

Gesamtkapazität an signalisierten Knotenpunkten mit kurzen Aufstellfahrstreifen

Ning Wu¹

Straßenverkehrstechnik, Heft 06/2008. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 2008

Kurzfassung

In diesem Aufsatz wird ein theoretisch-empirischer Ansatz zur Ermittlung der Zufahrtskapazität an signalisierten Knotenpunkten mit kurzen Aufstellfahrstreifen vorgestellt. Der Ansatz ist eine Erweiterung der früher vom Autor entwickelten, theoretischen Formel für kurze Aufstellfahrstreifen an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen. Diese wird auf Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen übertragen. Damit können die stochastischen Eigenschaften des Verkehrsflusses und der Blockiereffekt durch Stau innerhalb der kurzen Aufstellfahrstreifen berücksichtigt werden. Mit Hilfe des Simulationsprogramms VISSIM wurde eine umfangreiche Datenbasis für die Kalibrierung des Ansatzes unter unterschiedlichen Geometrie- und Verkehrsbedingungen erzeugt. Der vorgestellte Ansatz kann für beliebige Fahrstreifen- und Steuerungskonfigurationen verwendet werden. Für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen und einfachen Konfigurationen von kurzen Aufstellfahrstreifen können explizite Gleichungen angegeben werden. Für die praktische Anwendung wurden Monografen vorbereitet.

This paper presents a theoretical-empirical model for estimating the total approach capacity at signalized intersections with shared-short lanes. This model extends the theoretical capacity formula for shared-short lanes at unsignalized intersections, which was introduced by the author earlier, to signalized intersections. The model takes into account the stochastic nature of traffic flow and the effect of queue blockage to the short turn lanes. Using the simulation package VISSIM, a comprehensive database was generated for calibrating the model under different lane and signal control conditions. The proposed model can be used for arbitrary lane and signal timing configurations. For signalized intersections with simple shared-short lane configurations, explicit equations are given. Detailed monographs are prepared for practical applications.

Keywords. Signalized intersection, Short lane, Shared lane, Approach Capacity, Simulation

¹ Dr.-Ing. habil., Privatdozent an der Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum
Ning.Wu@rub.de, <http://homepage.rub.de/ning.wu>

1 Einleitung

Unter der Federführung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) wurde im Jahr 2001 das "Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen" erstellt. Dieses Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, kurz HBS 2001 genannt, steht seither den Benutzern zur Verfügung (FGSV, 2001, LfV, 2002). Das Kapitel 6 im HBS 2001 stellt das Verfahren zur Bemessung von Lichtsignalanlagen (LSA) dar. In diesem Kapitel werden Verfahren zur Erstellung und Bewertung festzeitgesteuerter Signalzeitenpläne dargestellt. In diesem Kapitel ist auch ein Verfahren zur Berechnung von Kapazitäten der Mischfahrstreifen und der Zufahrten mit kurzen Aufstellfahrstreifen angegeben.

Die Kapazität an einem Knotenpunkt wird in der Regel fahrstreifenbezogen berechnet. Wenn in einer Zufahrt zum Knotenpunkt Verkehrsströme mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen (links, geradeaus und rechts) denselben Fahrstreifen benutzen, wird der Fahrstreifen als Mischfahrstreifen bezeichnet. Auf einem Mischfahrstreifen behindern sich die Fahrzeuge der unterschiedlichen Fahrtrichtungen gegenseitig.

Häufig stehen abbiegenden Fahrtrichtungen auch nur kurze Aufstellfahrstreifen zur Verfügung. Diese kurzen Aufstellfahrstreifen können die volle Kapazität eines normalen (unendlich langen) Fahrstreifens nicht erreichen, wenn der Zufluss pro Umlauf größer ist als die Anzahl der vorhandenen Aufstellplätze auf dem kurzen Aufstellfahrstreifen. Die Gesamtkapazität der Zufahrt hängt wesentlich davon ab, wie die Fahrzeuge in den unterschiedlichen Fahrtrichtungen aufgeteilt sind und wie sie sich während der Freigabezeit am Verzweigungspunkt auf die einzelnen Fahrstreifen verteilen können.

