

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

FA 21.059

Forschungsstellen: PTV Planung Transport und Verkehr AG,  
Karlsruhe

Universität Stuttgart, Institut für Straßen-  
und Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. M.  
Friedrich)

Bearbeiter: Peter, L. / Janko, J. / Schick, N. /  
Waßmuth, V. / Friedrich, M. /  
Bawidamann, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digi-  
tale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: August 2020

### 1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Zu den zentralen Aufgaben eines Verkehrsinfrastrukturbetreibers gehört die Gewährleistung einer hohen Verkehrssicherheit und einer angemessenen Verkehrsablaufqualität, die ein flüssiges ("Leichtigkeit") und 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 (zum Beispiel n-te Stunde oder Hauptverkehrszeit eines typischen Werktags) bewerten. Damit sind jedoch keine Aussagen zur Fahrtzeitzuverlässigkeit oder zur Kapazitätzuverlässigkeit 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 ergeben. Neben den konventionellen stationären Verkehrsdatenerfassungssystemen ist auch die Messung von lokalen Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken oder von abschnittsbezogenen Fahrtzeiten mit stationär installierter Infrastruktur wie Kameras oder Bluetooth-Signal-Empfängern denkbar. Seit einigen Jahren stehen auch sogenannte Floating-Car-Daten zur Verfügung, die es ermöglichen, Fahrtgeschwindigkeiten im gesamten Straßennetz und zu allen Zeiten zu ermitteln.

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 (zum

Beispiel 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 Nutzen und Kosten berücksichtigt.

Daraus ergibt sich folgendes Vorgehen:

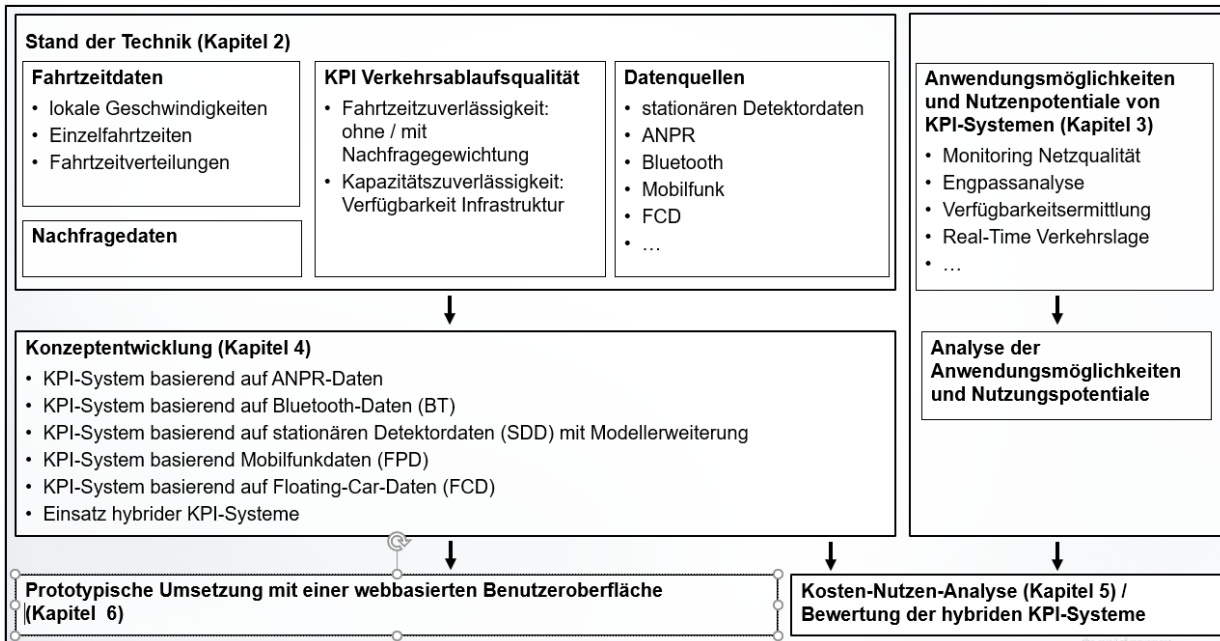
- Überblick über mögliche Datenquellen zur Berechnung von KPI,
- Beschreibung der Anwendungsmöglichkeiten KPI-basierter Bewertungssysteme,
- Erarbeitung von KPI zur Bewertung der Verkehrsablaufqualität,
- Erarbeitung von Implementierungskonzepten unter Berücksichtigung der verfügbaren Datenquellen und 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.

