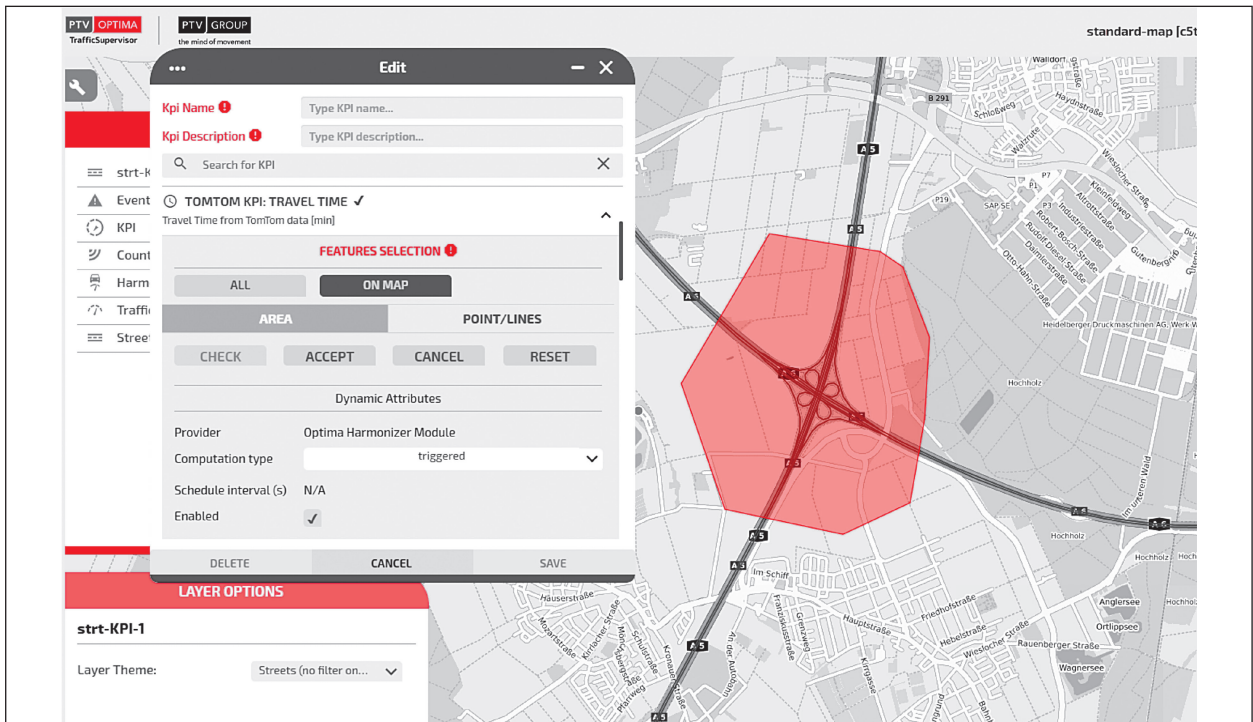


Bild 6-4: Räumliche Aggregation mit Gebietsauswahl am Beispiel des Walldorfer Kreuzes (A5/A6), (PTV Optima, Hintergrundkarte: Open Street Map)

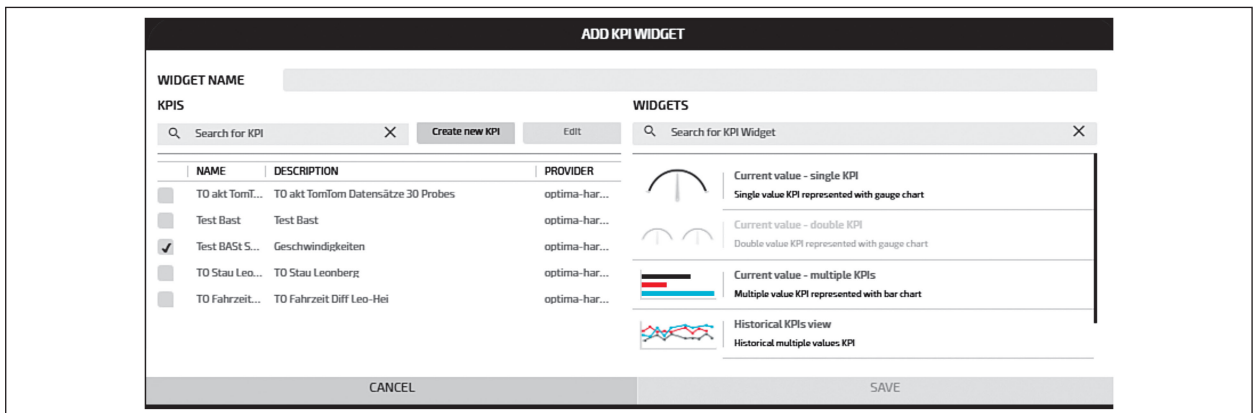


Bild 6-5: Visualisierungsmöglichkeiten von KPI im KPI Dashboard (PTV Optima, Hintergrundkarte: Open Street Map)

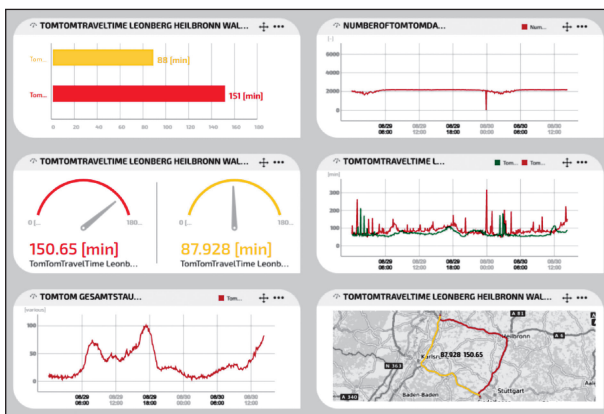


Bild 6-6: Visualisierungsmöglichkeiten von KPI im KPI Dashboard (PTV Optima, Hintergrundkarte: Open Street Map)

z. B. in Form von Heatmaps auf Basis der FCD von TomTom bereitgestellt werden.

Die so angelegten KPI können nun im KPI Dashboard dargestellt werden, wobei je nach Ausgestaltung des KPI verschiedene Arten der Visualisierung zur Auswahl stehen (siehe Bild 6-5 und Bild 6-6).

6.4 Zur Bereitstellung des Prototyps

Gemäß dem Projektzeitplan erstreckte sich der Bereitstellungszeitraum des Prototyps vom 1.9.2019 bis zum 30.11.2019. Die Bereitstellung erfolgte mit der Lieferung von Zugangsdaten zur Weboberfläche von PTV Optima (Traffic Supervisor, s. u.). Jeder designierte Nutzer des Prototyps erhielt einen eigenen Zugang.