Zur Überprüfung des Verfahrens für Zufahrten mit kurzen Aufstellfahrstreifen wurden umfangreiche Simulationsläufe mit dem Computerprogramm VISSIM durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Simulation dargestellt und mit den Berechnungsergebnissen nach HBS 2001 verglichen. Auf der Basis der Simulationsergebnisse wird ein neues, verallgemeinerbares Verfahren zur Berechnung der Zufahrtkapazität an signalisierten Knotenpunkten mit kurzen Aufstellfahrstreifen entwickelt.

2 Verfahren im Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001)

Das sechste Kapitel des HBS 2001 (FGSV, 2001) behandelt die Bemessung von Knotenpunkten mit LSA und enthält Berechnungsverfahren zur Überprüfung, ob die zu erwartende Verkehrsbelastung in der Bemessungsstunde mit der gewünschten Qualität des Verkehrsablaufs abgefertigt werden kann. Für Zufahrten mit kurzen Aufstellfahrstreifen ist vor allem das Unterkapitel 6.4.10 "Spezielle Konstellationen" von Bedeutung. Im Folgenden werden die Berechnungsverfahren für kurze Aufstellfahrstreifen näher betrachtet.

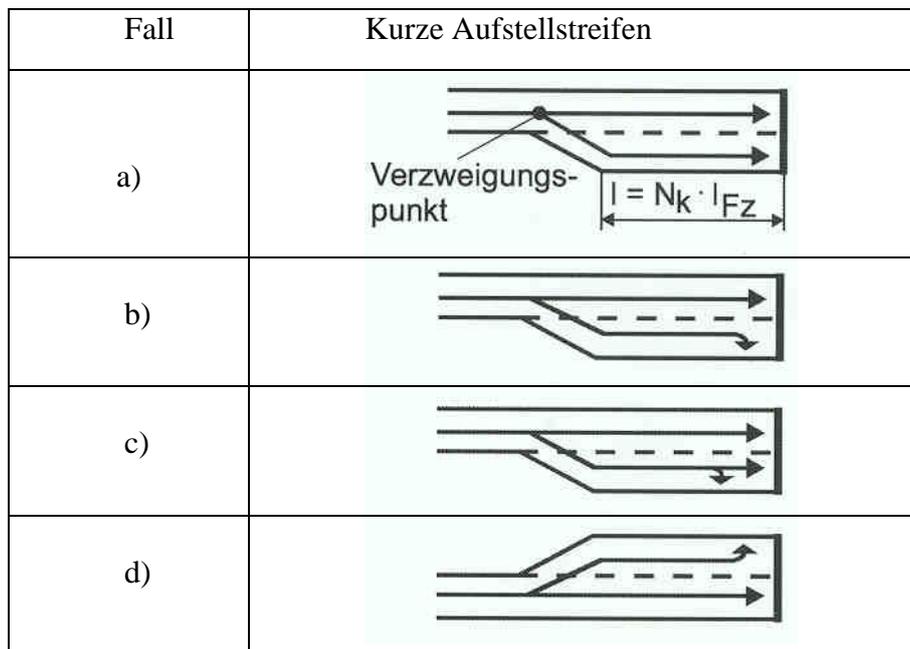


Abbildung 1 - Kurze Aufstellfahrstreifen und der Verzweigungspunkt nach HBS 2001

Abbiegefahrstreifen werden häufig als kurze Aufstellfahrstreifen ausgeführt, wenn nur eine beschränkte Fläche am Knotenpunkt zur Verfügung steht. Hier wird zur Vereinfachung der Betrachtung nur die Konstellation mit einem Geradeaus- und einem Abbiegefahrstreifen behandelt (vgl. Abbildung 1). Die Problematik der kurzen Fahrstreifen besteht darin, dass sie nicht die volle Kapazität eines normalen (unendlich langen) Fahrstreifens gemäß der Freigabezeit erreichen können, wenn der Zufluss pro Umlauf größer ist als die Anzahl vorhandener Aufstellplätze. Daher ist für die Kapazität entscheidend, wie sich die Fahrzeuge in den unterschiedlichen Fahrtrichtungen aufteilen und wie sie sich während der Freigabezeit am Verzweigungspunkt auf die einzelnen Fahrstreifen verteilen können. Die wartenden Fahrzeuge auf einem kurzen Fahrstreifen behindern den Abfluss des anderen Fahrstreifens, wenn der Rückstau länger als die Aufstellfahrstreifen ist. Je nach dem, ob beide Fahrstreifen

gleiche oder unterschiedliche Grünzeiten erhalten, ist diese Behinderung unterschiedlich ausgeprägt.

