

Bewertung der Verkehrsqualität in planfreien, teilplanfreien und teilplangleichen Knotenpunkten von Landstraßen

FA 3.442

Forschungsstelle: RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen
(Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oeser)

Bearbeiter: Oeser, M. / Steinauer, B. / Klein,
A. / Becher, T. / Diner, E. /
Sümmermann, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und
Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Mai 2013

1 Aufgabenstellung

Die bisherigen Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS) bzw. für die Anlage von Landstraßen (RAL) mit ihren verschiedenen Teilen, Abschnitten und Ergänzungen wurden grundlegend überarbeitet und dabei zu den "Richtlinien für die Anlage von Landstraßen" (RAL) zusammengefasst. Nach dem Konzept dieser neuen Richtlinien sollen Landstraßen stärker als bisher standardisiert werden. Hierzu sind in den RAL Entwurfsklassen (EKL) definiert, nach denen sowohl die Regelquerschnitte der Strecken als auch die Knotenpunktarten ausgewählt werden sollen.

Die RAL führen neben den plangleichen auch planfreie, teilplanfreie und teilplangleiche Knotenpunkte mit Empfehlungen für den Entwurf der verschiedenen Knotenpunktelemente aus. Für die Verkehrsqualität an diesen Knotenpunkten sind vor allem die Zusammenhänge zwischen der Betriebsform, der Ausbildung der Knotenpunktelemente und der Trassierung von Interesse. Derzeit sind diese Zusammenhänge noch nicht hinreichend bekannt, sodass diesbezüglich Forschungsbedarf besteht.

Eine Bewertung der Verkehrsqualität der Ein- und Ausfahrten planfreier und teilplanfreier Knotenpunkte ist nach dem HBS (2001) nur an zweibahnigen Straßen möglich und erfolgt wie für die angrenzenden Strecken über den Auslastungsgrad, wohingegen für Strecken von Landstraßen die Verkehrsdichte als Qualitätskriterium dient. Je nach vorliegender Fahrstreifenanzahl ist daher eine Bewertung bisher entweder nicht möglich oder hinsichtlich des Qualitätskriteriums nicht konsistent mit den angrenzenden Strecken.

Für den Entwurf des HBS (201X) wurden daher anhand theoretischer Überlegungen Verfahren entwickelt, mit denen eine Bewertung der Ein- und Ausfahrten planfreier und teilplanfreier Knotenpunkte an Landstraßen über die Verkehrsdichte vorgenommen werden kann. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden Verkehrserhebungen mit dem Ziel durchgeführt, diese Verfahren auf ihre Anwendbarkeit hin zu überprüfen.

Die plangleichen Teilknotenpunkte teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkte (d. h. Einmündungen/Kreuzungen bzw. Kreisverkehre) können bisher nach dem HBS (2001) lediglich getrennt bewertet werden. Ansätze zur Bewertung der Verkehrsqualität mehrerer Verkehrsströme unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den Teilknotenpunkten liegen bisher nicht vor. Daher sind integrierte Aussagen über die Ver-

kehrsqualität eines gesamten teilplanfreien oder teilplangleichen Knotenpunkts derzeit nicht möglich.

Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, das Auftreten von Wechselwirkungen zwischen plangleichen Teilknotenpunkten und deren Auswirkungen auf die Verkehrsqualität zu untersuchen. Basierend darauf wurden unter Berücksichtigung der bestehenden Verfahren des HBS (2001) Methoden für die zusammenfassende Bewertung der Verkehrsqualität teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkte entwickelt. Darüber hinaus wurden zur Bewertung der Qualität definierter Verbindungen nach den "Richtlinien für integrierte Netzgestaltung" (RIN) Untersuchungen zu mittleren Fahrtgeschwindigkeiten im Knotenpunktbereich durchgeführt.

2 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen der Untersuchung wurde eine Analyse der Verkehrsqualität planfreier, teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkte von Landstraßen durchgeführt. Grundlage hierfür waren neben einer Literaturanalyse zu den Einflussgrößen auf die Verkehrsqualität Erhebungen an realen Knotenpunkten und eine Simulationsstudie an standardisierten Knotenpunkten mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation.