### 2 Untersuchungsmethodik

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 ist ein Konzept für ein KPI-basiertes Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität auf Autobahnen und gegebenenfalls auch Bundesstraßen. Der Bund kann ein solches KPI-basiertes Bewertungsverfahren für eine effizientere wirtschaftliche Planung in verschiedenen Aufgabebereichen nutzen. So soll das System Schwachstellen im Netz identifizieren und somit als Basis 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 beziehungsweise 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 beziehungsweise Prognose von Kapazitätsengpässen) oder auch zur Identifikation notwendiger Unterhaltsmaßnahmen eingesetzt werden.

Das folgende Ablaufdiagramm gibt einen Überblick über die Vorgehensweise der Untersuchung und die Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Kapiteln des Berichts:



**Bild 1: Vorgehensweise**

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 einen Anforderungskatalog systematisch aufbereitet und zu einem Gesamtkatalog zusammengefasst.

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) mit Modellerweiterung (zum Beispiel ASDA/FOTO),
- 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.

Kosten-Nutzen-Analyse (Kapitel 5): Die entwickelten Konzepte sind nach ihren Aufwänden und gesamtheitlichen Nutzen zu bewerten. 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 sind für jedes KPI-Konzept die Kosten für Aufbau und Betrieb des Systems und für die Beschaffung der benötigten Daten abzuschätzen. Bei der Datenbeschaffung kann es sich um den Erwerb kommerzieller Daten handeln oder aber auch um die Kosten für Aufstellung und den Unterhalt von Erfassungsgeräten. Die Kosten für den Aufbau und Betrieb der KPI-Systeme lassen sich in einmalige Systemaufbaukosten, laufende Betriebskosten und wiederkehrende Wartungskosten

aufteilen. Dabei sind Annahmen zum Istzustand und zum erforderlichen Ausbaubedarf zu treffen.

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 sind die einzelnen Konzepte gegenüberzustellen und untereinander zu vergleichen. Hieraus kann dann eine Rangordnung der Konzepte erstellt und eine konkrete Empfehlung zur Systemauswahl gegeben werden. In einem zweiten Schritt soll eine Bewertung der hybriden Systeme durchgeführt werden. Dabei sollen Zusatzkosten beziehungsweise zusätzliche Nutzen gegenüber einem Basisfall für jedes hybride System untersucht und die Ergebnisse gegenübergestellt werden.

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 ausgewählte KPI-Systeme aufgebaut. Der Prototyp ermöglicht es dem Nutzer, 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.

### 3 Untersuchungsergebnisse und Folgerungen für die Praxis

Die für das Forschungsziel relevanten Kenngrößen, die grundsätzlich als Key-Performance-Indikator für die Bewertung der Verkehrsablaufqualität in Frage kommen, lassen sich in drei Klassen unterscheiden:

1. Kenngrößen zur Fahrtgeschwindigkeit und Fahrtzeit – unter Berücksichtigung der möglichen Aggregationsstufen (etwa zeitlich oder räumlich) sowie der Definitionsmöglichkeiten der Soll-Fahrtzeit (abgeleitet aus der zu erwartenden Fahrtzeit oder aus einer planerisch angemessenen Geschwindigkeit).
2. Kenngrößen der Zuverlässigkeit (Quantifizierung der Abweichung der tatsächlichen Fahrtzeit – Ist-Fahrtzeit – von einer zu definierenden Soll-Fahrtzeit).
3. Kenngrößen der Verkehrsnachfrage (Quantifizierung der tatsächlichen Leistungsfähigkeit eines Verkehrsangebots und Beschreibung des Verkehrsverhaltens der Verkehrsteilnehmenden im Personen- und Güterverkehr).

Die zur Ermittlung dieser Kenngrößen erforderlichen Datenquellen und Erhebungsmethoden werden mit ihren jeweiligen Einsatzmöglichkeiten und ihren Vor- und Nachteilen untersucht. Um alle relevanten Aspekte der Verkehrsablaufqualität zu berücksichtigen, sollte ein KPI-System die in der untenstehenden

Tabelle dargestellten Kenngrößen ausweisen. Die Kenngrößen sollten nach Pkw und Lkw (beziehungsweise Leicht- und Schwerverkehr) differenziert und mit der Nachfrage gewichtet werden.