2.1 Gleiche Grünzeiten für beide Fahrstreifen

Werden beide Fahrstreifen gleichzeitig freigegeben, so ergibt sich nach HBS 2001 (FGSV, 2001) die Kapazität der gesamten Zufahrt aus der Kapazität des durchgehenden Fahrstreifens und der des kurzen Aufstellfahrstreifens:

$$C = C_1 + C_2 = f \cdot q_{S1} + N_K \cdot U \quad (1)$$

oder

$$n_c = n_{c,1} + n_{c,2} = t_f \cdot q_{S1} + N_K \quad (2)$$

mit	$C_1, C_2 =$ Kapazität der Fahrstreifen 1 und 2	[Fz/h]
	$f =$ Freigabezeitanteil = t_f/t_U	[-]
	$t_f =$ Freigabezeit	[s]
	$t_U =$ Umlaufzeit	[s]
	$q_{S1}, q_{S2} =$ Sättigungsverkehrsstärken der beiden Ströme = $3600/t_B$	[Fz/h]
	$t_B =$ Zeitbedarfswert	[s]
	$N_K =$ Anzahl der Aufstellplätze in kurzen Aufstellfahrstreifen der Länge l	[-]
	$= 1/l_{Fz}$	
	$l_{Fz} =$ Länge eines Fahrzeugs = 6 m	[m]
	$U =$ Anzahl der Umläufe pro Stunde = $3600/t_U$	[-]
	$n_c =$ Kapazität pro Umlauf = C/U	[Fz/Uml.]

Hier wird vorausgesetzt, dass die Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen 1 größer ist als die auf dem zweiten Fahrstreifen ($q_1 > q_2$). Sollte dies nicht der Fall sein, ist anstelle von q_{S1} die Sättigungsverkehrsstärke q_{S2} anzusetzen.

Hier ist bereits anzumerken, dass in der Gl.(1) nicht alle fundamentalen Randbedingungen erfüllt sind (Tabelle 1).

Tabelle 1 - Notwendige Randbedingungen der Zufahrtskapazität und deren Erfüllung durch Gl.(1) und Gl.(3)

lfd. Nr.	Randbedingung	Gl.(1)	Gl. (3)
1 ^{a)}	$C_1 \leq f \cdot q_{S1}$	erfüllt	nicht erfüllt, $N_K \cdot U$ kann größer als $f \cdot q_{S1}$ sein
2 ^{a)}	$C_2 \leq f \cdot q_{S2}$	nicht erfüllt, $N_K \cdot U$ kann größer als $f \cdot q_{S2}$ sein	nicht erfüllt, $N_K \cdot U$ kann größer als $f \cdot q_{S2}$ sein
3 ^{b)}	$C = f \cdot q_{S1}$ bei $q_1 = 0$	nicht erfüllt, q_1 hat keinen Einfluss auf C	nicht erfüllt, q_1 hat keinen Einfluss auf C
4 ^{b)}	$C = f \cdot q_{S2}$ bei $q_2 = 0$	nicht erfüllt, q_1 hat keinen Einfluss auf C	nicht erfüllt, q_1 hat keinen Einfluss auf C
5 ^{c)}	$C \rightarrow \min(f \cdot q_{S1} \cdot (q_1 + q_2) / q_1, f \cdot q_{S2} \cdot (q_1 + q_2) / q_2)$ bei $N_K \rightarrow \infty$	nicht erfüllt, $C \rightarrow \infty$ bei $N_K \rightarrow \infty$	nicht erfüllt, $C \rightarrow \infty$ bei $N_K \rightarrow \infty$
6 ^{d)}	$C = C_{\text{Misch}}$ bei $N_K = 0$	erfüllt	nicht erfüllt, $C = 0$ bei $N_K = 0$