2.1 Verkehrserhebungen

Um ein möglichst breites Spektrum an Knotenpunkten in die Untersuchung einzubeziehen und eine fundierte Datengrundlage zu gewinnen, wurden insgesamt 30 Verkehrserhebungen durchgeführt, die sich wie folgt auf die relevanten Knotenpunktarten verteilen:

- 5 Erhebungen an planfreien Knotenpunkten,
- 15 Erhebungen an teilplanfreien Knotenpunkten (Betriebsformen LSA/LSA, KVP/KVP und unsignalisierte Einmündung) sowie
- 10 Erhebungen an vier teilplangleichen Knotenpunkten (Betriebsformen LSA/LSA und LSA/KVP).

Die angrenzenden Streckenabschnitte wiesen sowohl "2+2"-, "2+1"- als auch "1+1"-Querschnitte auf. Aufgrund fehlender geeigneter Knotenpunkte wurden ausschließlich dreiarmlige planfreie Knotenpunkte untersucht und teilplangleiche Knotenpunkte mehrfach erhoben.

Im Rahmen der Erhebungen wurden im Bereich der Untersuchungsknotenpunkte Verkehrszählungen, Radarmessungen und Nachfolgefahrrten durchgeführt.

2.2 Simulationsstudie

Die an realen Knotenpunkten erhobenen Kenngrößen wurden für die nachfolgende Simulationsstudie zur Kalibrierung und Validierung der Modelle herangezogen. Um eine weitgehende Übereinstimmung mit den Vorgaben der RAL (2012) zu erreichen, wurde für das Simulationsexperiment eine Standardisie-

zung der Knotenpunkte vorgenommen. In den Szenarien des Simulationsexperiments wurden die Höhe der Verkehrsbelastung bis zur Überlastung des Knotenpunkts, die Richtung des dominierenden Eckstroms (Belastungsmuster), die Höhe des SV-Anteils (10 %, 20 %) und die Abstände der Teilknotenpunkte variiert.

Zur Bewertung des Verkehrsablaufs wurden die Fahr- und Verlustzeiten im Einflussbereich des Knotenpunkts, der Fahrzeugzufluss auf die Teilknotenpunkte, die Pulkbildung und mittlere Fahrtgeschwindigkeiten ausgewertet. Abschließend wurden die simulativ ermittelten Verlustzeiten den rechnerischen Verlustzeiten bei einer getrennten Bemessung der Teilknotenpunkte nach dem HBS gegenübergestellt. Für unsignalisierte Teilknotenpunkte wurden die rechnerischen Verlustzeiten durch einen Zuschlag von fünf Sekunden auf die Wartezeiten abgeschätzt, um Vergleiche zwischen Betriebsformen sowie zwischen Simulationsmodell und dem HBS zu ermöglichen. Aufgrund der zu erwartenden weitgehenden Übereinstimmungen der Verfahren des HBS (2001) und des HBS (201X) bezüglich mittlerer Wartezeiten und Staulängen wurde davon ausgegangen, dass die auf dem HBS (2001) beruhenden Erkenntnisse aus den hier gezogenen Vergleichen auf das HBS (201X) übertragbar sind.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Literaturanalyse zu Knotenpunkten an Landstraßen

Die Analyse der Technischen Regelwerke und weiterer Literatur hat gezeigt, dass die Verkehrsqualität und die Leistungsfähigkeit planfreier, teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkte von zahlreichen Einflussgrößen abhängen, wobei die Zusammenhänge zwischen den Entwurfs- und Betriebsparametern und der resultierenden Leistungsfähigkeit zumeist qualitativ beschrieben werden.

Für zukünftige Planungen ergeben sich bezüglich der Geometrie planfreier und teilplanfreier Landstraßenknotenpunkte nach den RAL (2012) nur geringfügige Änderungen gegenüber den bisherigen Regelwerken. Geometrische Parameter wie Rampenradien und Längen von Ein- und Ausfädelungstreifen werden zudem bei der Bewertung des Verkehrsablaufs nach dem HBS (2001/201X) nicht berücksichtigt. Eine Anwendbarkeit der Bewertungsverfahren auf (reduzierte) geometrische Randbedingungen planfreier und teilplanfreier Landstraßenknotenpunkte wurde daher als gegeben angesehen.