Systemarchitektur

Das System wird in einem externen Rechenzentrum als virtueller Server auf Basis eines Windows-Systems gehostet. Das System ist von einer Firewall geschützt, die einen direkten Zugriff aus dem Internet unterbindet. Lediglich über freigeschaltete IP-Adressen kann auf das System zugegriffen werden. Im Vordergrund wird ein WildFly-Anwendungsserver verwendet, der auf ein PostgreSQL-Datenbank-Managementsystem zugreift und die Ergebnisse in Form einer Internetseite (URL) aufbereitet und visuell darstellt. Für den Zugriff auf die URL wird die Verwendung des Google-Browsers Chrome empfohlen, wenngleich auch andere Browser eine fehlerfreie Darstellung ermöglichen können.

Der Name der web-basierten grafischen Benutzeroberfläche (GUI) von PTV Optima ist Traffic Supervisor. Der Startbildschirm (Dashboard) des Traffic

Supervisors, der nach der Eingabe der Zugangsdaten erscheint, ermöglicht den Zugriff auf folgende Bereiche:

- Map: Kartendarstellung des Untersuchungs-bereichs,
- KPI Dashboard: visuelle Darstellung angelegter KPI,
- Dokumentation: Online-Hilfe in englischer Sprache.

Inhalt der Bereitstellung (siehe auch Kapitel 6.2)

- System auf Optima-Basis,
- TomTom-Netz des Autobahnvierecks A8-A81-A6-A5,
- FCD-basierte historische Geschwindigkeiten von TomTom auf dem bereitgestellten Streckennetz,
- im Netz verortete Dauerzählstellen der BAST inkl. Zählwerte für den o. g. Zeitraum (Stundenwerte auf 5-Minuten-Werte heruntergebrochen),
- auf Basis der TomTom Hits (qHits) an Dauerzählstellen hochgerechnete Verkehrsstärken für die KPI-Berechnung,
- vordefinierte KPI-Templates für die Erstellung eigener KPI mit räumlicher Auswahl,

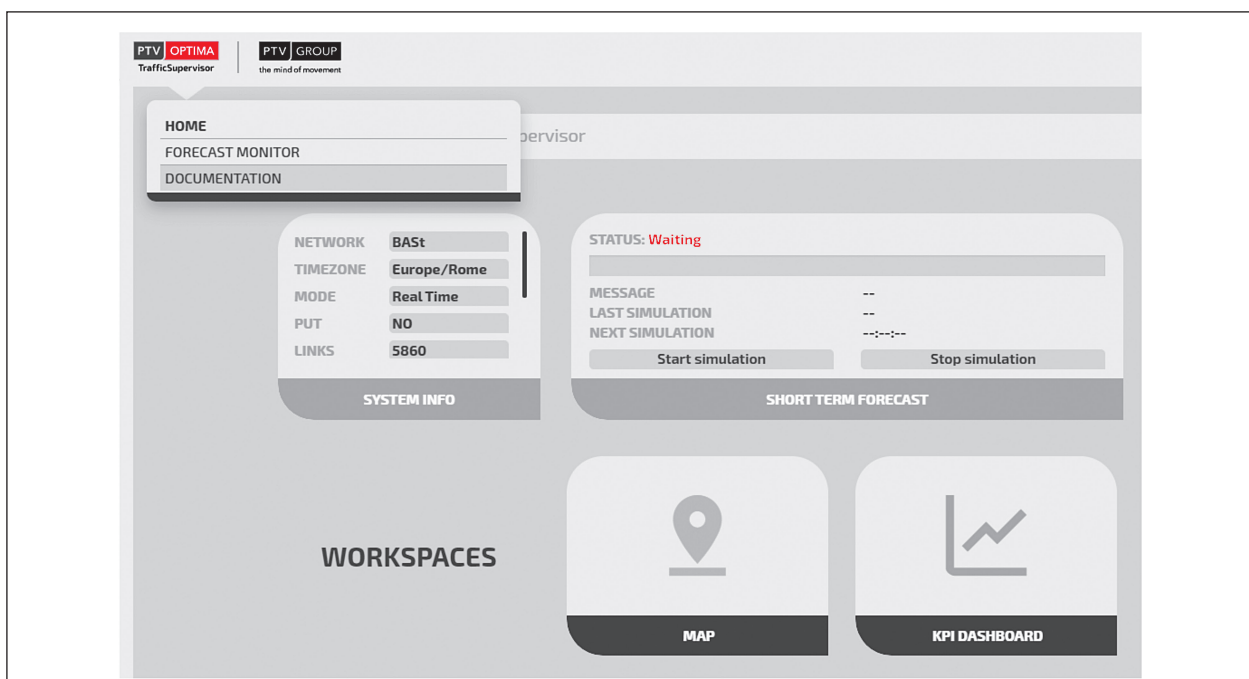


Bild 6-7: Startansicht des PTV Optima Traffic Supervisors

- Baustellen im gewählten Netz und Zeitraum zur Filterung von Strecken,
- Dokumentation/Help Desk (in englischer Sprache) als Online-Hilfe.

Während des Bereitstellungszeitraums bestand die Möglichkeit, den Produkt-Support zu nutzen (support.realtime@ptvgroup.com), um technische Fehler zu melden und inhaltliche Fragen zu stellen.

Zu Beginn des Bereitstellungszeitraums hat eine Schulung auf dem bereitgestellten System in Form eines interaktiven Webinars stattgefunden. Eine Aufzeichnung des Webinars und der verwendete Foliensatz wurden dem Betreuerkreis zur Verfügung gestellt.

6.5 Nutzungsbedingungen der beschafften Daten

Für den Prototyp wurden folgende, in Kapitel 6.2.1 im Detail beschriebenen Daten von TomTom beschafft:

- Streckennetz: TomTom MultiNet,
- FCD-basierte historische Geschwindigkeitsdaten: TomTom Stats.

Aus dem Streckennetz von TomTom wurden folgende Informationen verwendet:

- Netzgeometrie und Streckenlänge,
- Information über Befahrbarkeit für Verkehrssysteme,
- Abbiegeinformation differenziert nach Verkehrssystem,
- Functional Road Class,
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit.

Die abgefragten historischen Geschwindigkeitsdaten umfassen je Zeitscheibe, Strecke und Richtung, aggregiert für den abgefragten Zeitraum und für die gewählten Tage unter anderem:

- Hits: Anzahl der Messungen (Stichprobengröße),
- Perzentile der Geschwindigkeit/Fahrtzeit (in 5%-Schritten),
- Freifahrtgeschwindigkeit (von TomTom ermittelter Wert)¹⁰,

- zulässige Höchstgeschwindigkeit,
- statistische Kennwerte:
- harmonischer Durchschnitt der Geschwindigkeit,
- Standardabweichung der Geschwindigkeit,
- Standardabweichung der Fahrtzeit.

Die Daten von TomTom dürfen von der BAST und den Mitgliedern des Betreuerkreises ausschließlich im Rahmen dieses Forschungsprojekts für Analysezwecke während des Bereitstellungszeitraums verwendet werden. Alle Nutzer haben eine diesbezügliche Lizenzvereinbarung unterschrieben. Der Auftragnehmer hat einen entsprechenden Vertrag mit TomTom geschlossen. Die Nutzungslizenz endet mit dem Ende des Bereitstellungszeitraums. Es fallen keine zusätzlichen Kosten an.