Aus der Analyse der Einsatzmöglichkeiten KPI-basierter Bewertungssysteme zur Verkehrsablaufqualität ergaben sich folgende Anwendungsfälle:

- Auswertungen zur Verkehrssituation in Eckwerten: Regelmäßige Berichte zur Bewertung der Verkehrssituation auf Basis gemessener historischer Verkehrsdaten, aggregiert ausgegeben zum Beispiel auf Bundes- oder Landesebene oder auch für ausgewählten Autobahnstrecken,
- Engpassanalyse als Grundlage für die Bedarfsplanerstellung: Übersicht über Engstellen im Fernstraßennetz unter anderem für die Bundesverkehrswegeplanung,
- Verfügbarkeitsermittlung als Grundlage zur Baustellenoptimierung und zur Erhaltungsplanung oder auch im Rahmen der Abrechnung von ÖPP-Projekten,
- Verkehrsmanagement (Real-Time): Bereitstellung von aktuellen Verkehrslageinformationen als Basis für die Verkehrssteuerung und -beeinflussung, transparente und unabhängige Informationsquellen für Echtzeitdaten für Verkehrsinfrastrukturbetreiber.

Tabelle 1: Vorschlag für die Auswahl von KPI

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
Fahrtzeitindex	[-]	$f_{si}^{TTI,P50} = \frac{t_{si}^{P50}}{\underset{i \in I}{MIN} (t_{si}^{P50})}$	beschreibt die bei regelmäßigen Störungen üblicherweise zu erwartende Fahrtzeitverlängerung "planmäßige oder regelmäßige Verlustzeit"
Zuverlässigkeitsindex bezogen auf ein Perzentil	[-]	$f_{si}^{RI,P90} = \frac{t_{si}^{P90}}{t_{si}^{P50}}$	beschreibt die bei unregelmäßigen Störungen zu erwartende Fahrtzeitverlängerung "unplanmäßige Verlustzeit"
Zuverlässigkeitsindex bezogen auf den Mittelwert	[-]	$f_{si}^{RI,Mean} = \frac{t_{si}^{Mean}}{t_{si}^{P50}}$	beschreibt das Verhältnis von typischer und mittlerer Fahrtzeit
Pünktlichkeitsindex	[-]	$f_{st}^{PI,WT} = \frac{\sum_{i \in I} f(t_{si}^{Curr}, t_s^{Target})}{I}$ $f(t_i^{Curr}, t_i^{Target}) \begin{cases} 1, & \text{wenn } t_i^{Curr} \leq t_i^{Target} \\ 0, & \text{wenn } t_i^{Curr} > t_i^{Target} \end{cases}$	beschreibt die Verfügbarkeit der Verkehrsanlagen (Betreibersicht)
$i \in I$	Menge / der Zeiträume $i$ eines Tages, zum Beispiel $I = 96$ bei Zeiträumen der Länge 15 Minuten		
$s \in S$	Menge $S$ der Strecken (oder Teilstrecken) $S$ eines Streckenzugs $S$		

Die folgende Tabelle fasst als Ergebnis der Analyse die einzelnen Anwendungsfälle vergleichend zusammen:

Tabelle 2: Überblick Anwendungsfälle

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

Für die Konzeptentwicklung werden aus den Erkenntnissen zu Datenquellen und Erhebungsmethoden und aus der Analyse der Anwendungsfälle die Anforderungen an ein KPI-System definiert. Für jedes Konzept werden folgende Eigenschaften untersucht:

- Erfassung der Verkehrsablaufqualität (räumliche und zeitliche Aggregation, Differenzierung nach Pkw und Lkw etc.),
- Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage (Nachfragegewichtung der KPI bezogen auf Personen, Fahrzeuge oder Fahrzeugklassen und andere),
- Eignung 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),
- Qualität, die das Konzept bereitstellen soll (Genauigkeit, Latenzzeit bei Real-Time-Daten, Stichprobenumfang, Robustheit etc.),
- Anforderungen an Datenaufbereitung und Datenhaltung (Einhaltung des Datenschutzes, Transparenz der Datenaufbereitung, Qualität der erfassten Daten, Vorgehensweise und Aufwand bei der Datenaufbereitung und Datenhaltung),
- Weitergehende Anforderungen (Erfassung von Routen, Erfassung von Quellen und Zielen, Erweiterbarkeit auf Bundesstraßen und andere).