^{a)} Die Kapazität des Kurzaufstellfahrstreifens ist immer kleiner als die Kapazität eines unendlich langen Fahrstreifens

^{b)} Die Kapazität der Zufahrt ist gleich der Kapazität eines unendlich langen Fahrstreifens, wenn bei einer der beiden Fahrtrichtungen die Belastung gleich null ist

^{c)} Das Verhältnis der Verkehrsbelastungen zwischen den beiden Fahrtrichtungen muss aufrecht erhalten bleiben

^{d)} Die Kapazität der Zufahrt ist gleich der Kapazität eines Mischfahrstreifens für $N_K=0$

2.2 Nicht gleiche Grünzeiten für beide Fahrstreifen

Erhalten beide Fahrstreifen nicht gleichzeitiges Grün, so errechnet sich nach HBS 2001 die Zufahrtskapazität zu:

$$C = C_1 + C_2 = 2 \cdot N_K \cdot U \quad (3)$$

oder

$$n_c = n_{c,1} + n_{c,2} = 2 \cdot N_K \quad (4)$$

mit $C_1, C_2 =$ Kapazität der Fahrstreifen 1 und 2 [Fz/h]

$N_K =$ Anzahl der Aufstellplätze auf einem Kurzaufstellfahrstreifen der Länge l [-]

$$= l / l_{Fz}$$

$l_{Fz} =$ Länge eines Fahrzeugs = 6 m [m]

$U =$ Anzahl der Umläufe pro Stunde = $3600 / t_U$ [-]d

$t_U =$ Umlaufzeit [s]

$$n_c = \text{Kapazität pro Umlauf} = C/U \quad [\text{Fz/Uml.}]$$

In Gl.(3) ist keine der fundamentalen Randbedingungen in Tabelle 1 erfüllt.

3 Simulation mit VISSIM

Zur Bestimmung der Gesamtkapazität von Zufahrten mit kurzen Aufstellfahrstreifen an Knotenpunkten mit LSA wurde das Programm "VISSIM 3.50" der PTV Planung Transport Verkehr AG verwendet. Jeder Simulationslauf umfasste einen dreistündigen Zeitraum und als Belastung wurden nur Pkw verwendet, deren Fahrverhalten der Standardeinstellung des Programms entspricht. Als Wunschgeschwindigkeit wurde die – ebenfalls standardisierte – Einstellung "45-60 km/h" vorgenommen. Vor dem Verzweigungspunkt wurde eine Art "Dauerstau" - Zustand erzeugt (s. Abbildung 2). Die Kapazität wurde dann als der Abfluss unmittelbar hinter den Lichtsignalanlagen ermittelt.

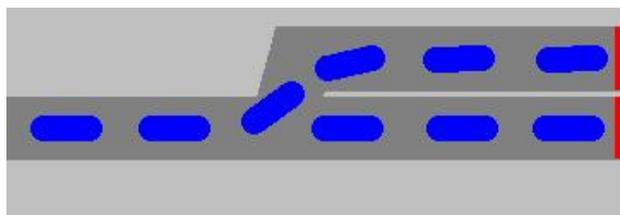


Abbildung 2 - Dauerstau vor dem Verzweigungspunkt, Screenshot aus VISSIM

Für die Simulation von kurzen Aufstellfahrstreifen wurde die in Abbildung 3 dargestellte Konfiguration der Fahrstreifen gewählt.

