

Konzept zur Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA

FA 3.424

Forschungsstellen: BSV Büro für Stadt- und Verkehrsplanung
Dr.-Ing. Reinhold Baier GmbH, Aachen

Karlsruher Institut für Technologie, Institut
für Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. P. Vortisch)

Technische Universität Dresden, Professur
für Integrierte Verkehrsplanung und Straßen-
verkehrstechnik (Prof. Dr.-Ing. R. Gerike)

Bearbeiter: Vortisch, P. / Baier, M. M. / Schuck-
ließ, W. / Schmotz, M. / Schimpf, M. /
Leyn, U. / Buck, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale
Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Juli 2017

1 Aufgabenstellung

Das "Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen" (HBS) bewertet die Qualität des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten anhand der mittleren Wartezeit je Fahrzeug. Diese werden von verschiedenen Aspekten des Verkehrsablaufs beeinflusst, die einen bekannten oder vermuteten Einfluss auf die Gesamtdurchfahrtszeit der Verkehrsteilnehmer haben. Einige dieser Aspekte sind voneinander unabhängig, bei anderen sind Zusammenhänge naheliegend.

Dabei sind zwei Themen sowohl einzeln als auch in ihrer gemeinsamen Auswirkung zu berücksichtigen: die verschiedenen Komponenten der Verlustzeit an Knotenpunkten und ihre Abbildung in den Verfahren des HBS (2015) sowie der Einfluss von Instationarität der Zuflüsse auf die Wartezeiten. Auf der Basis empirischer Messungen ist eine genauere Untersuchung dieser Fragestellungen mithilfe von Simulationen möglich.

2 Untersuchungsmethodik und Untersuchungsergebnisse

Die empirische Basis des Projekts waren Videomessungen an 21 Knotenpunkten unterschiedlicher Ausbauform und Regellungsart. Bei 15 Knotenpunkten wurden über zwei Stunden an allen Zufahrten in einem weitgehend manuellen Vorgang für jedes Fahrzeug mehrere Zeitstempel extrahiert, die zum Beispiel die Ankunft des Fahrzeugs am Warteschlangenanfang, an der Haltlinie oder das Verlassen des Knotenpunkts markieren. Ebenfalls per Videobeobachtung wurde an zwei Knotenpunkten das Anfahrverhalten gemessen und an vier Knotenpunkten die Blockierung der Fußgängerfurt für Abbieger bestimmt. Ergänzt wurden die Messungen durch Simulationsrechnungen, um weitere Belastungsfälle zu betrachten als die bei den Messungen aufgetretenen.

Ein großer Aufwand war bei der Kalibrierung der Simulationsmodelle erforderlich. Die Knotenpunkte wurden zunächst in VISSIM als Netzmodelle aufgebaut und mit den Festzeitprogrammen versorgt, die zum Messzeitpunkt aktiv waren. Dann wurde die bei der Messung erhobene Belastungssituation, also der Verkehrsstärkeverlauf, über den Messzeitraum in 5-Minuten-Intervallen für jeden Strom nachgebildet. Als erste Ergebnisgröße der Simu-

lation wurde die Durchfahrtszeit für jeden Strom betrachtet. Berücksichtigt wurden nur Durchfahrten ohne Wartezeiten oder Behinderungen, enthaltene Zeitverluste sind also nur dem sogenannten "geometric delay" zuzurechnen. Die Durchfahrtszeiten wurden in der Simulation mithilfe sogenannter "Langsamfahrbereiche" eingestellt. Dies sind kurze Streckenabschnitte, auf denen die simulierten Fahrzeuge ihre Wunschgeschwindigkeit reduzieren. Es konnte eine sehr gute Reproduktion der "freien" Durchfahrtszeiten erreicht werden.

