

Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten an Autobahnen

FA 3.561

Forschungsstellen: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. P. Vortisch)
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen – Planung und Management (Prof. Dr.-Ing. J. Geistefeldt)

Bearbeiter: Geistefeldt, J. / Vortisch, P. / Sauer, J. / Buck, S. / Baumann, M. / Brandenburg, A. / Grau, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Januar 2023

1 Aufgabenstellung

Bei dicht aufeinander folgenden Knotenpunkten auf Autobahnen oder einer abschnittswisen Überlagerung von zwei Autobahnen besteht teilweise die Notwendigkeit, lange Verflechtungsstrecken zwischen benachbarten Knotenpunkten anzuordnen. Diese großen Verflechtungsstrecken weisen eine Addition und Subtraktion von einem oder mehreren Fahrstreifen am Beginn beziehungsweise Ende auf. Der Verkehrsablauf auf Verflechtungsstrecken wird dabei maßgebend von den Verhältnissen der Verkehrsstärken der Verflechtungs- und Randströme in Verbindung mit der Entwurfsgeometrie, der Fahrstreifenmarkierung, der Wegweisung und gegebenenfalls der Verkehrssteuerung bestimmt. Ziel der Untersuchung war die Erweiterung der Regelwerke für den Entwurf und die verkehrstechnische Bemessung von Autobahnen um Verfahren und Hinweise für die Gestaltung und Bewertung von großen Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten.

2 Untersuchungsmethodik

Zur Dokumentation sämtlicher realisierter Lösungen von Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten im Bundesautobahnnetz wurde eine Luftbildrecherche durchgeführt. Dabei wurde grundsätzlich zwischen symmetrischen und asymmetrischen Verflechtungsstrecken sowie weiteren Sonderlösungen von Verflechtungsstrecken unterschieden.

Im Rahmen der Analyse des Verkehrsablaufs wurden 86 Verflechtungsstrecken mit durchgehender Blockmarkierung in Nordrhein-Westfalen und Hessen untersucht. Für die makroskopische Analyse des Verkehrsablaufs an Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten wurden Daten von Dauerzählstellen über einen Zeitraum von fünf Jahren zwischen 2015 und 2019 verwendet, um eine möglichst umfangreiche Datengrundlage zu erhalten. Anhand dieser Daten wurden die Gestalt des q-v-Diagramms, die Fahrstreifenaufteilung, das fahrstreifenbezogene Geschwindigkeitsverhalten sowie typische Verkehrs-

stärkeverhältnisse der Rand- und Verflechtungsströme an den einzelnen Verflechtungsstrecken ermittelt.

Für die mikroskopische Analyse des Verkehrsablaufs wurden an 13 Verflechtungsstrecken drohnengestützte Videoerhebungen über jeweils mindestens drei Stunden während der Spitzenstunden durchgeführt. Die Auswahl der einzelnen Untersuchungsstellen basierte dabei auf dem Vorhandensein einer ausreichenden Anzahl an Dauerzählstellen, den rechtlichen und technischen Möglichkeiten der Durchführung einer Verkehrsmessung mit einer Drohne sowie der Überprüfung, dass keine Beeinträchtigung des Verkehrsablaufs durch Baustellen für den geplanten Messzeitraum zu erwarten war. Anhand der drohnengestützten Videoerhebungen wurden das Verflechtungsverhalten der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge analysiert sowie die Fahrstreifenaufteilung und die Zeitlückenverteilung an mehreren Messquerschnitten ermittelt.

Neben der drohnengestützten Verkehrserhebung wurden für 26 Verflechtungsstrecken "Trips"-Daten des Verkehrsdienstleisters INRIX über mindestens vier Wochen aufbereitet und analysiert. Die "Trips"-Daten umfassen Wegpunkte und Geschwindigkeiten von Einzelfahrzeugen, die hinsichtlich der Verkehrsstrombelastungen in den Verflechtungsstrecken ausgewertet wurden. Anders als lokal gemessene Verkehrsstärken ermöglichen diese Daten eine Ermittlung der Verkehrsstärkeverhältnisse der Rand- und Verflechtungsströme sowie der Geschwindigkeiten im Verflechtungsbereich.

