

## Analyse und Entwicklung leistungsfähiger Einfahrtstypen ohne Fahrstreifenaddition für Autobahnen

FA 2.426

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen – Planung u. Management (Prof. Dr.-Ing. J. Geistefeldt)

Bearbeiter: Geistefeldt, J. / Sauer, J. / Brandenburg, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Dezember 2021

### 1 Aufgabenstellung

Die Qualität des Verkehrsablaufs auf Autobahnen wird maßgeblich durch planfreie Knotenpunkte beeinflusst. Durch Ausfädelungs-, Einfädelungs- und Verflechtungsvorgänge kommt es an planfreien Knotenpunkten zu Konflikten, die den Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit beeinträchtigen. Dabei stellt die Entwurfsgestaltung eines planfreien Knotenpunkts eine maßgebende Einflussgröße dar. Des Weiteren besteht vor allem im Zuge des Ausbaus von Autobahnen zunehmend die Notwendigkeit, hochleistungsfähige Einfahrten jenseits der Standardlösungen der RAA (FGSV, 2008) zu realisieren.

Die RAA (FGSV, 2008) geben drei Standardtypen für Doppel-einfahrten (EE-Typen) an, von denen der Typ EE 1 aus einer Kombination von zwei Einfahrten mit einstreifiger Einfahrtrampe (analog zu Typ E 1) gebildet wird. Neben dem Einsatz von Doppel-einfahrten stellt die Anordnung von verlängerten Einfädelungsstreifen eine geeignete Alternative für hochbelastete Einfahrten dar. Eine Verlängerung des Einfädelungsstreifens kann insbesondere auch im Bereich von Steigungsstrecken sinnvoll sein, um die Beschleunigungsstrecke für einfahrende Schwerverkehrsfahrzeuge zu verlängern. Während der Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit an Einfahrten für die Standardlösungen (Einfahrtstypen E 1 bis E 5) nach den RAA in verschiedenen Untersuchungen analysiert wurde, existieren spezifische Untersuchungsergebnisse zum Verkehrsablauf an Doppel-einfahrten und Einfahrten mit verlängerten Einfädelungsstreifen für deutsche Verhältnisse lediglich in wenigen Ansätzen.

Ziel des Forschungsprojekts war es, den Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit an Doppel-einfahrten, Einfahrten mit überlangem Einfädelungsstreifen sowie Sonderlösungen für hoch belastete Einfahrten zu analysieren. Aus den Erkenntnissen zum Verkehrsablauf und zum Unfallgeschehen wurden Empfehlungen für die Entwurfsgestaltung und die verkehrstechnische Bemessung sowie Hinweise zur Verkehrssicherheit an hochleistungsfähigen Einfahrten ohne Fahrstreifenaddition abgeleitet.

### 2 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden bereits realisierte Lösungen hinsichtlich des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit empirisch analysiert sowie weitere Lösungen entwickelt und anhand mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen bewertet. Die Untersuchung umfasste insbesondere verschiedene Varianten von Doppel-einfahrten und Einfahrten mit überlangem Einfädelungsstreifen, aber auch baulich aufwändigere Sonderlösungen. Im Hinblick auf die Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs an Doppel-einfahrten wurde vor allem der mögliche Einfluss einer vom Regelfall abweichenden Fahrstreifenaufteilung auf der Hauptfahrbahn oberhalb der zweiten Einfahrt infolge des an der ersten Einfahrt einfahrenden Verkehrs analysiert. Bei einem überlangen Einfädelungsstreifen war vor allem dessen Nutzung über seine Länge im Hinblick auf die Bewertung des Verkehrsablaufs von Interesse. Dazu wurde das Fahrstreifenwechselverhalten vom Einfädelungsstreifen auf die Hauptfahrbahn anhand von Verkehrsmessungen analysiert.

Für die Bewertung der Verkehrssicherheit wurden Unfallkenngrößen und Verteilungen der relevanten Unfalltypen, -arten und -ursachen, differenziert nach den Entwurfsmerkmalen der Einfahrt und den relevanten verkehrlichen Einflussgrößen, ermittelt und Vergleichswerten aus der Literatur gegenübergestellt. Dabei wurde auch die räumliche Verteilung der Unfälle über die Ausdehnung der Einfahrt einschließlich der Zu- und Nachlaufstrecken analysiert.

Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation diente einerseits dazu, die Datengrundlage der empirischen Erhebungen um nicht oder nicht ausreichend beobachtete Randbedingungen zu erweitern. Dazu zählte insbesondere die Analyse des Einflusses von Steigungsstrecken im Bereich hoch belasteter Einfahrten, da diese Einflussgröße nicht anhand von Untersuchungsstellen empirisch analysiert werden konnte. Andererseits wurde mittels Simulation eine neu entwickelte Lösung für hoch belastete Einfahrten, die bislang nicht realisiert wurde, verkehrstechnisch analysiert und bewertet.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die Ermittlung der Kapazität der untersuchten Einfahrten erfolgte sowohl für die Zählstellendaten als auch für die Simulationsergebnisse anhand einer Analyse der Mittelwerte der Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch. Für die untersuchten Doppel-einfahrten vom Typ EE 1 an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen zeigte sich, dass diese sowohl an der zweiten Einfahrt als auch in der ganzheitlichen Betrachtung eine hohe Kapazität aufweisen. Die ermittelte Kapazität der zweiten Einfahrt liegt fast immer über der Bemessungskapazität des HBS

(FGSV, 2015) für den Einfahrtstyp E 1-2. Dabei ist die Summe der Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch in der zweiten Einfahrt und auf der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt nahezu konstant. Daraus lässt sich schließen, dass in der Regel nicht der Einfädelungsprozess an der zweiten Einfahrt, sondern die Kapazität der Hauptfahrbahn stromabwärts der Einfahrt maßgebend für die Kapazität der zweiten Einfahrt ist. Ein negativer Einfluss der unmittelbar stromaufwärts liegenden ersten Einfahrt auf die Kapazität der zweiten Einfahrt besteht somit nicht. Eine ganzheitliche Betrachtung des durchfahrenden und des insgesamt einfahrenden Verkehrs an den Doppeleinfahrten ergab, dass die Kapazität größtenteils höher als die Bemessungskapazität zweistreifiger Einfahrten des Typs E 4-2 ist. Für Doppeleinfahrten der Typen EE 1 und EE 2 an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen entspricht die Kapazität bei einer Betrachtung der gesamten Einfahrt ungefähr der Bemessungskapazität des Einfahrtstyps E 4-3.

Die mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen ergaben, dass die Längsneigung auf der Hauptfahrbahn einen maßgeblichen Einfluss auf die Kapazität einer Doppeleinfahrt hat. Die ermittelten Kapazitäten bei einer Längsneigung von 4 % sind deutlich geringer als die Kapazitäten bei 0 % Längsneigung.

Im Hinblick auf den Abstand  $l_w$  zwischen den beiden Einfahrbereichen an Doppeleinfahrten konnte im Rahmen der Analyse des Verkehrsablaufs ermittelt werden, dass eine Verlängerung des in den RAA (FGSV, 2008) festgelegten Mindestabstands von 150 m zu keiner deutlichen Erhöhung der Kapazität führt. Die mikroskopische Analyse des Verkehrsablaufs zeigte, dass viele Fahrzeuge im Bereich zwischen dem Ende des ersten Einfädelungstreifens und dem Beginn der zweiten Einfahrt vom rechten auf den linken beziehungsweise mittleren Fahrstreifen der Hauptfahrbahn wechseln. Hierdurch verringert sich der Anteil kleiner Zeitlücken auf dem rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn zwischen dem Ende des ersten Einfädelungstreifens und dem Beginn der zweiten Einfahrt so stark, dass der Verkehrsablauf an der zweiten Einfahrt nicht wesentlich beeinflusst wird. Dieser Effekt konnte an allen untersuchten Doppeleinfahrten mit Ausnahme der Doppeleinfahrt an der Autobahn A 61 am AK Mönchengladbach, die einen besonders geringen Abstand von  $l_w = 70$  m zwischen den beiden Einfahrten aufweist, festgestellt werden.

Für die untersuchten Einfahrten vom Typ E 1 mit verlängertem Einfädelungstreifen an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen liegt die empirisch ermittelte Kapazität deutlich über der Bemessungskapazität für den Einfahrtstyp E 1-2 nach dem HBS (FGSV, 2015). Für Einfahrten mit verlängertem Einfädelungstreifen an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen zeigte sich, dass die empirisch ermittelte Kapazität lediglich im Bereich relativ hoher Verkehrsstärken in der Einfahrtrampe von der Bemessungskapazität für den Einfahrtstyp E 1-3 abweicht und hier ebenfalls höhere Werte annimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch Einfahrten mit einem 250 m langen Einfädelungstreifen gemäß der Regellänge der RAA (FGSV, 2008) oft