Für die Dauerzählstellen, die auf dem ausgewählten Streckennetz liegen, wurden von der Verkehrstatistik der BAST vorläufige Zählwerte aus dem Zeitraum April bis September 2018 bereitgestellt. Für den ausgewählten Untersuchungszeitraum (16.-22.04.2018) wurden diese Daten aufbereitet und im System zur Verfügung gestellt. Diese Daten dürfen nur im Rahmen dieses Forschungsprojekts verwendet werden. Es fallen keine zusätzlichen Kosten an.

Die verwendeten Baustelleninformationen wurden aus den Meldungen geplanter Baustellen mit 4 und mehr Tagen Dauer von Baden-Württemberg an das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der sogenannten Baubetriebsplanung zur Verfügung gestellt. Es wurden nur Baustelleninformationen im Prototyp verwendet, die im oben beschriebenen Streckennetz lagen und im ausgewählten Untersuchungszeitraum (16.-22.04.2018) in Betrieb waren. Diese Daten dürfen nur im Rahmen dieses Forschungsprojekts verwendet werden. Es fallen keine zusätzlichen Kosten an.

6.6 Bewertung des Prototyps

Am Ende des Bereitstellungszeitraums wurde eine Evaluierung des Prototyps durch den Betreuerkreis durchgeführt. Dafür wurde ein Fragebogen entworfen, der vorab im Betreuerkreis diskutiert wurde. Ziel der Evaluierung war es, herauszufinden, wie die Nutzer das System bewerten, wobei nicht die verwendete Software als solche, sondern die beispielhafte Umsetzung eines solchen Systems be-

wertet werden sollte. Die ersten 5 Punkte sind darauf ausgerichtet, die Bewertung aus Sicht eines potenziellen Nutzers (z. B. eines Anwenders in einer Verkehrsmanagementzentrale) abzufragen. Die letzten drei Punkte zielen auf eine Bewertung aus Sicht eines (politischen) Beraters ab.

Fragebogen

Teil 1: Aus Sicht des Nutzers

1. Nützlichkeit

- Würde Ihnen ein solches KPI-System die Arbeit erleichtern?
- Welche Aspekte bewerten Sie positiv?
- Welche Aspekte bewerten Sie negativ?

2. Art der Nutzung

- Wofür würden Sie es einsetzen?
- Für welche Anwendungsfälle ist es aus Ihrer Sicht besonders gut geeignet?
- Für welche Anwendungsfälle kann es aus Ihrer Sicht nur eingeschränkt oder gar nicht eingesetzt werden?

3. Nutzungshäufigkeit

- Wie oft würden Sie es benutzen (täglich, x-mal pro Woche...)?
- Was wären Hemmnisse für die regelmäßige Nutzung?
- Wie müsste das System gestaltet sein, damit Sie es regelmäßig nutzen?

4. Funktionsumfang

- Welche Funktionen würden Sie sich von einem KPI-System wünschen?
- Welche Funktionen haben Sie konkret im Prototyp vermisst?

5. Sonstige Anmerkungen

Teil 2: Aus Sicht des Beraters

6. Eignung des Systems für die definierten Anwendungsfälle:

- Für welche Anwendungsfälle ist es aus Ihrer Sicht geeignet?

- Für welche Anwendungsfälle kann es aus Ihrer Sicht nur eingeschränkt oder gar nicht eingesetzt werden?

7. Aussagefähigkeit

- Welche Aussagen lassen sich aus Ihrer Sicht durch ein solches KPI-System treffen?
- Für welche Fragestellungen liefert ein solches System keine ausreichende Grundlage?

8. Sonstige Anmerkungen

Auswertung der Antworten

Zu 1. Nützlichkeit

Grundsätzlich wird die Frage nach der Nützlichkeit positiv beantwortet. Es wird die Möglichkeit der Fusion verschiedener Datenquellen angeführt, durch die die meisten Anforderungen erfüllt werden können, wobei aber auch Schwachstellen für bestimmte Anwendungsfälle genannt werden (siehe unten!).

Aus Sicht des Nutzers werden folgende positive Aspekte genannt:

- Vielfältigkeit der berücksichtigten Parameter,
- Echtzeit-Charakter,
- bestimmte Aufgaben/Analysen, die so noch nicht möglich waren, werden ermöglicht,
- netzweite Anwendungsmöglichkeit,
- flexible Nutzung durch den Anwender,
- Dashboard mit Kachel-Optik, in dem die eigenen bzw. relevanten KPI dargestellt werden können,
- Kartendarstellung und Menüführung rund um die Layer (active Layer, Layer Library),
- Vielzahl von Einstellungs- und Filtermöglichkeiten, die eine spezifische KPI-Erstellung ermöglichen,
- Möglichkeiten, mit den Daten zu spielen und KPIs zu erzeugen.

Folgende negativen Aspekte aus Nutzersicht werden benannt:

- Mangelnde Vergleichbarkeit der KPIs untereinander.
- Bezug zu bzw. Vergleichbarkeit mit bekannten Quellen wie Google oder TomTom fehlt.

- Flexible Nutzung wird auch als Nachteil genannt, da der Prototyp jeden mathematischen Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Größen abbildet, egal ob dieser fachlich sinnvoll sei oder nicht. Es wird vorgeschlagen, systeminterne Prüfungen in eine dann fortentwickelte Software einzubauen bzw. mindestens ein Set sinnvoller, vermutlich häufiger zur Abfrage kommender KPI vordefiniert anzubieten.
- Vielfalt von Funktionen und Einstellungsmöglichkeiten und auch das grundsätzliche Design der Software verringere die Übersichtlichkeit und Bedienbarkeit.
- Mangelnde intuitive Bedienung und Übersichtlichkeit (Expertensystem mit vielen Einstellungsmöglichkeiten).

Zu 2. Art der Nutzung

Es werden folgende Einsatzmöglichkeiten genannt:

- Bewertung der Infrastrukturen,
- Bewertung der Steuerungsmaßnahmen,
- Routenplanung,
- Forschungsprojekte zur Verkehrsqualität/ Zuverlässigkeit,
- Vorranging im Bereich Qualitätsmanagement zur Messung der gemeinsamen Wirkung aller getätigten Verkehrsmanagementmaßnahmen,
- Analyse und Bewertung bestehender Engpässe im Netz, deren verkehrliche Auswirkungen und der Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen im Vorher-Nachher-Vergleich,
- für die genannten Anwendungsfälle geeignet (unter den unter 4. und 5. genannten Randbedingungen, wie z. B. Vordefinition gängiger KPI-Definitionen),
- Identifikation von Störungen im Verkehrsablauf,
- Monitoring des Verkehrsablaufs ausgewählter Strecken, z. B. bei Arbeitsstellen oder an bekannten Konfliktpunkten (z. B. hochfrequentierte Knotenpunkte),
- Analyse der Auslastung von Umleitungsstrecken bei Sperrungen (sowohl strecken- als auch korridorbezogen) und
- Analyse der Stauanfälligkeit von Strecken.

