

## Aspekte für die temporäre Seitenstreifennutzung auf Autobahnen

FA 2.367

Forschungsstelle: Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen  
(ISE) (Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Roos)

Bearbeiter: Vortisch, P. / Zimmermann, M. /  
Buck, S. / Auer, C. / Förter, N. / Wey-  
land, C.

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

Abschluss: März 2023

### 1 Aufgabenstellung

Temporäre Seitenstreifenfreigaben (TSF) haben sich in Deutschland auf rund 380 Streckenkilometern etabliert, um auf regelmäßig überlasteten Autobahnen kurzfristig die Kapazität zu erhöhen (BASt, 2021). TSF stellen dabei eine Möglichkeit dar, nicht nur Staus durch Überlastung zu vermeiden, sondern gleichzeitig den Verkehr zu homogenisieren und das Unfallrisiko zu reduzieren. Hierfür wird der Seitenstreifen zeitweise für den fließenden Verkehr freigegeben, während die eigentliche Funktion des Seitenstreifens, die Verkehrssicherheit durch das Aufnehmen von Pannenfahrzeugen zu gewährleisten und dem Betriebsdienst einen Arbeitsraum zu stellen, stark eingeschränkt wird (RAA, 2008). Auch deswegen kommt eine Freigabe des Seitenstreifens nur auf Streckenabschnitten infrage, deren regelgerechter Ausbau im Bedarfsplan vorgesehen ist (ARS 20/2002).

Im Rahmen des FE-Vorhabens werden anhand von 16 in Betrieb befindlichen Anlagen Aspekte der TSF zusammengefasst und daraus Empfehlungen für zukünftige Planungen abgeleitet.

Zum Abschluss werden die bestehenden Musterdetailzeichnungen zu TSF diskutiert und mögliche Anpassungen vorgeschlagen.

### 2 Untersuchungsmethode

Die Streckenauswahl beinhaltet primär dreistreifige Streckenabschnitte mit Streckenbeeinflussungsanlage (SBA) im Ballungsraum, aber auch zweistreifige Streckenabschnitte mit/ohne SBA und bildet die aktuell gängigsten Gestaltungsvarianten ab. Für die Analyse der vielfältigen Aspekte zu TSF werden von den Ländern Unfall-, Verkehrs- und TSF-Daten zur Verfügung gestellt, welche über die Uhrzeit kombiniert weitgehende Untersuchungen ermöglichen. Diese werden um Planungsunterlagen sowie zusätzliche Informationen und Erfahrungen aus Interviews ergänzt.

Zu den planerischen Aspekten von TSF werden RE-Unterlagen und die zugehörigen Unterlagen für den Wirtschaftlichkeitsnachweis hinsichtlich der Anlagenrandbedingungen, der Ge-

staltungselemente und der Unterlagenstruktur analysiert. Parallel werden Interviews in der Straßenbauverwaltung und mit dem BMDV geführt, um sowohl die Blickweise beim Entwurf als auch beim Erteilen des Sichtvermerks zu erfassen.

Praxiserfahrungen sowie Chancen und Risiken, die sich für den Betriebsdienst aus der Seitenstreifennutzung ergeben, werden mit einem Fragenkatalog erhoben und anschließend in einer landesweit gebündelten Diskussionsrunde in den Autobahnmeistereien besprochen. Der Erhebungsschwerpunkt liegt bei den Folgen, die sich aus den Freigabezeiten oder aus der verkehrabhängigen Freigabe ergeben, und bei Veränderungen im betrieblichen Aufwand.

Hinsichtlich der Verkehrssicherheit steht insbesondere im Fokus, das Sicherheitsniveau auf Strecken mit einer TSF gegenüber Strecken mit drei beziehungsweise vier Fahrstreifen zu vergleichen. Ferner werden belastbare Kenngrößen in Bezug zu konkreten Schaltzuständen ermittelt. Hierfür werden die Unfalldaten mit den zeitlich exakt zugeordneten Daten aus TSF und SBA verknüpft und ausgewertet. Für Detailfragen, insbesondere zu vorherrschenden Unfallkonstellationen bei verschiedenen Schaltzuständen, werden auch Unfallhergangstexte ausgewertet, sofern diese verfügbar sind.

Um Aussagen zur Wirkungsweise der Anlagen unter verschiedenen Randbedingungen zu treffen, werden die verkehrlichen Anlagenrandbedingungen wie beispielsweise die Kapazitäten aus den Verkehrsdaten bestimmt und die q-v-Diagramme der Anlagen ausgewertet. Darüber hinaus werden in den Bundesländern Informationen zur Anlagenschaltung abgefragt und die Akzeptanz der Anlagen anhand der Fahrstreifenaufteilung ermittelt.