Die nächste kalibrierte Größe ist der für die Kapazität eines Fahrstreifens ausschlaggebende Zeitbedarfswert. Die Zeitbedarfswerte wurden differenziert nach Fahrstreifen und nach Warteposition des Fahrzeugs in der Warteschlange kalibriert. Dies ist bei den meisten Knotenpunkten gut gelungen. Zur Beurteilung der Kalibrierungsgüte insgesamt wurden dann die Gesamtdurchfahrtszeiten (mit Wartezeiten) zwischen Messung und Simulation für die einzelnen Fahrstreifen verglichen. Auch hier ergab sich im Mittel eine gute Übereinstimmung.

Bei der Analyse der Zeitbedarfswerte fiel auf, dass die Zeit, die das erste Fahrzeug vor der Haltlinie zum Anfahren bei Grünbeginn benötigt, sich zwar in der Simulation im Mittel gut einstellen lässt, in der Realität aber viel stärker streut als in der Simulation. Es wurde deshalb an zwei zusätzlichen Knotenpunkten speziell das Anfahrverhalten bei Grünbeginn gemessen. Die so ermittelten Verteilungen des Zeitbedarfs des ersten Fahrzeugs wurden dem Hersteller des Simulationswerkzeugs zur Verfügung gestellt, der daraufhin eine benutzerdefinierte Anfahrzeitverteilung ins Produkt aufgenommen hat.

An Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage hat die Gegenüberstellung der aufgetretenen Wartezeiten aus Messung und Simulation bei der gemessenen Belastungssituation mit den durch das Verfahren des HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten gezeigt, dass hier Differenzen bestehen, auch wenn man berücksichtigt, dass ein Vergleich von stark mit zufälligen Schwankungen behafteten Messungen mit den mittelwertorientierten Ergebnissen einer HBS-Berechnung mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Abweichungen der Berechnungsergebnisse nach dem HBS (2015) und den Ergebnissen aus Messungen können im Einzelfall erheblich sein, jedoch liegen die mittleren Wartezeiten meist in der gleichen Größenordnung. Der Verlauf der Wartezeit in Abhängigkeit von der Auslastung im HBS (2015) stimmt hinsichtlich der Form gut mit den Ergebnissen der Simulation überein, allerdings liegen die nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten fast immer über den simulierten Werten, wenn im HBS (2015) genau die in der Simulation verwendeten Zeitbedarfswerte eingesetzt werden. Insbesondere sind die Streuungen der Verlustzeiten an realen Knotenpunkten und die Unterschiede zwischen nach HBS (2015) berechneten und gemessenen Wartezeiten deutlich größer als die aus der Knotenpunktform resultierenden Verlustzeitkomponenten.

Der differenzierte Vergleich der berechneten mittleren Wartezeit nach dem HBS (2015) und der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit zeigt, dass in der Simulation die Wartezeiten bei hohen Auslastungsgraden deutlich höher sind. Ebenfalls hat sich hinsichtlich der Rückstaulänge bei Freigabezeitende gezeigt, dass diese bei hohen Auslastungsgraden in der Simulation deutlich größer ist als die nach dem HBS (2015) berechnete Rückstaulänge. Die simulativ ermittelten Rückstaulängen sind in einzelnen Fällen bis zu 3,5-mal länger als die berechnete Rückstaulänge

bei Freigabezeitende, wodurch die festgestellten Unterschiede zwischen der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit und der berechneten mittleren Wartezeit zu erklären sind. Der nahezu sprunghafte Anstieg der Rückstaulänge in der Simulation bei hohen Auslastungsgraden legt nahe, dass der ursprüngliche Ansatz des HBS (2001), die Rückstaulänge bei Freigabezeitende in Abhängigkeit des Auslastungsgrads in Stufen zu berechnen, durchaus sinnvoll erscheint. Die Überführung in eine durchgängige Funktion ist zwar anwenderfreundlicher, führt aber bei hoch ausgelasteten Fahrstreifen anscheinend zu deutlichen Unterschätzungen der Rückstaulänge bei Freigabezeitende und damit der mittleren Wartezeit. Hier sind vertiefende Untersuchungen erforderlich.