Für folgende Einsatzmöglichkeiten erscheint das System besonders gut geeignet:

- Bewertung der Steuerungsmaßnahmen,
- Routen-/Reisezeitplanung,
- Allgemein Monitoring und Identifikation von Störungen (QM).

Für folgende Einsatzmöglichkeiten erscheint das System nicht gut geeignet:

- Die Bewertung der aktuellen Netzverfügbarkeit im Betrieb wird kritisch gesehen, solange die Frage der Bereitstellung aktueller Verkehrsmengen nicht umfassend gelöst ist.
- Aussagen zu Verkehrsstärken und -belastung anhand der Probe Counts.
- Die Anwendungen Eckwerte und Engpassanalyse können nur bedingt mit diesem Werkzeug bearbeitet werden, weil die Möglichkeit der zeitlichen Aggregation nur über Umwege zu erreichen ist. Der Prototyp bleibe, seiner Herkunft geschuldet, auf die Real-Time-Anwendung ausgerichtet.

Zu 3. Nutzungshäufigkeit

Je nach Anwendung würde ein solches System täglich angewendet werden, wie etwa für die Stör- und Engstellen-Analyse (ggf. verteilt auf mehrere Verkehrsingenieure). Im Qualitätsmanagement und zu Analysezwecken würde es mindestens monatsweise oder wöchentlich genutzt werden.

Als Hemmnisse für die regelmäßige Nutzung werden genannt:

- mangelnde Verfügbarkeit (es sollte eine jederzeit verfügbare Webanwendung mit werktäglichem Support sein)
- Komplexität der Bedienung des Systems
- Sprachbarrieren (derzeit ist keine deutsche Version verfügbar)

Damit ein solches System regelmäßig genutzt wird, sollten einige Bedingungen erfüllt sein. Hierzu werden folgende Aspekte angeführt:

- Intuitivere Bedienoberfläche und Menüführung,
- Tutorial mit Erklärung zur Erstellung der verschiedenen möglichen KPI,

- gegebenenfalls (individuelle) Schnellbausteine für Standardfälle.
- Die Aktualität des Netzes ist durch regelmäßige Netzupdates sicherzustellen (der verhältnismäßig große Net-Matching-Aufwand sollte sich nicht im Betrieb der Anwendung bemerkbar machen).
- Für eine richtige Interpretation der Ergebnisse des Systems wird als zwingende Voraussetzung angeführt, dass alle im System verwendeten Datenquellen eindeutig beschrieben sind. Das gelte insbesondere für die Bedeutung der einzelnen FCD-Produkte und deren Herleitung (sofern bekannt gegeben) sowie für die erforderlichen Verkehrsmengendaten.
- Die im Prototyp bisher verwendete Hochrechnung der TomTom-Hits wird als nicht zielführend für das endgültige System bewertet (zumindest nicht durch einheitliche Hochrechnung), auch wenn keine geeignete Alternative in Sicht sei. Die Verwendung aktueller (stichprobenhafter) Verkehrsmengen sei aber Musterganglinien vorzuziehen, denn im unerwarteten Störfall (Baustelle, Unfall) seien Fehler in der Schätzung etwa der Gesamtverlustzeiten zu erwarten. Als mögliche Lösung wird angegeben, dort wo vorhanden, aktuelle Daten aus Messstellen zu verwenden und kontinuierlich für alle Strecken und Zeiten das Verhältnis gemessener Verkehrsmenge zur TomTom-Hits zu analysieren und dann deutlich disaggregierter in Bezug auf Zeit und Raum Hochrechnungsfaktoren vorzuhalten, wenn für einen Streckenabschnitt keine aktuellen messbaren Gesamtverkehrsmengen vorliegen.
- Übertragbarkeit aller Funktionen bei einem potenziellen FCD-Anbieterwechsel sollte sichergestellt sein.
- Bereitstellung eines Benutzer- und Betriebshandbuchs,
- Möglichkeiten, Daten zur Nachbereitung herunterzuladen (im Prototyp vorhanden),
- Kontinuierliche Darstellung von Echtzeitdaten zur Darstellung des Level of Service, des Zeitverlusts etc. für das ganze Netz – gegebenenfalls via Karte auswählbar (derzeit für die Geschwindigkeiten in der Karte als Layer darstellbar),
- Analysemöglichkeit zu den volkswirtschaftlichen Kosten eines Ereignisses (abgeleitet aus Verlustzeitsumme für Pkw und Lkw),
- Vergleichsanalyse zur Frage, welche Baustellenverkehrsführung die geringsten volkswirtschaftlichen Kosten verursacht (Prognose basierend auf ex-post Analysen vergangener Ereignisse) für das Slot-management.

Folgende Funktionen wurden im Prototyp-System vermisst:

- Kurzzeitprognose.

Zu 6. Eignung des Systems für die definierten Anwendungsfälle

Für folgende Anwendungsfälle wird das System als geeignet angesehen:

- Identifikation von Engstellen zur Engpassanalyse,
- Auswirkung von Baustellen,
- Unterstützung von Verkehrsmanagement-Systemen,
- Realtime Verkehrsmanagement,
- Auswertung/Statistik zum Anwendungsfall Eckwerte,
- Verfügbarkeitsermittlung: nachträgliche Analyse.

Für folgende Anwendungsfälle wird das System nur als eingeschränkt oder als gar nicht einsetzbar bewertet:

- Engpassanalyse (eingeschränkt nutzbar),
- Verfügbarkeitsermittlung: Erhaltungsmanagement, ÖPP (eingeschränkt nutzbar).

Zu 4. Funktionsumfang

Folgende Funktionen werden gewünscht:

- Bezug zu/Vergleichbarkeit mit handelsüblichen Bewertungen (Google, Tom Tom),
- Lang- und Kurzzeitprognose,
- Vordefinition gängiger KPI,
- Dokumentation der Definition aller Eingangsdaten und vordefinierter KPI,
- Abbildung der Verlustzeiten und darauf basierender KPI auch in den Rampen (insbesondere in Autobahnkreuzen/-dreiecken), wegen der dort häufig auftretenden Engpässe im Netz,

Zu 7. Aussagefähigkeit

Auf die Frage, welche Aussagen sich durch ein solches KPI-System treffen lassen, werden folgende Punkte genannt:

- Schätzung der Fahrtzeit für kurze Routen,
- Leichtigkeit des Verkehrs: Identifikation von stör anfälligen Strecken,
- Verfügbarkeit: Analyse von Einflüssen aus Baustellen und anderen Störungen (z. B. Witterung),
- Allg. Statistiken, z. B. Staustunden (Eckwerte).

Keine ausreichende Grundlage liefert das System dagegen für die folgenden Fragestellungen:

- Stauprognose,
- Aussagen, für die Verkehrsstärken oder verbindungsbezogene Daten zugrunde gelegt werden müssen/sollten. Diese erfordern anderen Datenquellen als Grundlage. Ein KPI-System kann aber unterstützend wirken, vor allem hinsichtlich einheitlicher Daten.