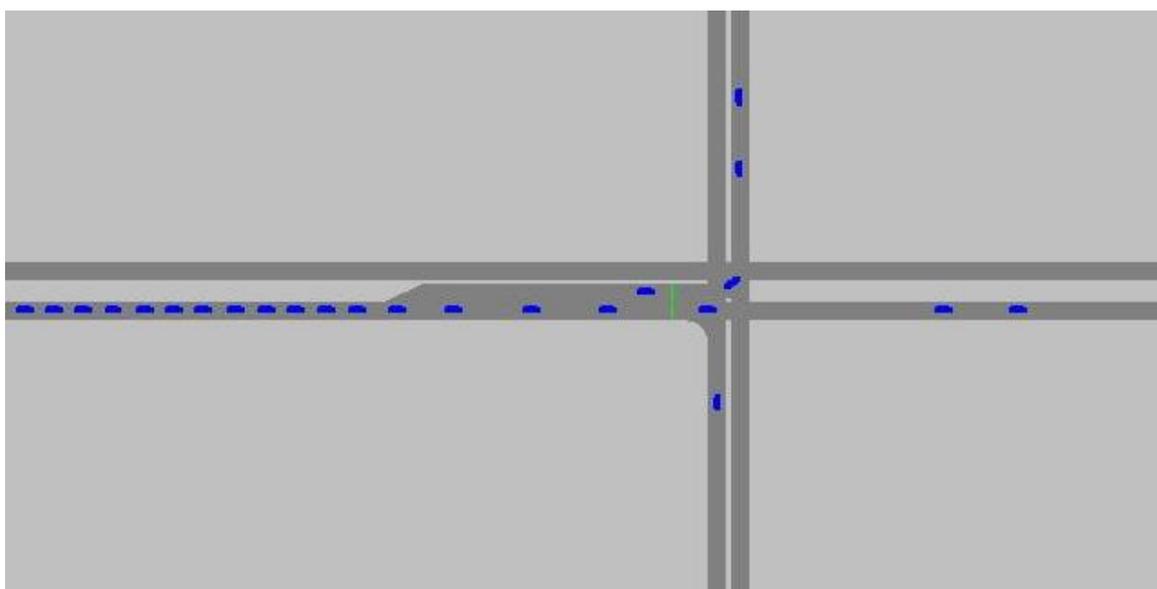


Abbildung 3 – Simulierter kurzer Aufstellfahrstreifen in einer Zufahrt

Da es bei einer solchen baulichen Situation zu zwei prinzipiellen Alternativen für die Schaltung der LSA kommen kann, ist es sinnvoll zu unterscheiden, ob beide Fahrstreifen Geradeaus/Rechtsabbieger (Index G) und Linksabbieger (Index L) gleichzeitig Grün erhalten oder ob der Linksabbieger eine andere Freigabe erhält als der geradeaus fahrende bzw. rechts abbiegende Verkehr.

Bei der gleichzeitigen Freigabe der beiden Fahrstreifen wurden folgende Parameter variiert: Umlaufzeit, Freigabezeit, Anteil der Linksabbieger und Anzahl der Aufstellplätze für den kurzen Aufstellfahrstreifen. Sowohl die Umlauf- als auch die Freigabezeit wurden in 10s-Schritten gesteigert, und zwar von 60 bis 90 Sekunden bzw. von 10 bis 40 Sekunden. Der Anteil der Linksabbieger betrug 50%, 20% und 0%. Für den kurzen Aufstellfahrstreifen standen 0, 3, 6 oder 9 Aufstellplätze zur Verfügung. Für jede Parameterkombination werden drei Stunden simuliert.

Werden die Linksabbieger nicht gleichzeitig mit den Geradeausfahrern/Rechtsabbiegern freigegeben, muss die Kombinationen der Parameter für die gleichzeitige Freigabe ein wenig verändert werden. Die Variation der Umlaufzeit, des Anteils der Linksabbieger und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Aufstellplätze bleiben unverändert. Dazu variiert noch die Freigabezeit für den geradeaus fahrenden/rechtsabbiegenden Fahrstreifen zwischen 10 und 40 Sekunden. Der links abbiegende Fahrstreifen wird mit 5, 10, 15 und 20 Sekunden freigegeben, immer eine Sekunde nach dem Rotende des geradeaus/rechtsabbiegenden Fahrstreifens. Ebenfalls drei Stunden werden für jede Parameterkombination simuliert.