Die plangleichen Teilknotenpunkte teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkte können auf Grundlage des HBS (2001/201X) hingegen gegenwärtig nur eingeschränkt bemessen werden. Aufgrund des geringen Abstands der Teilknotenpunkte können diese nicht mehr als unabhängig voneinander angesehen werden, womit eine Grundvoraussetzung der Bemessungsverfahren verletzt ist. Da mögliche Wechselwirkungen zwischen den Teilknotenpunkten nicht berücksichtigt werden können, ist sowohl für teilplanfreie als auch für teilplangleiche Knotenpunkte daher keine zusammenfassende Bewertung möglich.

3.2 Ergebnisse der Verkehrserhebungen

Die Ermittlung der gleitenden Spitzenstunde ergab für die planfreien und teilplanfreien Knotenpunkte eine überwiegend schwache bis moderate Belastung der Ein- und Ausfahrbereiche sowie der angeschlossenen Streckenabschnitte. Die teilplangleichen Knotenpunkte wiesen im Vergleich dazu ein insgesamt höheres Belastungsniveau auf.

Im Rahmen der Erhebungen konnten nur vereinzelt Überlastungen oder Wechselwirkungen zwischen den Teilknotenpunkten beobachtet werden. Lediglich an drei Untersuchungsknotenpunkten traten Überlastungssituationen wie z. B. anwachsender Rückstau in Zufahrten von Teilknotenpunkten und unvollständiger Fahrzeugabfluss an LSA-geregelten Teilknotenpunkten innerhalb mehrerer aufeinanderfolgender Umläufe auf.

3.3 Anwendung der Bewertungsverfahren für planfreie und teilplanfreie Knotenpunkte nach HBS (201X)

Die ermittelten Verkehrsstärken der höchstbelasteten planfreien und teilplanfreien Knotenpunkte in der Spitzenstunde wurden zu einer Anwendung der Bewertungsverfahren für Ein- und Ausfahrten nach Entwurf des Kapitels L6 des HBS (201X) herangezogen. Hierbei ergaben sich überwiegend die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs C und D. Qualitativ konnte eine weitgehende Übereinstimmung der verbalen Beschreibungen der resultierenden Qualitätsstufen mit den Beobachtungen aus den Erhebungen festgestellt werden.

3.4 Ergebnisse der Simulationsstudie zu teilplanfreien Knotenpunkten

In der Simulationsstudie ergaben sich mit ansteigender Belastung Fahrzeitzuwächse je nach Betriebsform für unterschiedliche Ströme:

- in der Betriebsform LSA/LSA vor allem für die Linkseinbieger aus der Ausfahrrampe sowie für die Linksabbieger,
- in der Betriebsform KVP/KVP hauptsächlich für die Ströme aus dem untergeordneten Netz und
- in der Betriebsform EM/EM praktisch ausschließlich für die Einbieger aus der Ausfahrrampe.

Im Vergleich war die Betriebsform KVP/KVP in der Summe aller Eckströme mit niedrigeren Verlustzeiten als die Betriebsform LSA/LSA verbunden.

In allen Betriebsformen wurden Überlastungszustände entweder in den Zufahrten aus dem untergeordneten Netz oder den Ausfahrrampen erreicht. Eine Wechselwirkung infolge eines Rückstaus zwischen den Teilknotenpunkten entstand in keinem Szenario, sodass aus dem Abstand der Teilknotenpunkte kein Einfluss auf den Verkehrsablauf abgeleitet werden konnte.

In der Gegenüberstellung des Fahrzeugzuflusses im 15-Sekunden-Intervall an der Grenze des Einflussbereichs des Knotenpunkts und im Innenbereich zwischen den Teilknotenpunkten konnte in der Betriebsform KVP/KVP mit ansteigender Belastung eine Verstetigung des Zuflusses auf den stromab-

wärts gelegenen Teilknotenpunkt beobachtet werden. Infolge einer Dosierung am Kreisverkehr traten hier vermehrt Zuflüsse von 3-5 Fahrzeugen pro Intervall auf, die sich statistisch signifikant vom Zufluss an der Grenze des Einflussbereichs unterschieden. Die Bruttozeitlücken zwischen den Fahrzeugen im Innenbereich lagen jedoch vielfach noch oberhalb eines Schwellwerts von 3 Sekunden, sodass im Vergleich der Messquerschnitte keine höhere Pulkbildung auftrat. Für die Betriebsformen LSA/LSA und EM/EM ergaben sich in der entsprechenden Gegenüberstellung keine signifikanten Unterschiede.