6.7 Fazit zur prototypischen Umsetzung

Für die prototypische Anwendung wurde auf eine bestehende Software (PTV Optima) aufgesetzt, die an die Anforderungen des Prototyps angepasst wurde. Es hat sich gezeigt, dass die Software für den Aufbau eines KPI-Systems grundsätzlich geeignet ist, auch wenn für die Abdeckung aller Anforderungen Erweiterungen der Software erforderlich sind. Hier sei insbesondere auf die derzeit fehlende Möglichkeit hingewiesen, innerhalb der Software Analysen zu aggregierten und historischen Daten durchzuführen.

Mit der gewählten Vorgehensweise konnte die grundsätzliche Machbarkeit eines KPI-Systems prototypisch demonstriert werden. Allerdings wurde der Echtzeit-Betrieb lediglich mit historischen Daten simuliert. Insofern liefert die Demonstration keine Erkenntnisse zu eventuellen Fragen wie Antwortzeiten, Ausfallsicherheit oder Übermittlung eventuell fehlerhafter Daten. Weiterhin zeigt der Prototyp auch die Bedeutung flächenhaft vorliegender Verkehrsstärkedaten. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf zur Frage der Robustheit der Hochrechnung aus FCD-Hits, sofern keine flächende-

ckenden Werte aus stationären Streckendetektoren vorliegen, bzw. zur erforderlichen Abdeckung mit Detektoren.

7 Zusammenfassung und Fazit

Es gibt nicht die eine relevante Kenngröße zur Beschreibung der Verkehrsablaufqualität auf Autobahnen. Je nach Fragestellung und Datengrundlagen können unterschiedliche Kenngrößen relevant sein. Der Bericht stellt unterschiedliche Kenngrößen vor und spricht Empfehlungen für die Auswahl von Kenngrößen aus.

Die zur Verfügung stehenden Datenquellen (Daten kommerzieller Anbieter oder Daten von betreiberbetriebenen Datenerfassungssystemen) sind umfangreich und vielfältig. Der Bericht beschreibt die aktuell zur Verfügung stehenden Datenquellen mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen und untersucht auch hybride Systeme.

Es gibt zahlreiche Anwendungsfelder für KPI-Informationen. Der Bericht klassifiziert diese Anwendungsfelder hinsichtlich ihrer zeitlichen, räumlichen und inhaltlichen Detaillierung. Es werden die vier Anwendungsfälle Eckwerte, Engpassanalyse, Verfügbarkeit und Real-Time definiert und untersucht.

Zur Systemauswahl werden die Kosten zum Aufbau eines deutschlandweiten Systems für die denkbaren Datenquellen abgeschätzt. Hier zeigt sich, dass die kommerziellen Daten (FCD und FPD) durch die nicht erforderliche Investition in Erfassungsinfrastuktur (z. B. ANPR oder Detektordaten) deutlich geringere Kosten erzeugen.

Ergänzend werden die Nutzen der Datenquellen für die beschriebenen Anwendungsfälle beispielhaft bewertet. In einer Wirksamkeits-Kosten-Analyse werden die Nutzen den Kosten exemplarisch gegenübergestellt. Hier zeigt sich, dass tendenziell FCD die höchste Wirtschaftlichkeit aufweisen. Je nach Anwendungsfall liefern hybride Systeme einen praktikableren und realitätsnahen Ansatz zur Implementierung von KPI-Systemen. Der Bericht vergleicht sechs hybride Lösungen, die mit der jeweiligen Kombination von Erfassungsmethoden speziell für bestimmte Anwendungsfälle konzipiert sind oder bestimmte räumliche Besonderheiten berücksichtigen. Für die Bewertung dieser Systeme wurde nicht der WKQ verwendet, sondern ein Vergleich von Zusatznutzen und Zusatzkosten gegenüber einem Ba-

sisfall durchgeführt. Im Ergebnis zeigt sich, dass tendenziell durch die individuelle Kombination von Datenerfassungsmethoden kostengünstige Systeme aufgebaut werden können, mit denen anwendungsfallspezifische KPI ermittelt werden können. Für die Anwendung in der Praxis sollten die jeweiligen Entscheidungsträger alle Kostenannahmen sowie Gewichtungsfaktoren für die Anforderungserfüllung aus ihrer Sicht prüfen und die Kostenannahmen durch eigene Kostenkalkulation unter Annahme eines angestrebten Ausbaubedarfs ersetzen. Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte Berechnungswerkzeug auf Excel-Basis ist dem Bericht beigelegt. Mit diesem Werkzeug lassen sich alle getroffenen Annahmen zu Kosten und Nutzen und die Gewichtung in Bezug auf die Anwendungsfelder flexibel anpassen, um verschiedene Szenarien zu berechnen.

Literatur

- HBS (2015), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV(Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS, Köln
- RIN (2008), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV(Hrsg.): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN, Köln
- ADAC (2018): Staubilanz 2017. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_staubilanz_231552.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2018
- ALVAREZ, P.; HADI, M. (2012): Time-Variant Travel Time Distributions and Reliability Metrics and Their Utility in Reliability Assessments, Transportation Research Record 2315 Heft 1, S. 81–88. DOI: 10.3141/2315-09
- ASAKURA, Y.; KASHIWADANI, M. Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow. In: Planning and Transport Research and Computation (International) Co.
- Bayerischer Landtag (2012): Dauer der Staus auf Autobahnen in Bayern. Hg. v. Drucksache 16/13434. Online verfügbar unter [https://www.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP16/Drucksachen/Schriftliche %20Anfragen/16_0013434.pdf](https://www.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP16/Drucksachen/Schriftliche%20Anfragen/16_0013434.pdf), zuletzt geprüft am 22.10.2018
- BELL, M. G.H.; CASSIR, C.; IIDA, Y.; LAM, W. H.K. (1999): A sensitivity based approach to network reliability assessment, In 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory p. 283-300
- BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030. Hg. v. BMVI, Berlin
- BOLTZE, M.; HESS, R.; ROOS, R.; BALLUFF, J. (2014): Konzeption eines integrierten Qualitätsmanagements für das Straßen- und Verkehrswesen, Straßenverkehrstechnik. 58. 607-613
- BRILON, W.; ESTEL, A. (2008): Differenzierte Bewertung der Qualitätsstufen im HBS im Bereich der Überlastung (Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 999)
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J. (2007): Modellierung von Dauerlinien und Ganglinien der Verkehrsnachfrage im Autobahnnetz, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H. (2003a): Overload probabilities and traffic activity as design criteria for road traffic systems(Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik), Bonn
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H. (2003b): Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 870
- California Transportation Plan (1998): Transportation System Performance Measures. Hg. v. California Transportation Plan
- COHN, N. (2014): TomTom Traffic Index: Toward a Global Measure, France Paris
- DAGANZO, C. F. (1994): The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory, Transportation Research Part B: Methodological 28 Heft 4, S. 269–287. DOI: 10.1016/0191-2615(94)90002-7
- ESTEL, A. (2009): Differenzierte Bewertung des Verkehrsablaufs auf Straßenverkehrsanlagen im Bereich der Überlastung (Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum)