Der mikroskopische Verkehrsfluss wird an jeweils drei verschiedenen typischen Ein- und Ausfahrttypen simuliert. Somit können Belastungsgrenzen definiert werden, innerhalb welcher die verschiedenen Ein- und Ausfahrttypen sinnvoll angewendet werden können.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird einerseits die Wirkungsweise der Software AVP getestet, indem einzelne Parameter variiert werden und der Effekt auf die Gesamtbetrachtung abgeschätzt wird. Beispielsweise werden aktualisierte und feiner abgestufte Unfallraten vorgeschlagen, die die Verkehrssicherheit auf TSF-Strecken differenzierter abbilden.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Planerische Aspekte

Aus den analysierten RE-Unterlagen und Interviews lassen sich verschiedene Hinweise ableiten. Die wichtigsten davon sind im Folgenden aufgeführt. Aus den RE-Unterlagen geht hervor, dass TSF primär eingerichtet werden, um die Leistungsfähigkeit in der Spitzenstunde auf dem Streckenabschnitt zu verbes-

sern. Dies betrifft in der Regel den Berufsverkehr, lediglich auf zwei Streckenabschnitten sind dies die Reisezeiten am Wochenende beziehungsweise in den Ferien. Eine weitere Strecke dient vor allem dem Zweck, den Verkehr im Steigungsbereich aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz zu entflechten.

Im ARS 20/2002 wird für die Umnutzung des Seitenstreifens unter anderem als Voraussetzung genannt, dass mit dem HBS (2001) nachzuweisen ist, dass die Verkehrsqualität in mindestens 30 h schlechter als QSV D ist. Im HBS (2015) ist hingegen die Verkehrsstärke der 50. höchstbelasteten Stunde des Jahres für die verkehrstechnische Bemessung maßgebend. Bei einer möglichen Anpassung sollte diese Bemessungsverkehrsstärke auch für TSF zugrunde gelegt werden. Darüber hinaus soll der DTV bei vierstreifigen Strecken im gesamten Querschnitt mindestens 65 000 Kfz/24 h betragen, für sechsstreifige Strecken liegt bislang kein Mindest-DTV vor. Da vermehrt dreistreifige Strecken mit TSF ausgestattet werden, für die teilweise auch mit den oben genannten Grenzwerten argumentiert wird, wird empfohlen, auch für sechsstreifige Querschnitte Grenzwerte festzulegen.

Im Rahmen der Interviews wird aus den Erfahrungen der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen aus der Straßenbauverwaltung auf verschiedene technische Komponenten hingewiesen, die den Verkehrsablauf oder die Verkehrssicherheit positiv beeinflussen könnten und zu einer standardisierten Gestaltungsbildung führen würden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Meinungen zu einzelnen Punkten sehr heterogen sind. Da im Rahmen der Interviews ausschließlich Meinungen abgefragt und gegenübergestellt wurden, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um belastbare Ergebnisse insbesondere zur Wirtschaftlichkeit der Komponenten zu erzielen. Nachfolgend werden die von den Straßenbauverwaltungen meistgenannten Aspekte dargestellt und jeweils vom Forschungsnehmer bewertet.

- Statt Prismenwendern sollten LED-Anzeigen für die TSF-Verkehrszeichen angewendet werden: Wenn Prismenwender genutzt werden, dann sollte eine vertikale Anordnung der Lamellen geprüft werden, um die Anzeige für einzelne Fahrstreifen anpassen zu können. LED-AQ sind aktueller Stand der Technik und sollten daher bevorzugt werden.
- Einheitliches Anordnen oder Nicht-Anordnen des roten Kreuzes zum Verdeutlichen der Fahrstreifensperrung. Da keinerlei Unterschied im Fahrverhalten beziehungsweise Unfallgeschehen erkennbar ist, hat diese Einheitlichkeit keine Priorität. Eher sollten Gewöhnungseffekte an bestehenden Strecken nicht infrage gestellt werden.
- Einheitlicher AQ-Abstand über alle Länder, jedoch weiterhin Anpassung an die vorhandenen Sichtverhältnisse. Forderung nach einheitlichem Abstand in den Ergebnissen nicht abgebildet, daher keine Bewertung.