Die fünf nach der primären Datenquelle (ANPR, Bluetooth, stationäre Detektoren mit Modellerweiterung, Mobilfunkdaten, Floating-Car-Daten) differenzierten Konzepte wurden bezüglich dieser Anforderungen anhand des Vergleichs realer Messdaten bewertet und verglichen (Tabelle 3). In der Praxis werden jedoch 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 ein dreistufiger Ansatz gewählt:

- Stufe 0: KPI-Basissystem mit stationären Detektordaten (SDD) – Basisfall (hier ohne Modellerweiterung)
- Stufe 1: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD) und Floating-Car-Daten (FCD)
  - Stufe 1.1: KPI-System für die Anwendungsfälle Eckwerte und Bedarfsplan – FCD werden in größeren Zeitabständen (zum Beispiel jährlich) für alle Teilstrecken aggregiert nach Verkehrstagesstypen und Tageszeiten 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 (zum Beispiel 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 Betriebsdienstopptimierung 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.
- Stufe 2: KPI-System mit stationären Detektordaten (SDD), Floating-Car-Daten (FCD) und lokalen Erweiterungen
  - Stufe 2.0: KPI-System mit SDD und modellbasierter Fahrtzeitermittlung – Stufe 2.0 baut direkt auf der Stufe 0 auf und verzichtet auf die Nutzung von FCD. Die SDD werden für eine modellbasierte Fahrtzeitermittlung genutzt. Dabei steht der Anwendungsfall Verkehrsmanagement im Vordergrund. Die Stufe 2.0 wird auf Netzabschnitten mit einer hohen Stauwahrscheinlichkeit eingesetzt.
  - Stufe 2.1: KPI-System mit SDD und FCD und modellbasierter Fahrtzeitermittlung – Diese Erweiterung nutzt die zusätzlichen Analyse- und Prognosemöglichkeiten einer modellbasierten Fahrtzeitermittlung. 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.

Auch für diese hybriden Systeme wird die Anforderungserfüllung je Anwendungsfall untersucht und bewertet (Tabelle 4).

Für die Bewertung der KPI-Systemkonzepte mithilfe der Kosten-Nutzen-Analyse ist der Grad der Anforderungserfüllung in Nutzenpunkte in einer Skala von 0 bis 100 Punkten zu übersetzen. Das hierfür entwickelte Bewertungssystem erlaubt eine individuelle Gewichtung der Anforderungen sowie der Anwendungsfälle, um das Bewertungsverfahren an die jeweilige Fragestellung angepasst konfigurieren und Sensitivitätsanalysen durchführen zu können.

Für die Bewertung der Aufwände sind für jedes der KPI-Konzepte die Kosten je oben genannter Kostenart abzuschätzen. Zur Bewertungssynthese soll dann ein Wirksamkeit-Kosten-Quotient (WKQ) ermittelt werden. 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 pro Jahr) erreichen.

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 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 unter Annahme eines angestrebten Ausbaubedarfs ersetzen.

Auf Basis der beispielhaft durchgeführten Berechnungen lassen sich aber bereits Tendenzen ableiten. Aufgrund der viel höheren Kosten der anderen Erfassungsmethoden ergibt sich tendenziell das beste Ergebnis sowohl bei der Betrachtung einer primären Datenquelle als auch bei Hybriden unter Einsatz von FCD. Allerdings wird für die hybriden Systeme nicht der WKQ ermittelt, sondern die jeweiligen Zusatznutzen und -kosten im Vergleich zum Basisfall der Stufe 0.

Das Ergebnis zeigt die Tendenz, 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 Fahrzeitermittlung) 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.

Der geforderte webbasierte Prototyp zur exemplarischen Umsetzung eines KPI-Systems wurde auf Basis der Software PTV Optima realisiert. Die Software kann (Echtzeit-)Inputdaten aus verschiedenen Quellen sammeln, geografisch verorten, in eine (GIS-)Datenbank abspeichern und fusionieren, Kenngrößen (KPI) berechnen und auf übersichtliche Art darstellen. Zudem wurde in der gewählten Variante der Echtzeit-Betrieb auf Basis historischer Daten simuliert, sodass auch Daten, die nicht in Echtzeit verfügbar sind, verwendet werden können. Als Untersuchungsgebiet wurde das Autobahnviereck bestehend aus A 5, A 8, A 81 und A 6 zwischen Heidelberg, Karlsruhe, Stuttgart und Heilbronn verwendet. Neben einem Streckennetz und historischen FCD-Geschwindigkeitsdaten von TomTom werden Zählstellendaten und Baustelleninformationen der BAST im Prototyp verwendet. Um verkehrsstärkengewichtete KPI für das gesamte verwendete Netz berechnen zu können, werden die von TomTom gelieferten Stichprobengrößen mithilfe der Zählwerte pauschal hochgerechnet. Der Prototyp ermöglicht auf Basis der vorhandenen Daten die Erstellung verschiedener KPI mit räumlicher oder zeitlicher Aggregation. Einige KPI werden vordefiniert bereitgestellt, wie beispielsweise verkehrsstärkengewichtete Fahrzeitverluste oder ein Fahrzeitindex, berechnet aus dem Verhältnis der Reisezeit von TomTom mit der Fahrzeit bei freiem Verkehrsfluss. Mit einer Evaluierung des Prototyps durch den Betreuerkreis wurde untersucht, wie die Nutzer das System bewerten.