- Federal Highway Administration (2006): Travel Time Reliability: Making It There on Time, All The Time. Online verfügbar unter https://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/
- FRIEDRICH, B.; BENNECKE, A.; FRIEDRICH, M.; LOHMILLER, J. (Hg.) (2015): Zeitabhängige Bewertung der Verbindungsqualität und der Zuverlässigkeit in Straßennetzen [Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 18.0019/2007], Deutschland, Bremen: Fachverl. NW (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1118)
- FRIEDRICH, M.; JEHLICKA, P.; SCHLAICH, J. (2005-2009): Forschungsprojekt Do-IT: Datenoptimierung für integrierte Telematik unterstützt und gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/633613509.pdf>, zuletzt geprüft am 24.10.2018
- FRIEDRICH, M.; JEHLICKA, P.; SCHLAICH, J. (2009): Erfassung von Verkehrsdaten mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Straßenverkehrstechnik, Heft 12, S. 789-795, Kirschbaum Verlag, Bonn
- FRIEDRICH, M.; LOHMILLER, J.; PILLAT, J. (2011-2013): Wetterabhängige Kalibrierung von Verkehrsmodellen für eine optimierte Verkehrssteuerung: Forschungsprojekt WOLKE Laufzeit: 01.01.2011-30.06.2013: unterstützt und gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
- GEISTEFELDT, J. (2005): Schätzung von Reisezeiten auf Autobahnen unter Verwendung eines erweiterten Verkehrsflussmodells, Tagungsband zur HEUREKA
- GEISTEFELDT, J.; GUILIANI, S.; BUSCH, F.; SCHENDZIELORZ, T.; HAUG, A.; VORTISCH, P. et al. (2017): HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen, Bremen: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrstechnik, Heft V 279)
- INRIX Research (2018): INRIX Global Traffic Scorecard. Online verfügbar unter https://www.dmagazine.com/wp-content/uploads/2018/02/INRIX_2017_Traffic_Scorecard_Final_2.pdf
- KERNER, B.; REHBORN, H.; ALEKSIC, M.; HAUG, A.; LANGE, R. (2000): Verfolgung und Vorhersage von Verkehrsstörungen auf Autobahnen mit ASDA und FOTO im online-Betrieb in der Verkehrsrechnerzentrale Rüsselsheim, Straßenverkehrstechnik 10, 521–527
- KESTING, A.; TREIBER, M. (2010): Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen, Straßenverkehrstechnik 1, 5-11
- KIRSCHFINK, H.; ARETZ, C. (2009): Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.426/2007/IRB, Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik, 187)
- LOHMILLER, J. (2014): Qualität des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten von Autobahnen Bewertung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Analyse von Einflussfaktoren. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014, Stuttgart: Inst. für Straßen- und Verkehrswesen (Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 50). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-96577>
- LOMAX, T.; SCHRANK, D.; TURNER, S.; MARGIOTTA, R.; TEXAS TRANSPORTATION, I.; CAMBRIDGE SYSTEMATICS, I. (2003): Selecting travel reliability measures
- MAIER, F.; ROTH, C. (2008): Fahrzeugwiedererkennung unter Verwendung der Signaturen aus Induktivschleifendetektoren. Hg. v. Straßenverkehrstechnik Heft 2/2008
- MARGREITER, M.; SPANGLER, M.; ZEH, T.; CARSTENSEN, C. (2015): Bluetooth-Measured Travel Times for Dynamic Re-Routing
- OFFERMANN, F. (2001): Ein Neuro-Fuzzy-Modell zur Reisegeschwindigkeitsabschätzung auf Richtungsfahrbahnen basierend auf einer Fusion lokaler und fahrzeuggenerierter Verkehrsdaten, Mitteilungen des Lehrstuhls für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH Aachen
- OTTERSTÄTTER, T. (2013a): Methoden zur Erfassung von Verkehrsströmen und Fahrzeiten mit stationären fahrzeugwiedererkennenden Detektoren. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013, Stuttgart: Univ. Inst. für Straßen- und Verkehrswe-

- sen (Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 47)
- OTTERSTÄTTER, T.; FRIEDRICH, M. (2011): Ermittlung des erforderlichen Stichprobenumfangs für Fahrzeitmessungen im Straßenverkehr, Straßenverkehrstechnik Heft 11, S.701-709, Kirschbaum Verlag, Bonn
- OTTERSTÄTTER, T.; SCHLAICH, J.; MESCHINI, L. (2013b): Offline trifft Online – Verkehrsprognosen in Echtzeit, Straßenverkehrstechnik, Straßenverkehrstechnik Heft 5, 2013
- REHBORN, H.; HAUG, A.; KERNER, M.; ALEKSIC, M.; FASTENRATH, U. (2003): Floating Car Data und Verfahren zur Erkennung und Verfolgung von zeitlich-räumlichen Verkehrsmustern, Straßenverkehrstechnik Heft 09/2003
- ROUPHAIL, N.; SCHROEDER, B.; EADS, B. (2011): HCM2010 Chapter 10 Freeway Facilities User's Guide to FREEVAL2010. HCM2010
- SCHLAICH, J.; OTTERSTÄTTER, T.; FRIEDRICH, M. (2011): Mobilfunkdaten im Verkehrswesen. Hg. v. Straßenverkehrstechnik Heft 2 und Heft 3
- SCHRECKENBERG, M.; CHROBOK, R.; HAFSTEIN, S.; POTTMEIER, A. (2005): OLSIM-Traffic Forecast and Planning using Simulations, In ASIM (Vol. 17, pp.11-18)
- SHRP, 1. (2012): Level of Service Concepts for Travel Time Reliability. Hg. v. Strategic Highway research program (SHRP) 2 L08, Transportation research Board Washington D.C.
- SHRP, 2. (2013a): Analytical Procedures for Determining the Impacts of Reliability Mitigation Strategies, Washington, D.C.: Transportation Research Board
- SPANGLER, M. (2009): Reisezeitbasierte Verfahren für die Verkehrszustandsanalyse von städtischen Hauptverkehrsstraßen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2009, München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik Techn. Univ (Schriftenreihe/ Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, 11)
- STEINHART, M. (2015): Wie sind Funkzellen und Mobilfunknetze beschaffen? Online verfügbar unter <http://informationszentrum-mobilfunk.de/wie-sind-funkzellen-und-mobilfunknetze-beschaffen#header>
- SVT 2013 Qualitätsverbesserung im Straßenverkehr – Impulse für ein koordiniertes Qualitätsmanagement, Straßenverkehrstechnik 11.2013, S. 689 – 698, Wissenschaftlicher Beirat des BMVBS, Kirschbaumverlag, 2013
- TU, H. (2008): Monitoring travel time reliability on freeways. Zugl.: Delft, Techn. Univ., Diss., 2008, Delft: TRAIL Research School
- VAN LINT, J.W.C.; VAN ZUYLEN, H. J. (2005): Monitoring and Predicting Travel Time Reliability: Using Width and Skew of Day-to-Day Travel Time Distribution. In Transportation Research Record. Hg. v. Journal of the Transportation Research Board, No. 1917, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- VAN LINT, J.W.C.; VAN ZUYLEN, H. J.; TU, H. (2008): Travel time unreliability on freeways Why measures based on variance tell only half the story, Transportation Research Part A: Policy and Practice 42, S. 258–277
- ZURLINDEN, H. (2003): Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Straßen. Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2003, Bochum: Lehrstuhl für Verkehrswesen Ruhr-Universität (Schriftenreihe/ Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, H. 26)