Im Rahmen der Kapazitätsanalyse wurden korrelative Zusammenhänge zwischen der Kapazität und den baulichen und verkehrstechnischen Einflussgrößen identifiziert und quantifiziert. Dazu wurden zunächst der Schwerverkehrsanteil sowie die Verkehrsstärkeverhältnisse der einzelnen Verkehrsströme an einer Verflechtungsstrecke als Einflussgrößen betrachtet, da diese Parameter für eine Verflechtungsstrecke keinen festen Wert annehmen und deutlich variieren können. Zur Analyse des Einflusses des Schwerverkehrsanteils auf die Kapazität wurde der Pkw-Gleichwert zur Umrechnung der Schwerverkehrsstärke in Pkw-Einheiten als variable Größe betrachtet. Es wurde versucht, eine möglichst gute Anpassung für eine Funktion des Zusammenhangs zwischen dem Pkw-Gleichwert und dem Schwerverkehrsanteil für die einzelnen Verflechtungsstrecken zu ermitteln. Hierbei wurden verschiedene Funktionstypen zur Modellierung des Zusammenhangs verwendet. Die Untersuchung weiterer möglicher Einflussgrößen auf die Kapazität anhand einer multiplen Regressionsanalyse konnte nur für Verflechtungsbereiche des Typs V 1 durchgeführt werden, weil für andere Typen kein ausreichend großes Untersuchungskollektiv mit einer Variation der Ausprägung der jeweiligen Parameter vorlag. Für diesen Verflechtungsbereichstyp wurde aufbauend auf den empirischen Ergebnissen ein Kapazitätsmodell entwickelt.

Der Verflechtungsbereichstyp V 1 setzt sich aus dem Einfahrtstyp E 3 und dem Ausfahrtstyp A 6 gemäß den RAA zusammen. Da der Einfahrtstyp E 3 und der Ausfahrtstyp A 6 eine Fahrstreifenaddition bzw. -subtraktion an einer Hauptfahrbahn darstellen, können die Bemessungskapazitäten der beiden Knotenpunkttypen als Obergrenze für die Bemessungskapazität der Verflechtungsstrecke vom Typ V 1 angesetzt werden. Da im Rahmen der mikroskopischen Analyse des Verkehrsablaufs nur ein geringer Anteil der notwendigen Fahrstreifenwechsel der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge im Ausfahrbereich beobachtet wurde, wurde der Fokus bei der Entwicklung des Kapazitätsmodells auf den Einfahrbereich der Verflechtungsstrecke gelegt.

Im Rahmen der Verkehrssicherheitsanalyse wurden 74 Verflechtungsstrecken mit durchgehender Blockmarkierung in Nordrhein-Westfalen und Hessen untersucht. Die Grundlage der Untersuchung bildeten Unfalldaten der Unfälle mit mindestens schwerwiegendem Sachschaden sowie Verkehrsdaten von Dauerzählstellen der Jahre 2015 bis 2019. Neben der Ermittlung von Unfallraten und -dichten als Kenngrößen der Verkehrssicherheit wurden die maßgeblichen Merkmale der Verkehrsunfälle analysiert

3 Untersuchungsergebnisse

Die Luftbildrecherche realisierter Lösungen von Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten im Bundesautobahnnetz ergab, dass knapp 58 % der insgesamt 196 dokumentierten Verflechtungsstrecken dem Typ V 1 nach den RAA entsprechen. Fast 70 % der Verflechtungsstrecken befinden sich an Bundesautobahnen in Nordrhein-Westfalen und Hessen.

Bei der Analyse des q-v-Diagramms, der Fahrstreifenaufteilung und des Geschwindigkeitsverhaltens konnten deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Verflechtungsstrecken ermittelt werden, die jedoch im Wesentlichen auf den Typ des Verflechtungsbereichs zurückzuführen sind. Die Analyse des Fahrstreifenwechselverhaltens ergab, dass unabhängig von der Länge der Verflechtungsstrecke nur ein geringer Anteil der Fahrstreifenwechsel der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge im Ausfahrbereich (200 m Entfernung vor dem Ende der Blockmarkierung) durchgeführt wird. Des Weiteren nehmen mit steigender Länge der Verflechtungsstrecke die Anteile der Fahrstreifenwechsel der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge im Einfahrbereich (200 m Entfernung ab dem Beginn der Blockmarkierung) ab. Anhand dieser Ergebnisse wird ersichtlich, dass ein- und ausfahrende Fahrzeuge die zur Verfügung stehende Verflechtungslänge für den notwendigen Fahrstreifenwechsel ausnutzen. Unabhängig von der Verflechtungslänge wird der notwendige Fahrstreifenwechsel jedoch größtenteils bereits bis 200 m vor dem Ende der Blockmarkierung durchgeführt.

