

Entwurf und Bemessung von Autobahnknotenpunkten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Elementen

FA 2.219

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Brillon)

Bearbeiter: Betz, C.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: März 2007

1 Aufgabenstellung

Die Kapazität und die Qualität des Verkehrsablaufs auf Autobahnabschnitten werden maßgeblich durch planfreie Knotenpunkte beeinflusst. Hier kommt es durch Ausfädelungs-, Einfädelungs- und Verflechtungsvorgänge immer wieder zu Konflikten, die den Verkehrsablauf beeinträchtigen können.

Bisher gibt es für die einzelnen Teilelemente von Autobahnknotenpunkten eine lange Serie von Forschungsarbeiten, die sich mit den Entwurfsdetails, der Kapazität und der Sicherheit auseinandersetzen. Die bisherige Forschung beschränkt sich allerdings weitgehend auf die separate Betrachtung der einzelnen Elemente Einfahrt, Ausfahrt und Verflechtung. Die Auswirkungen der Linienführung, des Querschnitts, des Schwerverkehrsanteils, der Funktion und Lage, der Geschwindigkeitsregelung und von betrieblichen Maßnahmen werden dabei eingehend betrachtet.

Gerade bei dichten Knotenpunktabständen gibt es aber Einflussfaktoren, die bisher nicht weiter untersucht wurden. So ist davon auszugehen, dass sich die einzelnen Elemente auch untereinander beeinflussen können. Probleme beim Verkehrsablauf entstehen nicht bei teilweise ausgelasteten Elementen. Wechselwirkungen treten vor allem dann auf, wenn sich ein Rückstau von einem Element in ein stromaufwärts liegendes Element ergibt. Dann wird durch den Rückstau das stromaufwärts liegende Element blockiert.

Ziel dieses Projekts war es, die Anwendbarkeit des HBS 2001 bei nahe beieinander liegenden Knotenpunkten zu überprüfen sowie die Wechselwirkungen zwischen den Elementen von Autobahnknoten zu erforschen.

2 Untersuchungsmethodik

Ausgangspunkt der Untersuchungen war eine umfassende Analyse der nationalen und internationalen Erkenntnisse zu Ausbau und Bemessung von Knotenpunkten. Dabei wurden die wichtigsten deutschen Regelwerke und wissenschaftlichen Arbeiten zur Kapazität von Einfahrten, Ausfahrten und Verflechtungsstrecken zusammenfassend betrachtet. Es zeigte sich, dass bisher in Deutschland noch keine Untersuchungen zu dem Zusammenspiel verschiedener Elemente in naher Abfolge vorliegen. Nur in den USA gibt es im Kapitel "Free-way Facilities" des Highway Capacity Manuals 2000 ein Verfahren zur Beurteilung von Streckenabschnitten, in denen auch Knotenpunkte unterschiedlichster Ausbaumform berücksichtigt werden können. Um Berechnungen für den übersättigten Zustand durchzuführen, werden dort Simulationsprogramme zur Hilfe genommen. Im Rahmen dieses Projekts wurde das Programm FREEVAL näher betrachtet.

Für die empirische Analyse des Verkehrsablaufs wurden insgesamt 9 Videomessungen an hoch belasteten Autobahnknoten

durchgeführt. Die Messstellen wurden nach Ortsbesichtigung und Informationen der zuständigen Straßenbauverwaltungen in Absprache mit dem Betreuerkreis ausgewählt. Es handelte sich dabei um drei Kleeblattknoten, zwei unkonventionell ausgebauten Autobahnkreuze und drei Messstellen mit nahem Abstand von Autobahnknoten der Ausbaumform "Einfahrt – Strecke – Ausfahrt" sowie eine Verflechtungsstrecke. Weiterhin wurden Daten von Dauerzählstellen an mehreren hoch belasteten Knotenpunkten zur Ergänzung der Messungen beschafft.