Bilder

- Bild 1-1: Vorgehensweise
- Bild 2-1: Ableitung von Fahrtzeitverteilungen aus Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen
- Bild 2-2: Einfluss der Nachfragegewichtung auf das Ergebnis
- Bild 2-3: Klassen von Fahrtzeitermittlungsmodellen im Individualverkehr
- Bild 2-4: Zeitlich-räumliche Betrachtung von Einzelfahrzeugen (eigene Abbildung)
- Bild 2-5: Zellulärer Aufbau eines Mobilfunknetzes
- Bild 2-6: Fahrtzeiten zwischen Stuttgart und Walldorf (über Karlsruhe) und Aufteilung in die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw (SCHLAICH et al., 2011)

- Bild 2-7: Schematischer Ablauf einer Kennzeichenerkennung (FRIEDRICH et al., 2009)
- Bild 2-8: Mittlere Zeit-Weg-Trajektorien in einer Heatmap, in der Geschwindigkeiten abhängig von Ort und Zeit eingetragen werden.
- Bild 2-9: Beispiel einer Clusterung von Tagesganglinien einer Dauerzählstelle. Die Clusterung ergibt 24 Cluster mit typischen Verkehrstagen (Bild oben). Drei dieser Cluster (Nummer 6, 19 und 20) sind unten als mittlere Ganglinie des Clusters und als Einzelganglinien dargestellt.
- Bild 2-10: Beispiel einer Darstellung von Zuverlässigkeitskenngrößen in einem monatlichen Staubericht (Bildquelle: Federal Highway Administration, 2006)
- Bild 3-1: Schematische Übersicht der Anwendungsfelder
- Bild 4-1: Untersuchungsraum des Forschungsprojekts Wolke (Quelle: Verkehrsinformationsagentur Bayern (VIB))
- Bild 4-2: Geschwindigkeitsverteilungen (15-min-Intervalle) eines ausgewählten Tages (Freitag 04.03.2011) für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal
- Bild 4-3: Geschwindigkeitsverteilungen (15-min-Intervalle) für alle Werktage (01.03.2011 bis zum 31.12.2011) für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal
- Bild 4-4: Geschwindigkeitsverteilungen (15-min-Intervalle) für alle Samstage (01.03.2011 bis zum 31.12.2011) für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal
- Bild 4-5: Geschwindigkeitsverteilungen und ausgewählte Kenngrößen der Fahrzeitzuverlässigkeit (Fahrzeitindex, Pünktlichkeitsindex und Verlustzeit pro Kilometer) für alle Tage (01.03.2011 bis zum 31.12.2011) für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal. (Bildquelle: FRIEDRICH et al., 2011-2013).
- Bild 4-6: Vergleich der Stichprobengröße zwischen ANPR und Bluetooth
- Bild 4-7: Vergleich der Geschwindigkeiten aus ANPR und Bluetooth (BT) für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal (03.03.2011, 15-min-Intervalle)
- Bild 4-8: Vergleich zwischen ANPR und ASDA/FOTO für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal (Freitag 04.03.2011, 15-min-Intervalle)
- Bild 4-9: Vergleich zwischen ANPR und ASDA/FOTO für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal (Samstag 05.03.2011, 15-min-Intervalle)
- Bild 4-10: Vergleich zwischen ANPR und ASDA/FOTO für den Streckenzug Hofolding Forst – AD Inntal (Mittwoch 27.04.2011, 15-min-Intervalle)
- Bild 4-11: Beispiele für eine Zustandserfassung mit Mobilfunkdaten (Quelle: Projekt „Do-IT: Datenoptimierung für integrierte Telematik“ (FRIEDRICH et al., 2005-2009)
- Bild 4-12: Heatmap mit Zeit-Weg-Trajektorien in 1-Minuten-Abständen für den Mittelwert der Geschwindigkeit aus TomTom-Daten in einer zeitlichen Aggregation von 5 Minuten für den Streckenzug Dreieck Karlsruhe – Dreieck Leonberg am Donnerstag, den 19.04.2018
- Bild 4-13: Fahrzeitverteilungen aus den Zeit-Weg-Trajektorien (alle 1 min) für den Mittelwert aus TomTom-Daten in einer zeitlichen Aggregation von 5 Minuten für den Streckenzug Dreieck Karlsruhe – Dreieck Leonberg am Donnerstag, den 19.04.2018
- Bild 5-1: Vorgehensweise Kosten-Nutzen-Analyse
- Bild 5-2: Diagramm beispielhafter Wirksamkeits-Kosten-Quotienten für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse
- Bild 5-3: Diagramm beispielhafte Nutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse
- Bild 5-4: Beispielhafte Zusatznutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen je Anwendungsfall für hybride Systeme

- Bild 6-1: Netzauswahl des Prototyps (PTV Optima) inkl. Dauerzählstellen der BAST (Datenquelle: TomTom, Hintergrundkarte: Open Street Map)
- Bild 6-2: KPI Einstellungsmöglichkeiten (PTV Optima)
- Bild 6-3: Links: Räumliche Aggregation mit vordefinierten Pfaden am Beispiel der A8 (links); rechts: Anschlussstelle Ludwigsburg auf der A81 (Hintergrundkarte: Open Street Map)
- Bild 6-4: Räumliche Aggregation mit Gebietsauswahl am Beispiel des Walldorfer Kreuzes (A5/A6), (PTV Optima, Hintergrundkarte: Open Street Map)
- Bild 6-5: Visualisierungsmöglichkeiten von KPI im KPI Dashboard (PTV Optima, Hintergrundkarte: Open Street Map)
- Bild 6-6: Visualisierungsmöglichkeiten von KPI im KPI Dashboard (PTV Optima, Hintergrundkarte: Open Street Map)
- Bild 6-7: Startansicht des PTV Optima Traffic Supervisors
- Tab. 2-12: Verlustzeit pro Kilometer
- Tab. 2-13: Verlustzeitaufwand und Verlustzeitdichte
- Tab. 2-14: Kenngrößen der Verkehrsnachfrage
- Tab. 2-15: Übersicht über FCD-Datenquellen und Dateninhalte
- Tab. 2-16: Verfahren der Fahrtzeitermittlung (abgeleitet aus FRIEDRICH et al., 2015)
- Tab. 2-17: Bewertung der Verfahren der Fahrtzeitermittlung für die Ermittlung von Fahrtzeiten und Fahrtzeitverteilungen auf Teilstrecken, Strecken, Netzabschnitten und Relationen im Autobahnnetz
- Tab. 2-18: Übersicht über Datenquellen und Methoden zur Ermittlung von Verkehrsstärken