- Dass Fahrzeuge den Standstreifen nach dem Anlagenende aufgrund einer nicht eindeutigen Markierung und Beschilderung befahren, muss vermieden werden. Daher fließen die Hinweise zum Aufstellort für das Z 223.2 StVO (Seitenstreifen nicht mehr befahren) in die Diskussion zu den überarbeiteten Musterdetailzeichnungen ein. Vorschläge in Musterzeichnungen, insbesondere die Warnlinie am Ende der Einfahrt wird als Möglichkeit gesehen, Fehlbefahrungen einzudämmen.
- Die Markierung der Verziehung vom Ausfädelungsstreifen auf die Ausfahrrampe sowie die Markierung der Verziehung vom Einfädelungsstreifen auf die Hauptfahrbahn soll in Zukunft mit einer Leitlinie von 4 m Strich und 2 m Lücke (als Schmalstrich) ausgeführt werden, deren Position zur optischen Führung analog zum Regelplan 16b der RMS-A verbleibt. An den Stellen, an denen bislang in Fortführung der Seitenstreifennutzung Fahrstreifenbegrenzungen überfahren werden mussten, soll in Zukunft auf diese verzichtet werden.

### 3.2 Wirtschaftlichkeit/AVP

Mit der Dokumentation zur Software könnte verstärkt der Hinweis gegeben werden, dass AVP auch als Planungstool genutzt werden kann, um beispielsweise verschiedene Varianten zu berechnen.

Anhand der geführten Wirtschaftlichkeitsnachweise erfolgter Planungen von TSF-Strecken ist zu erkennen, dass der Nachweis durchgängig auf dem Verfahren der BAST basiert, das auch in die Bewertung mit AVP einfließt. Zum Zeitpunkt des Interviews mit dem BMDV ist der Wirtschaftlichkeitsnachweis nicht zwingend mit AVP zu erbringen. Wenn die Software in den meisten Fällen genutzt wird, kann eine bessere Vergleichbarkeit erreicht werden und der Prozess vereinfacht werden.

### 3.3 Betriebsdienst, Streckenkontrolle, Erhaltungsmanagement

Aus den Interviews mit Mitarbeitenden der Autobahnmeisterei beziehungsweise der zugehörigen Kontrollräume zeigt sich, dass die Einbindung der TSF-Beschilderung in die betriebliche Praxis zumindest formal unterschiedlich gehandhabt wird.

Unabhängig von der konkreten Beschilderung dieser Situationen können die Zeitfenster für Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes deutlich ausgeweitet werden. An vielen TSF-Strecken sind die Verkehrsbelastungen zwischen den Morgen- und Abendspitzen so hoch, dass auch zu diesen Zeiten die Wegnahme eines Fahrstreifens zu Verkehrsstörungen führen würde, die durch die Freigabe des Seitenstreifens vermieden werden können. Für diesen wesentlichen betrieblichen Nutzen von TSF ist das gleichzeitige Vorhandensein einer SBA keine Voraussetzung. Selbstverständlich ist eine SBA durch ihre besse-

ren Eingriffsmöglichkeiten in den fließenden Verkehr sowie die Möglichkeit, Fahrstreifensperrungen voranzukündigen und zu vollziehen, auch für den Betriebsdienst wie auch im Kontrollraum vorteilhaft, aber keine Voraussetzung.

Sofern auch eine SBA vorhanden ist, ergeben sich vielmehr mögliche Vorteile in der Ausnutzung der angesprochenen Überkopfsignalisierung zu Fahrstreifensperrungen und deren Vorankündigung. In die RSA (2021) wurde gegenüber der RSA-95 in Teil D, Kapitel 3 folgender Absatz (3) neu eingefügt: "Anordnungen von Verkehrszeichen mittels Verkehrsbeeinflussungsanlagen sollten in die Sicherung von Arbeitsstellen einbezogen werden, soweit ihre Funktionalitäten dies zulassen und die Regelungen dieser Richtlinie damit umgesetzt werden können. Zur Einbeziehung von Streckenbeeinflussungsanlagen in Arbeitsstellen kürzerer Dauer vergleiche RWVZ. Bei ausreichend dichter Abfolge der Anzeigequerschnitte können Streckenbeeinflussungsanlagen die Funktion der Vorwarnung vollständig übernehmen".

Um Mehraufwand bei der Gehölzpflege und im Grünschnitt zur Freihaltung von Kamerasichtfeldern zu begegnen, sollte bereits während der Planung der Seitenstreifenfreigabe das Freihalten von Sichtbereichen berücksichtigt werden.

### 3.4 Verkehrssicherheit

Da in dem Projekt diverse Aspekte von TSF untersucht werden, liegen in dem Vorhaben erstmalig für 16 Strecken vielfältig überlagerte Datensätze zu den TSF-Anlagen vor. Diese beinhalten zusätzlich zu den Unfalldaten die minutenfeinen, fahrstreifenbezogenen Verkehrsdaten wie auch die Schaltdaten der TSF über zwei Jahre. Somit können diese drei Datensätze bundeslandspezifisch über das Datum und die Uhrzeit kombiniert werden, um eine einheitliche Datengrundlage zu erhalten. Dies hat den Vorteil, dass in der Auswertung nicht nur Unfallkenngrößen für einen Streckenabschnitt mit TSF bestimmt werden können, sondern die Analyse differenziert nach dem jeweiligen Betriebszustand aufgebaut werden kann. Um zu vermeiden, dass Unfälle durch mögliche Ungenauigkeiten in der Unfalldokumentation einem falschen Schaltzustand zugeordnet werden, werden Unfälle markiert, die sich in den 25 Minuten vor beziehungsweise nach einem Schaltwechsel der TSF ereignen. Die Unfälle werden dem Status "Übergang" zugeordnet und ausschließlich in den vom Schaltzustand unabhängigen Unfallkennzahlen berücksichtigt.