Beim Vergleich von HBS-Berechnung und Messung beziehungsweise Simulation wurden außerdem in einzelnen Situationen Beobachtungen gemacht, die im Rahmen der Fortschreibung des HBS vertieft berücksichtigt beziehungsweise noch vertieft untersucht werden sollten:

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Einfluss der Längsneigung auf die Sättigungsverkehrsstärke im HBS (2015) stark überschätzt wird. Zwar war nur ein Knotenpunkt mit signifikanter Steigung enthalten, aber die Überschätzung war deutlich. Vermutlich beruhen die im HBS (2015) genannten Einflussfaktoren noch auf veralteter Fahrzeugtechnik und sollten erneuert werden, da die heutigen Fahrzeuge über stärkere Motorisierung und Anfahrhilfen an Steigungen verfügen.

Weiterhin wurde der Einfluss bevorrechtigter Fußgänger- beziehungsweise Radfahrerströme auf die Wartezeit von Abbiegern betrachtet. Im HBS (2015) ist eine Funktion vorgegeben, die in Abhängigkeit von der Anzahl bevorrechtigter Personen eine zusätzliche Wartezeit für Abbieger festlegt. Zur Überprüfung wurden an vier Knotenpunkten Videomessungen speziell hinsichtlich des Konflikts von Abbiegern mit Fußgänger- und Radfahrerfurten durchgeführt. In der Auswertung wurde bestimmt, wie lange die Furt tatsächlich für die Abbieger blockiert war. Als Ergebnis wird eine Funktion mit etwas anderem Verlauf vorgeschlagen, der bei wenigen Personen höhere Blockierzeiten vorsieht, dann aber flacher verläuft als die ursprüngliche Kurve.

An Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage hat sich durch den Vergleich der berechneten mittleren Wartezeit nach dem HBS (2015) und der simulativ ermittelten mittleren Wartezeit gezeigt, dass die nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten bei hohen Kapazitäten eher überschätzt und bei niedrigen eher unterschätzt werden. Als Folge daraus wird eine geringfügige Modifikation der Wartezeitgleichung des HBS (2015) vorgeschlagen.

Im Hinblick auf die mittleren Verlustzeiten (gegenüber der freien Durchfahrt ohne Knotenpunkt) lässt sich festhalten, dass diese – über alle Stromkonstellationen und Belastungsfälle betrachtet – im Mittel um etwa 6 s höher sind als die mittleren Wartezeiten, die in der Simulation bestimmt wurden. Damit liegt die Differenz zwischen Verlust und Wartezeit in etwa in der Größenordnung, wie sie unter anderem auch schon Brilon (2003) für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage allgemein angegeben hat. Zudem "passt" diese Größenordnung auch zu den zusätzlichen Zeitverlusten vor und hinter Einmündungen und Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage, die von Baier et al. (2012) abgeleitet wurden und im HBS (2015) für die anlagenübergreifende Betrachtung von Netzabschnitten angegeben sind.

Um den Einfluss der Instationarität an signalisierten Knotenpunkten zu betrachten, wurde eine festzeitgesteuerte Zufahrt bei unterschiedlichen Umlaufzeiten, Grünzeitanteilen und Auslast-

ungsgraden simuliert. Die Zufahrt wurde eine Stunde mit der immer gleichen Gesamtmenge an Fahrzeugen, aber verteilt auf die Stunde gemäß den verschiedenen Instationaritätsprofilen belastet. Als Ergebnis wurden die Verlustzeiten aller Fahrzeuge bestimmt. Das Modell wurde grundlegend so kalibriert, dass im Fall stationären Zuflusses diese Verlustzeiten mit den mittleren nach HBS (2015) berechneten Wartezeiten übereinstimmen.