Tabellen

- Tab. 3-1: Überblick Anwendungsfälle
- Tab. 4-1: Anforderungen zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität und Bewertung der Anforderungserfüllung
- Tab. 4-2: Anforderungen zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage und Bewertung der Anforderungserfüllung
- Tab. 4-3: Anforderungen beim Einsatz unter verschiedenen Bedingungen und Bewertung der Anforderungserfüllung
- Tab. 4-4: Anforderung an die Qualität und Bewertung der Anforderungserfüllung
- Tab. 4-5: Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung und Bewertung der Anforderungserfüllung
- Tab. 4-6: Weitergehende Anforderungen und Bewertung der Anforderungserfüllung
- Tab. 4-7: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf ANPR-Daten
- Tab. 4-8: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf ANPR-Daten
- Tab. 4-9: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf Bluetooth-Daten (BT)
- Tab. 2-1: Bezeichnung von Fahrtzeiten
- Tab. 2-2: Kenngrößen der Fahrtzeitzuverlässigkeit
- Tab. 2-3: Buffer-Time-Index und Misery-Index
- Tab. 2-4: Fahrtzeitindex und TomTom-Traffic-Index
- Tab. 2-5: Fahrtgeschwindigkeitsindex
- Tab. 2-6: Variabilitätsindex
- Tab. 2-7: Fahrtzeitfenster
- Tab. 2-8: Variationskoeffizient
- Tab. 2-9: Unzuverlässigkeitsindex
- Tab. 2-10: Pünktlichkeitsindex
- Tab. 2-11: Wahrscheinlichkeit von Stauereignissen

Tab. 4-10: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf Bluetooth-Daten (BT)	Tab. 5-4: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung
Tab. 4-11: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf stationären Detektordaten	Tab. 5-5: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)
Tab. 4-12: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf stationären Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung	Tab. 5-6: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)
Tab. 4-13: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)	Tab. 5-7: Kriterienerfüllungsgrad
Tab. 4-14: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf Mobilfunkdaten (FPD)	Tab. 5-8: Vorgeschlagene Gewichtungsfaktoren zur Bewertung der Datenerfassungsmethoden
Tab. 4-15: Aufbau eines KPI-Systems basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)	Tab. 5-9: Beispielhafte Ergebnisse der Nutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen
Tab. 4-16: Erfüllung der Anforderungen bei Einsatz eines KPI-Systems basierend auf Floating-Car-Daten (FCD)	Tab. 5-10: Beispielhafte Gegenüberstellung von Nutzen und Kosten – Wirksamkeits-Kosten-Quotient für die getroffenen Annahmen und Schätzungen
Tab. 4-17: Gegenüberstellung der Anforderungen und der Anforderungserfüllung für die fünf KPI-Systeme basierend auf einer primären Datenquelle (ANPR, Bluetooth (BT), stationäre Detektordaten (SDD) mit Modellerweiterung, Mobilfunkdaten (FPD), Floating-Car-Daten (FCD))	Tab. 5-11: Beispielhafte Wirksamkeits-Kosten-Quotienten für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse
Tab. 4-18: Eigenschaften des KPI-Basissystems der Stufe 0	Tab. 5-12: Beispielhafte Nutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen – Sensitivitätsanalyse
Tab. 4-19: Eigenschaften des KPI-Systems der Stufe 1	Tab. 5-13: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 0
Tab. 4-20: Eigenschaften eines mehrstufigen KPI-Systems	Tab. 5-14: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.1 mit FCD pro Verkehrstag
Tab. 4-21: Anforderungserfüllung für sechs Ausbaustufen eines hybriden KPI-Systems	Tab. 5-15: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.2 mit FCD pro Kalendertag
Tab. 4-22: Vorschlag für die Auswahl von KPI	Tab. 5-16: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 1.3 mit kontinuierlichen FCD
Tab. 5-1: Autobahnnetz in den Bundesländern	Tab. 5-17: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.1 mit modellbasierten Fahrtzeiten
Tab. 5-2: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf ANPR-Daten	Tab. 5-18: Geschätzte Kosten eines hybriden KPI-Systems, Stufe 2.2 mit ANPR/Bluetooth
Tab. 5-3: Geschätzte Kosten eines KPI-Systems basierend auf Bluetooth-Daten (BT)	

- Tab. 5-19: Vorgeschlagene Bewertung der Zusatznutzen der hybriden Systeme im Vergleich zum Basisfall der Stufe 0
- Tab. 5-20: Vorgeschlagene angepasste Gewichtung der Anforderungserfüllung je Anwendungsfall
- Tab. 5-21: Beispielhafte Zusatznutzenbewertung für die getroffenen Annahmen und Schätzungen je Anwendungsfall für hybride Systeme mit Gegenüberstellung der Mehrkosten in Mio. EUR pro Jahr im Vergleich zum hybriden System der Stufe 0.
- Tab. 6-1: Berücksichtigte Dauerzählstellen im Untersuchungsgebiet

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2018

V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoff-rückhalt und Standfestigkeit von Banketten

Werkenthin, Kluge, Wessolek

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung

Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 303: Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer

Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke

€ 19,50

V 304: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015

Fitschen, Nordmann

€ 31,00

Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden.

€ 15,00

V 305: Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen

Hartmann, Londong

€ 16,00

V 306: Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest

Lippold, Wittig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 307: Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung

Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis

€ 17,50

V 308: Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)

Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 309: Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO₂-Pilotstudie Lärmschutzwand

Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer

€ 16,50

V 310: Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie

Wang, Oeser, Steinauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 311: Feldversuch mit Lang-Lkw

Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 312: Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen

Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

2019

V 313: Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen

Braun, Klute, Reuter, Rubbert

€ 18,50

V 314: Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten

Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler

€ 18,50

V 315: Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung

Kappich, Westermann, Holst

€ 15,50

V 316: Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände

Lindner, Hartmann, Schulze, Hübelt

€ 18,50

V 317: Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen

Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther

€ 22,00

V 318: Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen

Wolf, Berger, Bärwolff

€ 15,50

V 319: Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verdichtungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen

Lippold, Vettters, Ressel, Alber

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 320: Einsatzbereiche und Entwurfsэлеmente von Rad-schnellverbindungen

Malik, Lange, Andriess, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden

€ 18,00

V 322: Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren

Hausmann

€ 18,00

V 323: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016

Fitschen, Nordmann

€ 31,50

Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden.

€ 15,00

2020

V 321: Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement

Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner

€ 20,00

V 324: Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA

Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 325: Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete

D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 326: Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen

Schmidt, Frenken, Mahmoudi

€ 15,50

V 327: Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse

Frenken, Mahmoudi

€ 16,50

V 328: Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen

Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 329: Streckenbezogene Glättevorhersage

Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50

V 330: Führung des Radverkehrs an Landstraßen

Baier, Leu, Rittershaus

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 331: Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw

Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00

V 332: Räumliche Linienführung von Autobahnen

Lippold, Zösch

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 333: Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit

Hänisch, Heidebrunn € 17,00

V 334: Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen

Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00

V 335: Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen

Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00

V 336: Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten

Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50

V 337: Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung

Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

2021

V 338: Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs

Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 339: Aktualisierung der Datenbank MARLIS

Schneider, Turhan, Pelzer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 340: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017

Fitschen, Nordmann € 31,00

V 341: Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen

Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 342: Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz

Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 31,00

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

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