Die Unfallanalyse ist mehrstufig aufgebaut. Zunächst werden bundesweite DTV-abhängige Unfallkennwerte ermittelt, um die Verkehrssicherheit von TSF-Strecken gegenüber herkömmlichen Strecken mit drei beziehungsweise vier Fahrstreifen ohne TSF einordnen zu können. Anschließend wird ein Zusammenhang zur Verkehrsstärke hergestellt und auf die Unfallkenngrößen bezogen auf den Schaltzustand eingegangen. Des Weiteren wird das Kapitel durch eine qualitative Analyse von Unfallhergangstexten bei freigegebenen TSF ergänzt. In der drit-

ten Stufe werden Streckenbeginn und die Anschlussstellen im Streckenverlauf auf Unfallschwerpunkten untersucht.

Zur Einordnung der Unfallkennwerte der TSF-Strecken wird zunächst mit aggregierten Unfalldaten der BAST eine Analyse der richtungsbezogenen Unfallkennwerte für alle Netzabschnitte auf BAB in Abhängigkeit von deren Streifigkeit und DTV-Werten vorgenommen. Daraus wird vor allem deutlich, dass die ausgewiesenen mittleren Unfallraten für BAB (zum Beispiel 0,08 UP/1 Mio. Kfz-km) nur bei DTV-Werten deutlich unterhalb der Einsatzgrenzen von TSF-Strecken gelten und für höhere DTV-Werte eine lineare Zunahme der Unfallkennwerte festzustellen ist. Dieser Zusammenhang ist vor allem für die Gesamteinordnung des Unfallgeschehens auf TSF-Strecken von Bedeutung.

Insgesamt ist festzustellen, dass die UR(P) auf TSF-Strecken tendenziell niedriger liegt als auf Streckenabschnitten mit der gleichen Fahrstreifenanzahl ohne TSF und vergleichbarem DTV. Die Unfallraten aller einbezogenen Unfälle liegen jedoch deutlich höher. Dies deutet darauf hin, dass sich auf TSF-Strecken zwar vermehrt Sachschadensunfälle ereignen, die volkswirtschaftlich relevanteren schwereren Unfälle jedoch zurückgehen.

Insbesondere die Unfallrate bei Freigabe weist eine deutlich größere Streuung und eine stärkere Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf als bei Sperrung des Seitenstreifens. So fällt die mittlere UR(Freigabe) von  $2,3 \text{ U}/10^* \text{Kfz} * \text{km}$  bei einer Verkehrsstärke von bis zu 4 000 Kfz/h und das Intervall bei besonders hohen Verkehrsstärken ab 6 500 Kfz/h auf. Gleiches trifft auf die UR(P) (Freigabe) zu.

Dies spricht dafür, dass es eine Grundbelastung an Unfällen mit Personenschaden gibt. In den Intervallen zwischen 4 000 und 5 000 Kfz/h wird die gesamte UR aber primär durch Sachschadensunfälle beeinflusst. Dies betrifft die Zeiträume, in denen der Seitenstreifen freigegeben ist, und Zeiträume mit einer besonders hohen verkehrlichen Belastung.

Die UR(P) und UR bei Sperrung weisen im Intervall der Verkehrsstärke bis 4 000 Kfz/h tendenziell einen höheren Unfallkennwert auf und stabilisieren sich dann auf einem durchschnittlichen Niveau von ca.  $0,04 \text{ U(P)}/10^* \text{Kfz} * \text{km}$  und  $0,21 \text{ U}/10^* \text{Kfz} * \text{km}$ . Dies wird auch von Pöppel-Decker et al. (2003) als durchschnittliche Unfallrate in einem mittleren Belastungsbereich auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen festgestellt.

Insgesamt zeigt sich auf den Untersuchungsstrecken ein stark divergierendes Sicherheitsniveau. Auf Streckenabschnitten mit 3+1 Fahrstreifen liegt die Unfallrate und weniger stark ausgeprägt auch die UR(P) auf der Vorlaufstrecke gegenüber der Strecke mit TSF höher. Eine weitere Auffälligkeit betrifft den Betriebszustand der Anlagen – bei freigegebenen Seitenstreifen liegt die Unfallrate beziehungsweise die UR(P) höher als bei gesperrten.