Aus den Videomessungen wurde die Verkehrsstärke an unterschiedlichen repräsentativen Bezugsquerschnitten in 1-Minuten- und 5-Minuten-Intervallen ermittelt. Um feststellen zu können, ob die Grenzen der Qualitätsstufen nach HBS 2001 auch auf Messstellen mit naher Knotenpunktfolge zutreffen, wurden die Videoaufnahmen der Messstellen zusätzlich visuell überprüft. Zur Einschätzung der Qualität des Verkehrsablaufs kam die Definition der Qualitätsstufen nach HBS 2001 zum Einsatz. Weiterhin wurden Vergleiche zu den bekannten Erkenntnissen zur Fahrstreifenaufteilung auf Richtungsfahrbahnen (Sparmann, 1978; Busch, 1984; Westphal, 1995) gezogen. Für ausgewählte Messungen wurden Geschwindigkeiten, Fahrstreifenwechselverhalten und Folgezeitlücken ermittelt.

Mikroskopische Simulationen mit dem Programm BABSIM ergänzten die empirische Analyse des Verkehrsablaufs. Das Simulationsprogramm wurde dabei mithilfe der Daten der Dauerzählstellen und der Messungen kalibriert.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Kleeblattknoten

Bei der Untersuchung der Kleeblattknoten ist festzustellen, dass Ausfahrten zu Autobahnknoten des Typs A 1 an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen höhere Verkehrsstärken bewältigen können als im HBS 2001 angegeben. Es konnte dabei eine durchschnittliche Verkehrsstärke von 1 700 Kfz/h in der Ausfahrt mit einer Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV) D–E erreicht werden. Die Ursache hierfür ist vermutlich, dass in Ausfahrten auf Verteilerfahrbahnen allein aufgrund der Geometrie eine größere Geschwindigkeit gefahren werden kann, als in Ausfahrten, welche in einer Schleifenrampe oder in einen vorfahrtgeregelten bzw. signalgesteuerten Knotenpunkt münden. Im Bereich der Kapazitätsgrenze konnte kein Vergleichswert beobachtet werden.

Aufgrund der Messungen und bekräftigt durch die Ergebnisse der Simulationsstudien konnten außerdem folgende Erkenntnisse gewonnen werden: An Verflechtungsstrecken in Kleeblattknotenpunkten können im Vergleich zum HBS 2001 sehr hohe Verkehrsstärken abgewickelt werden (durchschnittlich 2 430 Pkw-E/h bei einer QSV im Bereich D und E). Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass je nach Lage der Kleeblattknoten innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen das Fahrverhalten variiert. An Verflechtungsstrecken, die regelmäßig überlastet sind, kann eine höhere Verkehrsstärke bewältigt werden. Für Verflechtungsstrecken (in Verteilerfahrbahnen) in Ballungsräumen kann somit eine Kapazität von 2 400 Pkw-E/h angenommen werden.

3.2 Modifizierte Knotenpunkte

Die Videomessungen an modifizierten Knotenpunkten zeigten, dass Einfahrten aus Verteilerfahrbahnen von Autobahnkreuzen des Typs E 1 in Ballungsgebieten eine Einfädelungsverkehrsstärke von mindestens $q_M = 2\,400$ Pkw-E/h bewältigen können.

Wechselwirkungen zwischen Knotenpunktelementen treten dann auf, wenn sich ein Rückstau von einem Element in ein stromaufwärts liegendes Element ergibt. Je länger dieser Rückstau andauert, desto mehr nachfolgende Elemente werden beeinträchtigt. Durch die Analyse der Stauausbreitung an einer Messstelle konnte an diesem Beispiel ein Verfahren zur Ermittlung der "Restkapazität" der stromaufwärts beeinträchtigten Elemente bei einfachen Systemen von Knotenpunkten mit nahen Abständen dargestellt werden. Dieses Verfahren ist nur auf sehr nahe Knotenpunktabstände anwendbar. Sobald die Entfernung zwischen den Knotenpunkten zunimmt oder die Systeme komplexer sind (z. B. Kleeblattknoten) gewinnen zeitliche Variationen der Verkehrsnachfrage sowie unterschiedliche Stauausbreitungsgeschwindigkeiten eine immer größer werdende Bedeutung. Hier muss die räumliche Stauausbreitung mit berücksichtigt werden. Für zweistreifige Hauptfahrbahnen gilt dabei eine Stauausbreitungsgeschwindigkeit von $u = -15$ km/h als gute Approximation. Weil sich hier das einfache Rechenergebnis aus der Kontinuitätstheorie bestätigt, kann unterstellt werden, dass für dreistreifige Fahrbahnen