Im Vergleich von simulativ ermittelten zu berechneten Verlustzeiten nach HBS konnte vor allem bis zu den mittleren Belastungsstufen eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. In den höheren Belastungsstufen lagen die Verlustzeiten nach HBS tendenziell etwas niedriger als in der Simulation, wobei Überlastungen durch hohe Verlustzeiten zumeist gut abgebildet wurden. Anhand der Ergebnisse der Simulationsstudie ist daher davon auszugehen, dass für die Betriebsformen LSA/LSA und EM/EM eine getrennte Bemessung der Teilknotenpunkte nach dem HBS erfolgen kann.

Größere Abweichungen ergaben sich in der Betriebsform KVP/KVP jeweils für die Zufahrten im Innenbereich vom benachbarten Teilknotenpunkt. Die in der Simulation aufgetretenen Verlustzeiten lagen hier deutlich unterhalb den nach HBS zu erwartenden Verlustzeiten und prognostizierten Überlastungen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich die beobachtete Verstetigung des Zuflusses auf den stromabwärts gelegenen Teilknotenpunkt in der Simulation günstig auf den Verkehrsablauf und die Leistungsfähigkeit auswirkt.

Bei einem SV-Anteil von 20 statt 10 % erhöhten sich die mittleren Fahrzeiten in allen Betriebsformen gleichermaßen um ca. 2-3 %, sodass der Einfluss des Schwerverkehrs insgesamt als gering bezeichnet werden kann.

3.5 Ergebnisse der Simulationsstudie zu teilplangleichen Knotenpunkten

In beiden Betriebsformen (LSA/LSA und LSA/KVP) traten in den höheren Belastungsstufen Überlastungen der Verbindungsrampe durch ein Anwachsen des Rückstaus vor dem stromabwärts gelegenen Teilknotenpunkt auf, sodass zeitweise keine Fahrzeuge mehr in die Rampe abbiegen konnten und sich der Rückstau in die Zufahrten des stromaufwärts gelegenen Teilknotenpunkts fortpflanzte. Die Anzahl und Länge der Zeiträume dieser Überstauungen war bei der Betriebsform LSA/KVP insgesamt kleiner als bei der Betriebsform LSA/LSA. Bedingt dadurch war die Betriebsform LSA/KVP bis zum Erreichen der Leistungsfähigkeit des Kreisverkehrs im Vergleich mit niedrigeren Verlustzeiten verbunden.

Die Variation der Rampenlänge zu 200 m und 500 m führte auch für die Szenarien mit Überlastungen nur zu unwesentlichen Veränderungen der Gesamtwarezeiten. Infolge eines zusätzlichen "Stauraums" im Fall der längeren Verbindungsrampe vergrößerte sich bei anhaltend hoher Verkehrsbelastung der Warteraum bis über den stromaufwärts gelegenen Teilknotenpunkt hinaus lediglich verzögert.

Bis zu den mittleren Belastungsstufen konnte für beide Betriebsformen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der

Verlustzeiten zwischen simulativ ermittelten und berechneten Verlustzeiten nach HBS festgestellt werden. Wie bei teilplanfreien Knotenpunkten lagen in den höheren Belastungsstufen die Verlustzeiten nach Simulation grundsätzlich etwas höher als nach dem HBS. Größere Unterschiede zwischen Simulation und dem HBS ergaben sich für einzelne Ströme im Grenzbereich der Kapazität durch die zunehmende Streuung der Ergebnisse in der Simulation.

Bei einer qualitativen Betrachtung in der Verbindungsrampe konnten in beiden Betriebsformen Abweichungen vom freien Zufluss beobachtet werden. In der Betriebsform LSA/KVP trat stromabwärts des Kreisverkehrs wie bei teilplanfreien Knotenpunkten eine Verstetigung des Verkehrsflusses auf. In der Betriebsform LSA/LSA waren die Abweichungen auf die Vollsignalisierung der Teilknotenpunkte (inklusive der Rechtsabbieger) und die daraus resultierenden Sperrungen des Abflusses in die Verbindungsrampe zurückzuführen. Diese Unterschiede im Zufluss auf die Teilknotenpunkte übten zumindest für die hier betrachteten hohen Gesamtbelastungen allerdings keinen erkennbaren Einfluss auf die resultierenden Verlustzeiten aus.