Auf den zweistreifigen Streckenabschnitten mit TSF ist auf der Gesamtstrecke ein gleichmäßiges Niveau der UR(P) = 0,07 U(P)/Mio. Kfz-km festzustellen, welches im Nachlauf geringfügig niedriger und im Vorlauf höher liegt. Die Unfallrate liegt für die betrachteten Streckenabschnitte gleichfalls unabhängig vom Schaltzustand bei 0,23 U/Mio. Kfz-km, dabei ist die Unfallrate sowohl im Vor- als auch Nachlauf erhöht.

Da die Dokumentation der Schaltzustände in den vorliegenden Unfallhergangstexten nicht durchgängig enthalten ist, kann eine Analyse der konkreten Hergänge nur für die Unfälle im Bereich des Seitenstreifens und ersten regulären Fahrstreifens bei freigegebenem Seitenstreifen erfolgen. In diesem Bereich treten deutlich häufiger Unfälle beim Wechsel vom ersten Fahrstreifen auf den Seitenstreifen auf als umgekehrt, auch sind deutlich mehr Unfälle beim Fahrstreifenwechsel zu verzeichnen als durch Auffahren. Darüber hinaus sind in diesen Konstellationen deutlich mehr Lkw und vor allem Sattelzüge als Beteiligte zu verzeichnen als im Durchschnitt über alle Unfälle, während die Unfallbeteiligten 2 mit einem hohen Anteil an Pkw ähnlich verteilt sind wie üblich.

Auffällig sind textliche Hinweise, dass Fahrzeugführende bei drohender Kollision auf dem Seitenstreifen zum Beispiel bei Fahrstreifenwechseln auszuweichen versuchen, dies wegen der häufig anzutreffenden Fahrzeugrückhaltesysteme unmittelbar neben dem Seitenstreifen jedoch nicht möglich ist. Einzelne Texte lassen auch vermuten, dass durch entsprechende Fahrzeugreaktionen insbesondere beim Schwerverkehr möglicherweise schwerwiegendere Folgen resultieren als bei vergleichbaren Situationen auf regulären Fahrstreifen.

Da sich in den Darstellungen zur Verteilung der Unfälle im Streckenverlauf einzelne Infrastrukturelemente als stärker unfallauffällig herausgestellt haben, wird untersucht, ob Markierung und Kennzeichnung des Streckenbeginns einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben. Hierfür wird der Streckenbeginn der Untersuchungsstrecken klassifiziert und die häufigsten Varianten ausgewählt. Für die Auswahl werden die häufigsten Unfalltyp-Art-Kombinationen über die Unfallrate gegenübergestellt, um eine systematische Aussage zur Auswirkung der zwei häufigsten Gestaltungsvarianten zu treffen. Da sich die Randbedingungen der zwei Kollektive wie auch der einzelnen Untersuchungsstrecken aber stark unterscheiden beziehungsweise die beiden Kollektive grundsätzlich deutlich unterschiedliche Unfallraten aufweisen, lassen sich nur allgemeine Aussagen innerhalb der Strecken ableiten, jedoch keine Aussage zu Auswirkungen unterschiedlicher Kennzeichnungen des TSF-Beginns treffen.

Auch für die sieben Anschlussstellen (AS) innerhalb der Strecken ist festzustellen, dass das Unfallgeschehen sehr streckenabhängig ausgeprägt ist. Dies lässt eine Verallgemeinerung der Aussagen für Anschlussstellen kaum zu. Auf Streckenabschnitten mit einer allgemein niedrigen Unfallrate sind auch die Anschlussstellen wenig unfallauffällig, während auf

den stärker unfallbelasteten Streckenabschnitten auch die Anschlussstellen durch höhere Unfallraten auffallen. Ergänzend kommt auf den Streckenabschnitten, auf denen sich die Unfallrate je nach Betriebszustand bereits unterscheidet, dieser Aspekt im Bereich der AS noch stärker zum Tragen. Dies lässt sich durch zusätzliche Verflechtungsvorgänge begründen, die sich teilweise auch durch zusätzliche Unfälle beim Einbiegen zeigen. Somit bestätigt sich die Aussage von LEMKE (2007), dass das Sicherheitsniveau vom jeweiligen Streckenabschnitt abhängt und insbesondere Knotenpunkte vor der Anlage einer TSF einer Sicherheitsanalyse unterzogen werden sollten.