Kapazitäten erreichen, die über den entsprechenden Bemessungskapazitäten des HBS liegen. Ein Vergleich unterschiedlicher Längen des Einfädelungstreifens mithilfe der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ergab, dass sich eine Verlängerung des Einfädelungstreifens positiv auf die Kapazität von Einfahrten an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen mit hohem Schwerverkehrsanteil auswirken kann. Dabei bestätigten sich Erkenntnisse aus der Untersuchung von GEISTEFELDT und SIEVERS (2017), nach denen bei hohen Schwerverkehrsanteilen ein verringerter Pkw-Gleichwert anzusetzen ist.

Bei der Untersuchung verlängerter Einfädelungstreifen war die Nutzung über deren Länge im Hinblick auf die Auswirkungen auf den Verkehrsablauf von Interesse. Hierzu wurde anhand von Verkehrsmessungen das Fahrstreifenwechselverhalten vom Einfädelungstreifen auf die Hauptfahrbahn analysiert. Dabei zeigte sich, dass der Anteil der Fahrzeuge, die nicht innerhalb der ersten 200 m von der Markierungsspitze den Fahrstreifenwechsel auf die Hauptfahrbahn durchführen, bei den Lkw höher ist als bei den Pkw. Insgesamt wurde die vollständige Länge der verlängerten Einfädelungstreifen jedoch nur in geringem Umfang durch die einfahrenden Fahrzeuge genutzt. Dies erklärt die geringen Auswirkungen einer Verlängerung des Einfädelungstreifens auf die Kapazität der Einfahrt.

Im Rahmen der Sicherheitsanalyse wurden neben der Berechnung von Unfallraten und -kostenraten die maßgebenden Unfallmerkmale analysiert sowie die Videoaufnahmen der durchgeführten Verkehrsmessungen hinsichtlich auftretender Konfliktsituationen qualitativ bewertet. Die an den untersuchten Doppeleinfahrten und Einfahrten mit verlängertem Einfädelungstreifen ermittelten Unfallhäufigkeiten sind im Vergleich zum Gesamtunfallgeschehen auf Bundesautobahnen grundsätzlich als unauffällig einzustufen. Insbesondere an den untersuchten Doppeleinfahrten des Typs EE 2 sowie den Einfahrten des Typs E 1 mit verlängertem Einfädelungstreifen an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen sind vergleichsweise geringe Unfallkostenraten berechnet worden. Die höchsten mittleren Unfallraten und -kostenraten wurden an den Doppeleinfahrten des Typs EE 1 an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen festgestellt. Dies ist allerdings auf die hohen Unfallraten und -kostenraten einer einzigen Doppeleinfahrt mit sehr kurzen Einfädelungstreifen und einem Abstand zwischen den Einfahrten von weniger als 150 m zurückzuführen, an der bereits eine Fahrstreifenbegrenzung zur Unterbindung von Fahrstreifenwechseln auf der Hauptfahrbahn angeordnet ist.

Bei der Überprüfung von Zusammenhängen der verkehrlichen und entwurfstechnischen Randbedingungen mit den Unfallraten und Unfallkostenraten zeigte sich, dass sowohl die Unfallrate als auch die Unfallkostenrate an Doppeleinfahrten des Typs EE 1 an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen bei steigender Verkehrsstärke der beiden Einfahrten ansteigen. Für alle untersuchten Doppeleinfahrten des Typs EE 1 wurde unter Ausschluss des o. g. Ausreißerwerts ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Verhältnis des DTV der Einfahrten zum

DTV unterhalb der Doppeleinfahrt und der Unfallrate und -kostenrate festgestellt. Mit einer Poisson-Regression wurde zusätzlich überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen mehreren Randbedingungen und der Unfallanzahl im Beobachtungszeitraum an den Doppeleinfahrten des Typs EE 1 besteht. Dabei wurde ein Modell entwickelt, das mit den DTV-Werten der Einfahrten und der Hauptfahrbahn, der Fahrstreifenanzahl auf der Hauptfahrbahn sowie der Länge der Einfahrtöffnung der zweiten Einfahrt fünf signifikante Einflussgrößen berücksichtigt. Für Einfahrten des Typs E 1 mit verlängertem Einfädungsstreifen ergab sich lediglich zwischen dem DTV unterhalb der Einfahrt und der Unfallkostenrate an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen ein signifikanter Zusammenhang. Eine Abhängigkeit der Unfallrate und Unfallkostenrate von der Länge des Einfädungsstreifens konnte weder an zwei- noch an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen festgestellt werden.