Die in der Simulation der verschiedenen Ganglinienprofile bestimmten Verlustzeiten wurden dann miteinander und mit den nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten verglichen. Dabei wurde für jedes Profil der Instationaritätsfaktor wie im HBS (2015) definiert berechnet und verwendet. In der Regel ergaben sich deutliche Unterschiede in der Verlustzeit. Das ist auch plausibel, weil der im HBS verwendete Instationaritätsfaktor nur das Verhältnis von höchstbelastetem 15-Minuten-Intervall und Stundenwert betrachtet und nicht berücksichtigt, ob der Belastungsverlauf innerhalb der Stunde fallend oder steigend ist. Die Simulationsrechnungen zeigen jedoch, dass dies für die Wartezeiten im Bereich hoher Auslastungen ein großer Unterschied ist.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wird ein erweiterter Instationaritätsfaktor vorgeschlagen, um den Einfluss der Instationarität an signalisierten Knotenpunkten genauer berücksichtigen zu können. Dieser ist abhängig vom Auslastungsgrad und enthält darüber hinaus eine Variable, die beschreibt, ob die Belastung innerhalb der Stunde ansteigt, fällt, symmetrisch oder konstant ist. Ob die damit erreichte höhere Genauigkeit der Wartezeitberechnung die höhere Komplexität, die dadurch in das Verfahren kommt, rechtfertigt, muss bei der Fortschreibung des HBS abgewogen werden.

Eine Instationarität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage kann im vorfahrtsberechtigten oder im wartepflichtigen Strom auftreten. Insgesamt konnte jedoch bei mit Verkehrszeichen vorfahrtgeregelten Einmündungen und Kreuzungen kein signifikanter Einfluss der Instationarität ermittelt werden.

Abschließend wurde noch betrachtet, wie die einzelnen Komponenten der Verlustzeit in den Berechnungsverfahren berücksichtigt werden, insbesondere, ob der "geometric delay" behandelt wird. Dazu betrachten wir einen sogenannten knotenpunktstypspezifischen Grundzeitverlust $t_{w,G}$, der durch das reine Vorhandensein des Knotenpunkts entsteht, ohne dass eine Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer vorhanden ist. Der Teil dieses zusätzlichen Zeitverlusts, der durch das Verzögern vor und das notwendige Beschleunigen hinter dem Knotenpunkt entsteht, ist im HBS in Kapitel S6 "Netzabschnitte" für die verschiedenen Knotenpunkttypen beschrieben. Daneben ergibt sich bei der Berechnung der Wartezeit nach Kapitel S4 und S5 ein knotenpunktstypspezifischer Grundzeitverlust, wenn die Bewertung mit einer Belastung gegen 0 für den untersuchten Strom beziehungsweise Fahrstreifen durchgeführt wird.

Für den Grundzeitverlust an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage gilt für einen Auslastungsgrad $x = 0$ und mit der Vereinfachung $t_u = t_A + t_S$ dabei eine Wartezeit von $t_{w,G} = t_S^2(2t_u)$, das ist die Wartezeit, die dadurch entsteht, dass ein zufällig ankommendes Fahrzeug während der Sperrzeit eintrifft und bis zum Freigabebeginn warten muss. Nach Kapitel S6 sind zur Beurteilung der Verlustzeit abhängig von der Wartezeit zusätzlich zwischen 1,5 und 2 s hinzuzuaddieren. Anhand der kalibrierten Simulationsmodelle zu den Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage lässt sich diese Gesamtverlustzeit ebenfalls analysieren. Dazu wurden die Simulationsläufe mit sehr geringer Belastung betrachtet und man erhält, abhängig von der Umlauf- und Freigabezeit, sehr ähnliche

Verlustzeiten. Die Verlustzeit wurde dabei im Vergleich zur Simulation mit Fahrzeugen bestimmt, die nicht durch eine Lichtsignalanlage beeinflusst werden.