$$u \cong -17 \text{ km/h bis } -19 \text{ km/h}$$

aus der Anwendung der Kontinuitätstheorie übernommen werden kann. Für eine Untersuchung komplexer Systeme ist allerdings eine Simulationsstudie am besten geeignet. Aufgrund dessen wurde das Programm BABSIM bezüglich seiner Eignung zur Simulation von Streckenabschnitten mit enger Knotenpunktfolge untersucht.

3.3 Elementfolge "Einfahrt – Strecke – Ausfahrt" an Hauptfahrbahnen

Die Einschätzung der tatsächlichen Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs mit den Qualitätsstufen nach HBS 2001 ergab kein einheitliches Bild für diese Messstellen. Wichtig für die Einschätzung der Qualität des Verkehrsablaufs ist der rechte Fahrstreifen der Hauptfahrbahn. Hier wurden die meisten Beeinträchtigungen beobachtet.

Für nahe Knotenpunktabstände der Form "Einfahrt (Typ E 1) – Strecke – Ausfahrt (Typ A 1)" an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen können aus der Datenbasis folgende Resultate zusammengefasst werden: Die Analyse von Fahrstreifenwechseln auf dem Abschnitt zwischen Einfahrt und Ausfahrt ergab, dass sich 200 m vor Beginn der Ausfahrt 90 % der ausfahrenden Fahrzeuge schon auf dem rechten Fahrstreifen befinden. Im Bereich 300 m vor der Ausfahrt finden die meisten Fahrstreifenwechsel statt. Die Qualität des Verkehrsablaufs kann dadurch unter Umständen oberhalb der Ausfahrt schlechter sein, als an der Ausfahrt selbst. Hierbei wird die Kapazität des rechten Fahrstreifens ausschlaggebend für die Überlastung der Strecke. Der rechte Fahrstreifen kann dabei mindestens eine Verkehrsstärke von 2 000 Kfz/h bewältigen. Für die Ermittlung der Verkehrsbelastung des rechten Fahrstreifens ca. 200 m vor der Ausfahrt wurde ein Berechnungsverfahren hergeleitet, das die Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn oberhalb der Einfahrt, der Einfahrt und der Ausfahrt berücksichtigt. Ein Einfluss des Abstands zwischen Ein- und Ausfahrt konnte nicht ermittelt werden, da die Messstellen, die zur Herleitung der Formel verwendet wurden, nahezu gleiche Abstände aufwiesen. Außerdem wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Fahrstreifenbelastung oberhalb der Ausfahrt allgemein ohne Berücksichtigung der Einfahrt wiedergeben kann. Zur Berechnung werden dabei die Verkehrsstärken der durchfahrenden und ausfahrenden Fahrzeuge verwendet.

Durch die Simulationsstudie konnte die Vermutung verifiziert werden, dass zur Beurteilung der Kapazität einer Ausfahrt die Kapazität des rechten Fahrstreifens stromaufwärts der Ausfahrt

verwendet werden sollte. Die Leistungsengpässe traten dabei ca. 300 m vor Beginn des Ausfädelungsstreifens auf. Dieser Punkt entspricht der Lage der ersten Entfernungsboje. Es kann gefolgert werden, dass dieser Punkt auch auf Messstellen zutrifft, welche außerhalb des Einflussbereichs von stromaufwärts gelegenen Knotenpunkten liegen.

3.4 BABSIM

Die Simulationsstudien mit BABSIM zeigten, dass das Programm prinzipiell geeignet ist, Systeme von nahe liegenden Knotenpunkten zu simulieren. Einzig bei größeren und komplexeren Systemen treten Ungenauigkeiten bei der Nachbildung des Verkehrsablaufs auf, weil das Programm nicht davon ausgeht, dass die Fahrer an den einzelnen Abschnitten eines Knotenpunkts unterschiedliche Verhaltensparameter anwenden. Das Verhalten der Verkehrsteilnehmer im Stau kann bis auf einige Ausnahmen nachgebildet werden. Um eine noch bessere Übereinstimmung mit dem Fahrverhalten in der Realität zu erreichen, ist es sinnvoll in Zukunft, eine elementbezogene Einstellungsoption für Verhaltensparameter anzubieten. Zusätzlich sollten spezielle Parameter des Fahrverhaltens für Stauzustände implementiert werden.