### 3.5 Makroskopische Analyse des Verkehrsablaufs

Ziel der Untersuchungen zum Verkehrsablauf ist es, verkehrliche Kenngrößen wie beispielsweise Kapazitäten auf eine breite Datenbasis vorhandener TSF-Anlagen zu stellen. Hierzu stehen vor allem Untersuchungsstrecken mit 3+1-Fahrstreifen zur Verfügung, welche allesamt mit einer SBA ausgestattet sind. Hierzu werden die Anlagen zunächst hinsichtlich ihrer verkehrlichen und betrieblichen Randbedingungen gegenübergestellt, charakterisiert und mit Streckenabschnitten mit drei oder vier Fahrstreifen verglichen. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass Vor- und Nachlauf der TSF-Strecken nur bedingt berücksichtigt werden konnten. Insbesondere lagen bei einem Großteil der Strecken stromaufwärts Autobahnknotenpunkte mit sehr hohen Ein- und Ausfahranteilen vor, die in dieser Analyse nicht abgebildet werden konnten.

Dazu werden zunächst maximale Verkehrsstärken, SV-Anteile sowie DTV-Werte eines repräsentativen Querschnitts der im Untersuchungskollektiv enthaltenden Strecken ermittelt sowie die zeitliche Verteilung der Anlagenöffnungen – und -schließungen – über den Tagesverlauf betrachtet. Hierbei zeigen sich gewisse Muster hinsichtlich des Betriebs der Anlagen, welche in vier Grundtypen unterschieden werden. In diesen Grundmustern spiegeln sich die tageszeitlich vorkommenden Kapazitätsengpässe wider, aus denen sich letztlich auch die Notwendigkeit der Freigabe des Seitenstreifens ergibt. Einige der Anlagen weisen hierbei sehr ausgeprägte vor- beziehungsweise nachmittägliche Peaks auf, bei anderen Anlagen ist die tageszeitliche Verteilung der Freigabe und Schließung der TSF stärker ausdifferenziert.

Aufbauend auf diesen Informationen zu den verkehrlichen und betrieblichen Randbedingungen der Anlagen werden q-v-Diagramme für die beiden Zustände der freigegebenen und gesperrten TSF erzeugt, um diese hinsichtlich ihrer Gestalt sowie vorhandener Überlastungen zu untersuchen. Dabei zeigt sich, dass zwar zum Teil auch bei freigegebenem Seitenstreifen Verkehrszustände im Bereich des gestauten Verkehrs vorhanden sind, diese jedoch nur auf äußerst stark belasteten Streckenabschnitten mit DTV-Werten von über 73 000 Kfz/h auftreten und überwiegend aus Rückstauwirkungen aus stromabwärts liegenden Engpässen resultieren.

Anknüpfend an die visuelle Analyse von Überlastungen wird sodann eine stochastische Kapazitätsanalyse durchgeführt, welche auf der Untersuchung von Zusammenbrüchen des Verkehrs beruht. Die Einteilung in zensierte und unzensierte Intervalle dient dazu, eine Schätzfunktion für die Verteilungsfunktion der Kapazität zu ermitteln. Diese auf 5-Minuten-Intervallen aufbauenden Kapazitätswerte werden sodann in Stunden-Intervalle transformiert, um hierbei eine Vergleichbarkeit zu den im HBS (2015) hinterlegten Kapazitätswerten herstellen zu können. Die insgesamt auf eine breitere Datenbasis gestellten 3+1-Strecken zeigen dabei eine gute Übereinstimmung mit den im HBS (2015) angegebenen Kapazitätswerten von im Mittel ca. 5 000 Kfz/h bei geschlossener und ca. 6 800 Kfz/h bei geöffneter TSF. Es muss berücksichtigt werden, dass im Rahmen des Forschungsprojekts die Längsneigung der untersuchten Querschnitte nicht systematisch analysiert wurde. Allerdings finden sich in den untersuchten Anlagen auch keine ausgeprägten Steigungstrecken wie zum Beispiel die erst während der Projektlaufzeit eingerichtete TSF auf der A 8 östlich des Dreiecks Karlsruhe.

Im Hinblick auf die im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchgeführten AVP-Tests wird im Rahmen der verkehrlichen Analyse außerdem eine Modellierung der q-v-Beziehung mithilfe der Modellfunktion nach BRILON und PONZLET (1995) durchgeführt und die entsprechenden Parameterwerte ermittelt, um die realen Kurvenbeziehungen an ausgewählten Untersuchungsstrecken in AVP zu hinterlegen. Dies geschieht vor dem Hintergrund eines Vergleichs gegenüber den standardisierten Kurvenbeziehungen.