4 Auswertung der Simulationsergebnisse und Vergleich mit HBS

2001

Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse wurden zuerst die Sättigungsverkehrsstärken q_s eines Fahrstreifens unendlicher Länge simuliert. In Abbildung 4 werden die Ergebnisse der Simulation und die Berechnungsergebnisse nach HBS 2001 in Abhängigkeit von der Freigabezeit t_f dargestellt. Man kann erkennen, dass die Simulation nach VISSIM andere Ergebnisse liefert als die Berechnungen nach HBS 2001. Die Differenzen bewegen sich in einem Rahmen von 100 bis 400 Fahrzeugen pro Stunde. Insbesondere gibt das HBS 2001 bei $t_f=10$ einen deutlichen höheren Wert an als die Simulation. Dieser Unterschied könnte damit begründet werden, dass im HBS 2001 die Problematik der Rotgelbzeit und der überfahrenen Gelbzeit anders behandelt wird als in VISSIM.

Da in VISSIM die Sättigungsverkehrsstärke nicht leicht variiert werden kann, ist eine Anpassung der Sättigungsverkehrsstärke an das HBS 2001 nicht möglich. Um die Aussage der Simulationsergebnisse jedoch allgemein interpretieren zu können, wird im Folgenden bei der Auswertung die Kapazität pro Umlauf $n_c = q_s \cdot t_f$ verwendet. Diese Kapazität ist weder von q_s noch von t_u abhängig.

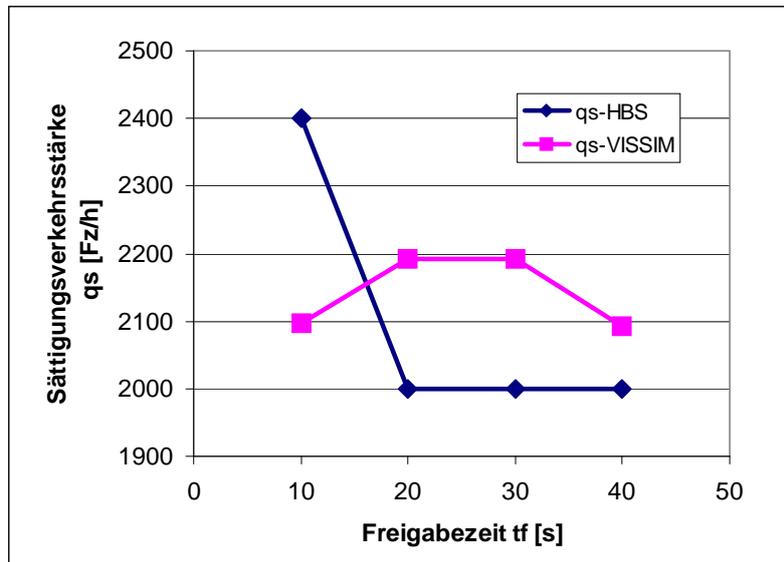


Abbildung 4 - Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens unendlicher Länge nach HBS 2001 und VISSIM

Es kann bestätigt werden, dass die Kapazität einer Zufahrt pro Umlauf $n_{c,M}$ nur von der Anzahl der Aufstellplätze N_K , der Kapazität pro Umlauf der Fahrstreifen 1 und 2, sowie dem Anteil des links abbiegenden Verkehrs abhängig ist. Da die Kapazität pro Umlauf $n_{c,M}$ nicht mehr von der Umlaufzeit abhängig ist, können die Ergebnisse für unterschiedliche Umlaufzeiten zusammengefasst werden. Daraus ergibt sich eine Vervierfachung der simulierten Zeit für jede Parameterkombination. Für jede Parameterkombination stehen jetzt $3 \cdot 4 = 12$ Stunden zur Verfügung. Die Ergebnisse in den folgenden Abschnitten sind Stundenmittelwerte der 12 Stunden.

4.1 Gesamtkapazität der Zufahrt: Gleichzeitige Freigabe für beide Fahrstreifen

In Abbildung 5 ist die Gesamtkapazität einer Zufahrt nach der Simulation und nach HBS 2001 zusammen dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass die simulierte Kapazität nach am geringsten ist, wenn keine Linksabbieger vorhanden sind. Eine Steigerung der Zufahrtskapazität zeigt sich bei einem erhöhten Anteil der Linksabbieger (max. bei $a_L = 0,5$) und bei einer steigenden Anzahl von Aufstellplätzen. Es wird deutlich, dass bei einer gewissen Anzahl von Stellplätzen eine Grenze erreicht ist, denn die Kurven weisen einen

asymptotischen Verlauf auf (vgl. auch Tabelle 1, Randbedingung 5). In der Abbildung ist $n_{c,L}$ = Kapazität der Linksabbieger pro Umlauf und $n_{c,G}$ = Kapazität der Geradeausfahrer/Rechtsabbieger pro Umlauf.