Insgesamt konnte daher davon ausgegangen werden, dass die Verlustzeiten an teilplangleichen Knotenpunkten mit den Verfahren des HBS zutreffend bestimmt werden können. Die in der Simulation aufgetretenen Wechselwirkungen zwischen den Teilknotenpunkten in Form von Überstauungen der Verbindungsrampe können im Rahmen der Stauraumbemessung bzw. durch Ermittlung der Kapazitätsreserve bei Kreisverkehren nach dem HBS beim Knotenpunktentwurf berücksichtigt werden.

Bei der Ermittlung des Schwerverkehrseinflusses ergab sich anders als bei teilplanfreien Knotenpunkten kein einheitliches Bild: Während für viele Ströme Erhöhungen der mittleren Fahrzeit um ca. 2-10 % vorlagen, ergaben sich insbesondere für die Ströme aus dem untergeordneten Netz Erhöhungen um ca. 10-70 %. Eine Ursache hierfür konnte nicht abschließend ermittelt werden.

4 Folgerungen für die Praxis

4.1 Entwicklung von Verfahren zur zusammenfassenden Bewertung

Nach den Ergebnissen der Verkehrserhebungen und der Simulationsstudie können die Verfahren des HBS zur Bemessung von Landstraßenknotenpunkten mit Ausnahme teilplanfreier Knotenpunkte der Betriebsform KVP/KVP angewendet werden.

Eine zusammenfassende Bewertung teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkte kann durch Ermittlung der Wartezeiten und Bemessung der Stauräume zunächst getrennt für die plangleichen Teilknotenpunkte vorgenommen werden. Voraussetzung im Fall der Betriebsform LSA/LSA ist hierbei, dass die erforderlichen Stauräume eingerichtet werden können bzw. vorhanden sind und eine Koordinierung der beiden nebeneinanderliegenden Teilknotenpunkte erfolgt. Die zusammenfassende Bewertung des Knotenpunkts kann dann über die schlechteste ermittelte Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs erfolgen, wobei im Falle teilplanfreier Knotenpunkte auch die Ein- und Ausfahrten einbezogen werden können.

Für teilplanfreie Knotenpunkte der Betriebsform KVP/KVP wurde aufgrund der in der Simulation beobachteten Abweichungen vom freien Zufluss in den Zufahrten der Kreisverkehre vom stromaufwärts gelegenen Kreisverkehr und den dort gegenüber dem HBS niedrigeren Verlustzeiten eine Erweiterung der Bemessungsverfahren vorgeschlagen.

Basierend auf dem Verhältnis der simulativ ermittelten zu berechneten Wartezeiten nach HBS wurde ein Korrekturfaktor abgeleitet, mit dem die berechneten Wartezeiten eines Einzelkreisverkehrs angepasst und Wechselwirkungen zwischen zwei Kreisverkehren berücksichtigt werden können. Es konnte ein Diagramm entwickelt werden, aus dem dieser Korrekturfaktor in Abhängigkeit des Auslastungsgrades der Kreisverkehrszufahrt abgelesen werden kann. Mit dieser Verfahrenserweiterung kann eine zusammenfassende Bewertung auch für diese Betriebsform über die schlechteste ermittelte Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs vorgenommen werden.

4.2 Folgerungen für die Fortschreibung des HBS

Basierend auf der Bewertung der Verkehrsqualität in den Ein- und Ausfahrten der höchstbelasteten planfreien und teilplanfreien Untersuchungsknotenpunkte nach dem Entwurf des HBS (201X) kann von einer Anwendbarkeit der Verfahren ausgegangen werden. Die Einbindung der Verfahren zur Bestimmung der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten und der Verkehrsdichten für Strecken von Landstraßen (Kapitel L3 des HBS 201X) erwies sich bei der Anwendung als praktikabel.

Die gewonnenen Erkenntnisse und die hieraus abgeleiteten Ansätze ermöglichten die Anwendungsbereiche der Verfahren des HBS (201X) für Teilknotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage im Bereich teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkte zu konkretisieren bzw. im Hinblick auf eine zusammenfassende Bewertung zu erweitern. Aus den Simulationsergebnissen konnten ebenfalls Erkenntnisse zu mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten im Bereich teilplanfreier und teilplangleicher Knotenpunkten abgeleitet werden, die im Hinblick auf die Bestimmung der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten von Landstraßen von Bedeutung sind. Für die entsprechenden Kapitel des HBS (201X) wurden konkrete Formulierungsvorschläge erarbeitet.