Die Analyse unterschiedlicher Ansätze zur Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils bei der Ermittlung der Kapazität von Verflechtungsstrecken ergab für die betrachteten Ansätze keine

bessere Anpassung des Pkw-Gleichwerts an die empirischen Daten als der bestehende Ansatz des HBS. Daher wurde für die Kapazitätsanalyse zur Umrechnung von Lkw in Pkw-Einheiten der Ansatz des HBS mit einem konstanten Pkw-Gleichwert von 2,0 Pkw-E/Lkw angewendet. Für die Analyse der weiteren möglichen Einflussgrößen auf die Kapazität lag lediglich für Verflechtungsbereiche des Typs V 1 ein ausreichend großes Kollektiv vor. Im Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse haben lediglich die Länge der Verflechtungsstrecke und die Verkehrsstärkeanteile des einfahrenden und des ausfahrenden Verkehrs einen signifikanten Einfluss auf die Kapazität. Im Rahmen der Entwicklung eines Kapazitätsmodells für Verflechtungsstrecken wurden daher diese beiden Einflussgrößen berücksichtigt.

Im Rahmen der Entwicklung eines Kapazitätsmodells für dreistreifige Verflechtungsstrecken vom Verflechtungsbereichstyp V 1 zeigte sich, dass in dem untersuchten Kollektiv bei relativ langen Verflechtungsstrecken auch relativ hohe Verkehrsstärken des ausfahrenden Verkehrs vorlagen. Bei der Durchführung einer multiplen Regression für den Abstand zwischen der empirisch ermittelten Kapazität der Verflechtungsstrecke und der Bemessungskapazität des HBS für den Einfahrtstyp E 3-2 unter Berücksichtigung der Verflechtungslänge und der Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs ergab sich kein signifikanter Zusammenhang. Zur Analyse des Einflusses des ausfahrenden Verkehrs auf die Kapazität wurden die Verflechtungsstrecken näher betrachtet, bei denen eine hohe Variation der Anteile des ein- und ausfahrenden Verkehrs an der Gesamtverkehrsstärke auftrat. Anhand der Ergebnisse ließ sich kein eindeutiger Einfluss des Verkehrsstärkeanteils des ausfahrenden Verkehrs auf die Kapazität in Abhängigkeit vom Verkehrsstärkeanteil des einfahrenden Verkehrs ableiten.

Für vierstreifige Verflechtungsstrecken des Verflechtungsbereichstyps V 1 zeigte sich, dass die Kapazität unabhängig von der Verflechtungslänge sowie der Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs im Bereich der Bemessungskapazität des Einfahrtstyps E 3-3 liegt. Da die Abweichungen zwischen der empirisch ermittelten Kapazität und der Bemessungskapazität für den Einfahrtstyp E 3-3 gering sind, ist davon auszugehen, dass bereits ab einer Verflechtungslänge von 300 m die Bemessungskapazität für den Einfahrtstyp E 3-3 erreicht wird.

Zur Bewertung der Verkehrsqualität von Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten wurde der Ansatz des HBS weiterentwickelt. Hierbei wurde die Einteilung von Verflechtungsstrecken in drei relevante Bereiche als Grundstruktur beibehalten. Die Ergebnisse der Kapazitätsanalyse für dreistreifige Verflechtungsstrecken vom Typ V 1-2 zeigen, dass der Modellparameter a des Funktionszusammenhangs zwischen der Kapazität der Verflechtungsstrecke und den Verkehrsstärken auf der Hauptfahrbahn oberhalb der Verflechtungsstrecke und in der Einfahrt am Beginn der Verflechtungsstrecke nur in Abhängigkeit von

der Länge der Verflechtungsstrecke variiert werden muss. Als Untergrenze der Funktion zur Ermittlung des Modellparameters a wird eine Verflechtungslänge von 300 m verwendet.

Oberhalb von 1 500 m wird ein konstanter Modellparameter a von 2,7 angesetzt. Da die Kapazität für den Verflechtungsbereichstyp V 1-3 unabhängig von der Verflechtungslänge ist, wird für den Modellparameter a ein konstanter Wert von 3,8 angesetzt, der der Bemessungskapazität für den Einfahrtstyp E 3-3 entspricht.