4 Folgerungen für die Praxis

Aus den vorherigen Untersuchungen und Ergebnissen, lassen sich für die Bewertung von planfreien Knotenpunkten folgende Empfehlungen geben:

Bei der Bewertung von planfreien Knotenpunkten sollte das Lagekriterium "innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen" eingeführt werden.

Es werden dabei folgende Werte für Knotenpunkte innerhalb von Ballungsräumen vorgeschlagen.

Für Verflechtungsstrecken des Typs VR 1 sollte die Grenze der Qualitätsstufe E nach F auf 2 400 Pkw-E/h festgelegt werden.

Die Grenze zwischen der QSV E und F für Einfahrten aus Autobahnkreuzen des Typs E 1 an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen sollte auf eine Verkehrsstärke von 2 400 Pkw-E/h erhöht werden.

Generell ist die Bewertung von Einfahrten bevorzugt über die Einfädelungsverkehrsstärke durchzuführen. Dadurch kann der teilweise erhöhte Belegungsgrad des rechten Fahrstreifens oberhalb der Einfahrt bei geringen Knotenpunktabständen in die Bewertung mit einfließen.

An Ausfahrten des Typs A 1 an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen in Autobahnkreuzen (Ballungsraum) sollte die Grenze der QSV E/F auf 1 700 Kfz/h angehoben werden. Eine noch höhere Grenze ist denkbar – jedoch bisher nicht belegbar.

Bei der Bewertung der Verkehrsqualität von Ausfahrten ist der Querschnitt der Richtungsfahrbahn oberhalb des Ausfädelungsfahrstreifens einzubeziehen. Der rechte Fahrstreifen dieses Querschnitts kann eine Verkehrsstärke von mindestens 2 000 Kfz/h bewältigen. Zur Ermittlung der Verkehrsbelastung des rechten Fahrstreifens in Kombination mit einer stromaufwärts liegenden Einfahrt kann die entwickelte Formel verwendet werden.

Der Verkehrsablauf an Streckenabschnitten mit geringen Knotenpunktabständen lässt sich nur bei einer gesamtheitlichen Betrachtung aller Elemente richtig einschätzen. So ist eine detaillierte Analyse der Schwachpunkte in der Elementabfolge notwendig. Diese Analyse kann nach den bisher bekannten Grundlagen des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen für jedes Einzelelement durchgeführt werden.

Ist das schwächste Glied der Kette identifiziert, sollte ermittelt werden, welche Auswirkungen dies auf stromaufwärts liegende Elemente hat. Dies kann bei direkter räumlicher Nähe der Elemente durch ein einfaches Bilanzierungsverfahren, welches den einfahrenden und ausfahrenden Verkehr berücksichtigt, erfolgen. Es kann dabei angenommen werden, dass dem einfahrenden Verkehr immer die Vorfahrt vor dem Verkehr auf der Hauptfahrbahn gewährt wird und alle ausfahrenden Fahrzeuge (im Rahmen der oben genannten Grenzen für den Typ A 1) ungehindert abfließen können. Liegen die Elemente weiter auseinander, muss die räumliche Ausbreitung der Stauerschei-

nungen mit berücksichtigt werden. Für zweistreifige Hauptfahrbahnen hat sich dabei eine Stauausbreitungsgeschwindigkeit von 15 km/h als gute Näherung erwiesen. Bei komplexen Systemen sollte, um die Beeinträchtigungen der stromaufwärts liegenden Elemente zu ermitteln, am besten ein Simulationsprogramm (z. B. BABSIM) verwendet werden. Denkbar ist dafür auch die Herstellung eines Programms, das (ähnlich zu dem Programm FREEVAL, welches für die Bemessung von "Free-way Facilities" des HCM 2000 entwickelt wurde) auf Rechenverfahren der Kontinuumstheorie basiert.