Im Rahmen der verkehrlichen Analyse wird außerdem eine Betrachtung der Akzeptanz im Sinne einer vergleichenden Betrachtung der idealtypischen Fahrstreifenaufteilung drei- beziehungsweise vierstreifiger Richtungsfahrbahnen gegenüber TSF-Strecken durchgeführt. Dies erfolgt in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke im Querschnitt. Dabei zeigen sich bei den untersuchten TSF-Strecken nahezu identische Fahrstreifenaufteilungen wie auf drei- beziehungsweise vierstreifigen Richtungsfahrbahnen für vergleichbare Verkehrsstärkebereiche. Dies deutet auf eine ähnliche Akzeptanz des Seitenstreifens wie der eines regulären rechten Fahrstreifens hin.

Neben der grundsätzlichen verkehrlichen Betrachtung der Untersuchungsstrecken wird eine spezifische Betrachtung und Bewertung des Verkehrsablaufs um die Zeitpunkte der Freigabe und Sperrung der TSF durchgeführt. Dazu wird einerseits auf der Basis einer Abfrage der Schaltinformationen der Verkehrsleitzentralen ein Prozess erarbeitet, in welchen Schritten und unter welchen Prüfbedingungen und Kennwerten die Freigabe beziehungsweise Rücknahme der Freigabe des Seitenstreifens erfolgt. Anschließend werden q-v-Diagramme um die Öffnungs- und Schließungszeiträume erstellt und die darin vorzufindenden Verkehrszusammenbrüche analysiert. Insgesamt lässt sich basierend auf den betrachteten Querschnitten festhalten, dass weder die Zeiträume kurz nach Freigabe noch

nach Schließung der Anlage vermehrt von Verkehrszusammenbrüchen geprägt sind.

### 3.6 Mikroskopische Analyse des Verkehrsablaufs

Die Einsatzgrenzen verschiedener Ein- und Ausfahrttypen im Bereich von TSF werden mithilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen in PTV Vissim untersucht. Dazu werden Laborstrecken folgender Ein- und Ausfahrttypen aufgebaut:

- Beginn einer TSF (Einfahrttypen E1 und E4)
- Anschlussstelle innerhalb einer TSF (Einfahrttyp E1 und Ausfahrttyp A1)
- Ende einer TSF (Ausfahrttypen A1 und A3)

Der Verkehrsfluss auf den Ein- und Ausfahrten wird in Absprache mit Expertinnen und Experten aus Hessen, Bayern und NRW plausibilisiert. Zur Kalibrierung der Modelle werden Verkehrsdaten von Autobahnabschnitten mit TSF herangezogen. Die Kalibrierung wird zum einen anhand der beobachteten q-v-Beziehungen vor und nach den Anschlussstellen durchgeführt. Zum anderen wird die Fahrstreifenaufteilung betrachtet, welche Aufschluss über die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmenden gegenüber den temporär freigegebenen Seitenstreifen liefert. Es ist das Ziel der Kalibrierung, möglichst allgemeingültige Parameter für die Simulation von TSF zu definieren. Lokale Gegebenheiten und Wechselwirkungen zwischen Ein- und Ausfahrten werden in den Simulationen nicht betrachtet.

In vier Szenarien wird der Ausfahranteil, der Einfahranteil, die Akzeptanz der Lkw und die Akzeptanz der Pkw variiert und untersucht.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die zweistreifigen Ein- und Ausfahrten ihre Stärken, wie zu erwarten ist, im Bereich von hohen Einfahr- beziehungsweise Ausfahranteilen ausspielen. Bei einstreifigen Aus- beziehungsweise Einfahrten ist in den meisten Fällen eine Durchführung der Seitenstreifenfreigabe über die Anschlussstelle hinweg vorzuziehen. Die Akzeptanz des Schwer- und Leichtverkehrs beeinflusst den Verkehrsfluss innerhalb der Ein- und Ausfahrten nicht wesentlich, sofern realistische Akzeptanzraten herangezogen werden.

### 3.7 Wirtschaftlichkeit

Das Arbeitspaket Wirtschaftlichkeitsbetrachtung besteht aus den folgenden Bausteinen:

1. Testen der Software AVP für den Wirtschaftlichkeitsnachweis und
2. Überprüfen beziehungsweise Anpassen von einzelnen Bestandteilen der Software.

Für AVP-Tests werden zunächst Szenarien festgelegt und anschließend durchgeführt. Dies beinhaltet das Variieren der aus den q-v-Beziehungen abgeleiteten Parameter, um die Wirkung auf die Gesamtbetrachtung abzuschätzen. Auch wenn aufgezeigt wird, dass sich die tatsächlichen Parameter der q-v-Beziehungen deutlich auf die Bewertung der TSF-Strecke aus-

wirken, wird empfohlen, die Parameter der q-v-Beziehungen aus dem HBS (2015) beizubehalten. Die Parameter decken bereits eine Vielfalt an Komponenten in den q-v-Beziehungen ab und durch die festgelegten Parameter können Fehleingaben beim Wirtschaftlichkeitsnachweis vermieden werden.