Die Analyse der Verkehrssicherheit von Verflechtungsstrecken im Vergleich zu den Unfallkenngrößen für das gesamte Bundesautobahnnetz zeigte, dass die untersuchten Verflechtungsstrecken fahrleistungsbezogen eine durchschnittliche Unfallhäufigkeit aufweisen und somit hinsichtlich der Verkehrssicherheit unauffällig sind. Auch im Vergleich zu Literaturwerten für freie Strecken von Autobahnen sowie für Einfahrten und Ausfahrten mit Fahrstreifenaddition beziehungsweise -subtraktion ergeben sich aus den Unfallraten der untersuchten Verflechtungsstrecken keine Auffälligkeiten. Insgesamt sind Verflechtungsstrecken demnach – trotz der Vielzahl der potenziellen Konfliktsituationen aufgrund der Verflechtungsvorgänge – als unkritisch im Hinblick auf die Verkehrssicherheit zu bewerten.

Ein Vergleich der verschiedenen Entwurfsmerkmale von Verflechtungsstrecken ergab, dass symmetrische Verflechtungsstrecken verkehrssicherer als asymmetrische Verflechtungsstrecken sind. Der Großteil des Untersuchungskollektivs bestand aus Verflechtungsstrecken des Typs V 1 an zwei- oder dreistreifigen Hauptfahrbahnen. Zwischen den Unfallkenngrößen der beiden Teilkollektive konnten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Die Betrachtung der räumlichen Verteilung der Unfälle an Verflechtungsstrecken ergab, dass sich Unfälle an Verflechtungsstrecken des Typs V 1 häufiger am Beginn als am Ende des Verflechtungsbereichs ereignen.

Im Zuge der Analyse der Unfallmerkmale wurde ermittelt, dass Unfälle im Längsverkehr (Unfalltyp 6) mit einem Zusammenstoß mit einem Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet (Unfallart 2), oder mit einem seitlich in gleicher Richtung fahrenden Fahrzeug (Unfallart 3) die häufigsten Kombinationen aus Unfalltyp und Unfallart an Verflechtungsstrecken darstellen. Für die Verflechtungsstrecken des Typs V 1 wurden außerdem detaillierte Unfalltypen, Unfallursachen und die Arten der Verkehrsbeteiligung ausgewertet. Die Analyse der detaillierten Unfalltypen ergab, dass auf Verflechtungsstrecken an dreistreifigen Hauptfahrbahnen deutlich mehr Auffahrunfälle durch Fahrstreifenwechsel und an zweistreifigen Hauptfahrbahnen mehr Auffahrunfälle auf einen Stau auftreten. "Geschwindigkeit" gehört unabhängig von der Fahrstreifenanzahl der Hauptfahrbahn zu den zwei häufigsten Unfallursachen. An zweistreifigen Hauptfahrbahnen zählen außerdem "Abstand" und an dreistreifigen Hauptfahrbahnen "Nebeneinanderfahren" zu den domi-

nierenden Unfallursachen. Der Anteil von Güterkraftfahrzeugen als Hauptverursacher von Verkehrsunfällen war sowohl an zweistreifigen als auch an dreistreifigen Hauptfahrbahnen höher als der mittlere Anteil am Verkehrsaufkommen.

4 Schlussfolgerungen

Im Ergebnis der Untersuchungen stellen Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten an Autobahnen eine leistungsfähige und verkehrssichere Entwurfslösung dar. Im Bundesautobahnnetz sind bereits zahlreiche Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten realisiert worden, die überwiegend dem Verflechtungsbereichstyp V 1 mit einem durchgehenden Verflechtungstreifen an einer zwei- oder dreistreifigen Richtungsfahrbahn entsprechen. Die für diesen Verflechtungsbereichstyp gewonnenen Erkenntnisse wurden in ein einfach anwendbares Kapazitätsmodell überführt, welches sich an das bestehende Kapazitätsmodell des HBS für Verflechtungsstrecken anlehnt und für dreistreifige Verflechtungsbereiche zusätzlich die Länge der Verflechtungsstrecke als Einflussgröße berücksichtigt. Für andere Verflechtungsbereichstypen ist die mikroskopische Verkehrsflusssimulation weiterhin ein geeignetes Verfahren zur Ermittlung der Qualität des Verkehrsablaufs.

Im Hinblick auf die Fortschreibung der RAA ergibt sich aus der Untersuchung die Empfehlung, dass die Mindestlänge von Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten, bezogen auf den Abstand der Sperrflächenspitzen, 300 m betragen soll. Zudem ist die Längendefinition von Verflechtungsstrecken mit anderen Richtlinien (RMS, RWBA) zu vereinheitlichen.