Die mikroskopische Analyse von Unfallmerkmalen führte zu dem Ergebnis, dass Unfälle im Längsverkehr und Zusammenstöße mit vorausfahrenden Fahrzeugen sowohl an Doppeleinfahrten als auch an Einfahrten mit verlängertem Einfädungsstreifen die am häufigsten registrierten Unfalltypen beziehungsweise Unfallarten sind. Als Unfallursachen sind "Geschwindigkeit" und "Abstand" an allen untersuchten Einfahrtstypen am häufigsten aufgeführt worden. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen der Videobeobachtungen, in denen geringe Zeitlücken auf der Hauptfahrbahn und auf dem Einfädungsstreifen und damit verbundene Bremsmanöver und Unterschreitungen der Sicherheitsabstände als Konfliktsituationen beobachtet wurden.

Jenseits der Standardlösungen der RAA (FGSV, 2008) wurde eine fiktive Sonderlösung für eine hochleistungsfähige Einfahrt analysiert, bei welcher der rechte Fahrstreifen der Hauptfahrbahn im Bereich der Einfahrt getrennt geführt wird, um den einfahrenden Verkehrsstrom auf den zweiten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn einfädeln zu können und somit Konflikte zwischen einfahrenden Pkw und durchfahrenden Lkw zu minimieren. In der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation erwies sich diese Lösung vor allem bei hohen Schwerverkehrsanteilen auf der Hauptfahrbahn als besonders leistungsfähig. Für eine Umsetzung dieser Lösung wären allerdings die Vorteile für die Kapazität der Einfahrt gegen die möglichen Nachteile der Teilung der Hauptfahrbahn für die Verkehrssicherheit sowie den zusätzlichen Breitenbedarf und baulichen Aufwand für die planfreie Querung der Einfahrtrampe und des rechten Fahrstreifens der Hauptfahrbahn abzuwägen.

#### 4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den durchgeführten Untersuchungen folgende Empfehlungen für die Fortschreibung der Richtlinien für den Entwurf von Autobahnen:

- Für Doppeleinfahrten sollte am Mindestabstand der RAA (FGSV, 2008) zwischen den beiden Einfahrten von 150 m festgehalten werden. Bei Planungsprojekten ist sowohl aus Gründen der Verkehrsqualität als auch im Hinblick auf die Verkehrssicherheit auf die konsequente Einhaltung dieses Mindestwerts zu achten.
- Die Verlängerung des Einfädungsstreifens kommt zur Verbesserung des Verkehrsablaufs insbesondere an Einfahrten an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen mit hoher Längsneigung und/oder einem hohem Schwerverkehrsanteil in Betracht.

Für die Fortschreibung der Richtlinien für die verkehrstechnische Bemessung von Autobahnen ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Doppeleinfahrten können nach dem bereits im HBS (FGSV, 2015) enthaltenen Ansatz durch die Auflösung in zwei voneinander unabhängige Einfahrten verkehrstechnisch bewertet werden. In der ganzheitlichen Betrachtung der beiden Einfahrtröme erreichen Doppeleinfahrten vom Typ EE 1 damit in der Regel eine mit dem Einfahrttyp E 4 vergleichbare Kapazität.
- Für die verkehrstechnische Bemessung von Einfahrten mit verlängertem Einfädungsstreifen reicht der Hinweis aus, dass mit einer Verlängerung des Einfädungsstreifens von Einfahrten an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen mit einem hohen bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteil und/oder einer Steigung im Einfahrbereich eine moderate Erhöhung der Kapazität erreichbar ist, deren Ausmaß unter den spezifischen Randbedingungen mithilfe alternativer Verfahren zu ermitteln ist.
- Für die verkehrstechnische Bemessung von Einfahrten sollte der Vorschlag von Geistefeldt und Sievers (2017), bei hohen bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteilen einen verringerten Pkw-Gleichwert zur Umrechnung der Schwerverkehrsstärken in Pkw-Einheiten anzusetzen, umgesetzt werden, da dieser auch in der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden konnte.

Bedarf für eine Anpassung der Richtlinien für die Markierung und Beschilderung von Doppeleinfahrten und Einfahrten mit verlängertem Einfädungsstreifen ergibt sich aus den durchgeführten Untersuchungen nicht.