Zum anderen werden die AVP-Beiträge bevorzugt durch Listenanpassungen aufgearbeitet und dokumentiert. Dabei ist anzumerken, dass durch den bestehenden Softwareaufbau keine programmtechnischen Änderungen in AVP möglich beziehungsweise gewollt sind. Dies bedeutet, dass aktualisierte Kennwerte mit einem Softwareupdate eingepflegt werden können, strukturelle Änderungen aber eines größeren Aufwands bedürfen.

Hinsichtlich der Verkehrssicherheit wird empfohlen, die Unfallrate zukünftig feiner abgestuft in AVP abzubilden. Dies betrifft die Unterscheidung nach den Strecken mit 2+1 und 3+1-Fahrstreifen, die zusätzliche Angabe der Unfallkennzahlen aus dem Streckenvorlauf und das Bilden der Unfallraten mit den gängigen Unfallkategorien 1-3 und 4-6. Somit lassen sich die sicherheitsbeschreibenden Kenngrößen auf TSF-Strecken möglichst differenziert darstellen.

Ebenfalls werden die Kostensätze zum Programm AVP aktualisiert, sofern das mit den zur Verfügung stehenden Daten möglich ist.

An einem exemplarischen Datenauszug werden die betrieblichen Mehraufwände an TSF-Strecken beschrieben.

#### 4 Fazit und Ausblick

Bezüglich des Bewertungstools AVP stand innerhalb des Forschungsvorhabens dessen Eignung im Fokus, damit bundeseinheitlich Wirkungen einer TSF darzustellen; gleichzeitig sollte das Programm nicht strukturell angepasst werden. Sowohl was eine realistischere Abbildung des verkehrlichen Nutzens über vermiedene Staubelastungen angeht als auch zum Beispiel die Einbeziehung standardisierter Unfallkostensätze, sollte eine Aktualisierung auch der Struktur von AVP geprüft werden.

Insgesamt zeigt sich sowohl aus der umfangreichen Datenüberlagerung mit Analyse der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs sowie den weiteren Erkenntnissen aus Interviews, dass die untersuchten TSF-Streckenabschnitte ein gut funktionierendes Gesamtsystem darstellen.

Da letztendlich der Großteil aller Strecken im Kollektiv enthalten ist, die 2018/2019 fertiggestellt waren und bei denen im Projektzeitraum keine Umbauarbeiten erfolgt sind, steht diese Gesamtaussage auf einer sehr breiten Basis. Unterschiede in Abhängigkeit von der technischen Ausstattung – insbesondere dem Vorhandensein von SBA – sind mit dem Streckenkollektiv nicht nachweisbar, allerdings liegen auch nahezu keine Strecken, vor allem aus der jüngeren Vergangenheit vor, die keine SBA beinhalten (alle 3+1-Strecken sowie bis auf einen Ab-

schnitt auch die 2+1-Strecken mit SBA). Da die Anlagen ohne SBA darüber hinaus zu den ältesten Anlagen zählen und besondere Randbedingungen aufweisen, kann daraus jedoch nicht abgeleitet werden, dass ihre Wirkungsweise mit denen der SBA identisch ist.

Neben den generell unstrittigen Vorteilen von SBA für die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf werden in den Berichten der Meistereien und Kontrollräume vielfach auch die Vorteile der SBA für den Betriebsdienst herausgestellt. Auch wenn deren Nutzen innerhalb der Wirtschaftlichkeitsnachweise nur schwer nachweisbar ist, so hat es sich zumindest für die bestehenden Anlagen offensichtlich gelohnt, dass die RE-Entwürfe auch die SBA enthalten haben und insgesamt als wirtschaftlich eingestuft worden sind, was möglicherweise auch auf Synergien aus den beiden Telematikpaketen zurückzuführen ist.

Die mit Strecken ohne TSF vergleichbaren Unfallkennzahlen sowie der Nachweis, dass die Anlagen ihre verkehrliche Wirkung zuverlässig erzielen, zeigt, dass durch den Wirtschaftlichkeitsnachweis bedingt keine Strecken gebaut werden, die nicht sinnvoll betrieben werden. Auch eine Obergrenze der Verkehrsbelastungen für TSF-Strecken ergibt sich aus den untersuchten Strecken nicht. Schließlich ist erkennbar, dass auch bei den Strecken mit den höchsten DTV-Belastungen weiterhin nur zu einem geringen Teil des Tages die Freigabe des Seitenstreifens erforderlich ist, sodass dessen originäre Funktion während des Großteils des Tages erhalten bleibt.