**Tabelle 3: 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
<b>Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität</b>					
KPI für beliebige räumliche Bezugsebenen					
Teilstrecke	-	-	+	-	+
Strecke	+	+	+	o	+
Netzabschnitt / Teilnetz	+	+	o	+	+
KPI für beliebige Zeiträume	+	+	+	+	+
KPI basieren auf Fahrtzeitverteilungen					
Mittelwert	+	+	+	+	+
Perzentile	+	+	o	+	o
KPI differenziert nach Pkw und Lkw	-	-	-	-	o
<b>Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage</b>					
KPI ungewichtet	+	+	+	+	+
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Fahrzeuge	+	+	+	o	+
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke differenziert nach Fahrzeugklasse	o	o	-	o	o
KPI gewichtet mit Verkehrsstärke Personen	-	-	-	-	-
Verkehrsleistung Fahrzeuge	o	-	+	-	-
Verkehrsleistung Fahrzeugklassen	-	-	+	-	-
Verkehrsleistung Personen	-	-	-	-	-
Verkehrsaufkommen (Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge)	+	-	o	-	-
<b>Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen</b>					
Eignung für Baustellen	-	+	-	+	+
Eignung bei extremen Wetterbedingungen	o	+	+	+	+
Eignung für hybride Erfassung mit andere Fahrtzeitquellen	+	+	+	+	+
Eignung für Verschneidung mit Baustellen- und Unfalldaten	o	o	-	o	+
Eignung für eine differenzierte Erfassung von Abbiegevorgängen	o	o	o	-	-
Eignung zur Erfassung des Orts einer Störung	-	-	o	-	+
Eignung für Kurzfristprognose	o	o	+	o	o
Eignung für Mittelfristprognose	+	+	+	+	+
Eignung für Maßnahmenprognose	-	-	o	-	-
<b>Anforderung an die Qualität</b>					
Transparenz der Datenaufbereitungsschritte	+/o	+/o	o	+/o	-
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeiten (Rohdaten)	+	+	o	o	+
Hohe Genauigkeit bei den Fahrtzeitverteilungen	+	o	o	+	+
Hohe Genauigkeit beim Ort der Störung	-	-	o	o	+
Geringe Latenzzeit für Online-Einsatz	o	o	+	o	+
Robustheit bei Ausfall der Datenquelle	+	+	o	-	-
Repräsentativität der Stichprobe	+	o		o	+
Aussagen zum Stichprobenumfang	+	+		+	+
<b>Anforderung an die Datenaufbereitung und Datenhaltung</b>					
Zentrale Berechnung der KPI an einer zentralen Stelle des Bundes	+	+	o	+	+
Dezentrale Berechnung der KPI nach einheitlichem Standard in den Verkehrszentralen	o	o	o	-	+
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	o	o	o	-	+
Datenschutzvorgaben erfüllen	o	o	+	o	+
<b>Weitergehende Anforderungen</b>					
Erfassung von Routen / Durchgangsverkehrsanteilen	+	o	-	+	-
Erfassung von Quellen und Zielen	+	o	-	+	-
Erweiterung auf Bundesstraßen	-	-	-	+	+

Tabelle 4: 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
<b>Anforderung zur Erfassung der Verkehrsablaufqualität</b>							
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
<b>Anforderung zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage</b>							
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)	-	-	-	-	+	+	+
<b>Anforderung für verschiedene Einsatzbedingungen</b>							
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	-
<b>Anforderung an die Qualität</b>							
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	+	+	+	+	+	+	+
<b>Anforderung an die Datenaufbereitung</b>							
Geringer Aufwand zur Ermittlung der KPI aus der Datenquelle	0	+	0	0	0	0	0
Datenschutzvorgaben erfüllen	+	+	+	+	+	+	0
<b>Weitergehende Anforderungen</b>							
Erfassung von Routen / Durchgangsverkehrsanteilen	-	-	-	-	-	-	+
Erfassung von Quellen und Zielen	-	-	-	-	-	-	+
Erweiterung auf Bundesstraßen	-	+	+	+	-	-	-
Bundesweite Vergleichbarkeit	+/0	+	+	+	0	+	+
Erläuterungen: (+) 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							