Für den Grundzeitverlust an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage ergibt sich bei einer Belastung von 0 Fz/h im Hauptstrom genau die Folgezeitlücke $t_{w,G} = t_F$. Zusätzlich werden nach Kapitel S6 2,0 s für Knotenpunkte mit Zeichen 205 StVO und 8,5 s mit Zeichen 206 StVO addiert, um einen Netzabschnitt bewerten zu können. Es wurden ebenfalls Simulationen der kalibrierten Modelle für Knotenpunkte mit Zeichen 205 StVO mit sehr geringer Nebenstrombelastung durchgeführt, wobei im Hauptstrom kein Verkehr erzeugt wurde. Diese Simulationsstudien ergeben eine Verlustzeit von etwa 6 s. Die Vergleichsgröße waren ebenfalls Fahrzeuge, die durch ein von Konfliktflächen unbeeinflusstes Netz der gleichen Geometrie gefahren sind. Da die Folgezeitlücken in der Größenordnung von 3 bis 4 s liegen, ergeben sich hier übereinstimmende Ergebnisse zwischen HBS und Simulation. Für Knotenpunkte mit Zeichen 206 StVO lassen sich keine vergleichbaren Ergebnisse mithilfe von Simulationsmodellen erzielen, da die Standzeit an der Stopplinie eine direkte Einstellgröße in VISSIM darstellt. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die für Kapitel S6 empirisch ermittelten Größen anwendbar sind und zu plausiblen Ergebnissen führen.

Für den Grundzeitverlust an Kreisverkehrsplätzen gelten sowohl für die Simulation als auch für das Berechnungsverfahren nach HBS die gleichen Rahmenbedingungen wie für Knotenpunkte mit Zeichen 205 StVO. Ausschließlich die Abhängigkeit von der Fahrtbeziehung wurde bisher nicht näher betrachtet und fehlt im Bewertungsverfahren. Da die Fahrtbeziehung maßgeblich bestimmt, wieviel Strecke auf der Kreisfahrbahn zurückzulegen ist, bestimmt dies auch die Verlustzeit im Gegensatz zu einer Geometrie, die ein direktes Abbiegen ohne Kreisfahrbahn ermöglicht.

3 Folgerungen für die Praxis

An Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage hat die Gegenüberstellung der aufgetretenen Wartezeiten bei der gemessenen Belastungssituation aus Messung und Simulation zu den mit dem Verfahren des HBS (2015) berechneten mittleren Wartezeiten gezeigt, dass hier zwar im Einzelfall Differenzen bestehen, die Wartezeiten aber meist in der gleichen Größenordnung liegen. Die nach dem HBS (2015) berechneten Wartezeiten liegen fast immer über den simulierten Werten, was dem konservativen Ansatz des HBS (2015) entspricht. Der Verlauf der Wartezeit in Abhängigkeit von der Auslastung im HBS (2015) stimmt hinsichtlich der Form gut mit den Ergebnissen der Simulation überein. Bei einzelnen Komponenten der Berechnungsverfahren bestehen die folgenden Verbesserungsmöglichkeiten:

Der Einfluss der Instationarität an Knotenpunkten mit Lichtsignalsteuerung sollte mit dem erarbeiteten neuen Instationaritätsfaktor abgebildet werden, um auch unsymmetrische Belastungsverläufe in der Bemessungsstunde korrekt zu behandeln.

Die Wartezeitberechnung bei unsignalisierten Knotenpunkten sollte geringfügig modifiziert werden, um den Einfluss der Kapazität besser abzubilden.

Der Einfluss der Längsneigung auf die Sättigungsverkehrsstärke sollte vertieft untersucht werden; das aktuelle Verfahren überschätzt den Einfluss wahrscheinlich deutlich.

Der Einfluss bedingt verträglicher Fuß- und Radfahrerströme auf die Kapazitäten der abbiegenden Fahrzeugströme sollte vertieft untersucht werden.

Außerdem sollten zur Verbesserung der Simulationspraxis Hinweise zur HBS-konformen mikroskopischen Simulation von Knotenpunkten erarbeitet und als Regelwerk zur Verfügung gestellt werden.