Dem gegenüber steht der fast linear ansteigende Verlauf der Kapazität nach HBS 2001. Sie ist nicht vom Anteil der Linksabbieger abhängig und ist in den überwiegenden Fällen größer als die durch Simulation ermittelten Kapazitäten. Dieser Unterschied wird immer deutlicher mit zunehmender Anzahl von Aufstellplätzen.

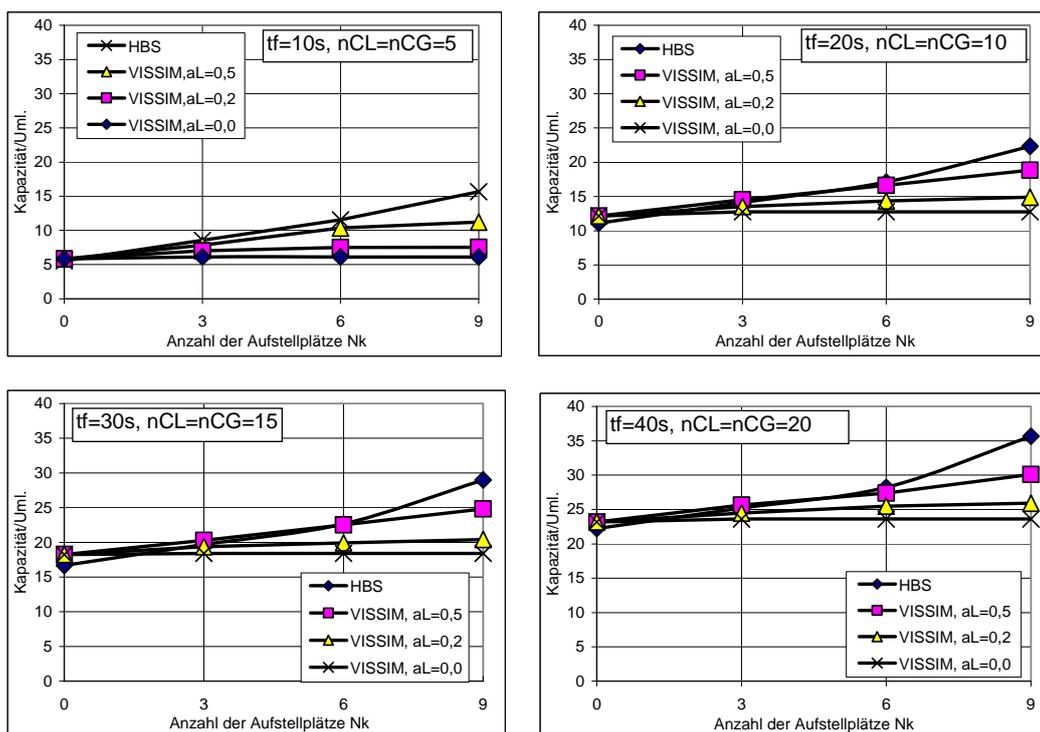


Abbildung 5 - Gesamtkapazität für Zufahrten mit kurzen Aufstellstreifen bei gleichzeitiger Freigabe für beide Fahrstreifen (nach HBS 2001 und VISSIM)

4.2 Gesamtkapazität der Zufahrt: Nicht gleichzeitige Freigabe für beide Fahrstreifen

Es ist anzumerken, dass für diesen Fall die Kapazitätsberechnung nach HBS 2001 unabhängig ist vom Linksabbiegeranteil und von der Freigabezeit. Sie ist nur von der Anzahl der Aufstellplätze abhängig (Abbildung 6). Die Ergebnisse nach HBS 2001 sind demnach wegen der großen Abweichungen nicht direkt vergleichbar mit den Simulationsergebnissen. Die Ergebnisse nach HBS 2001 liegen unregelmäßig zum Teil über und zum Teil unter den Simulationsergebnissen (Abbildung 7).

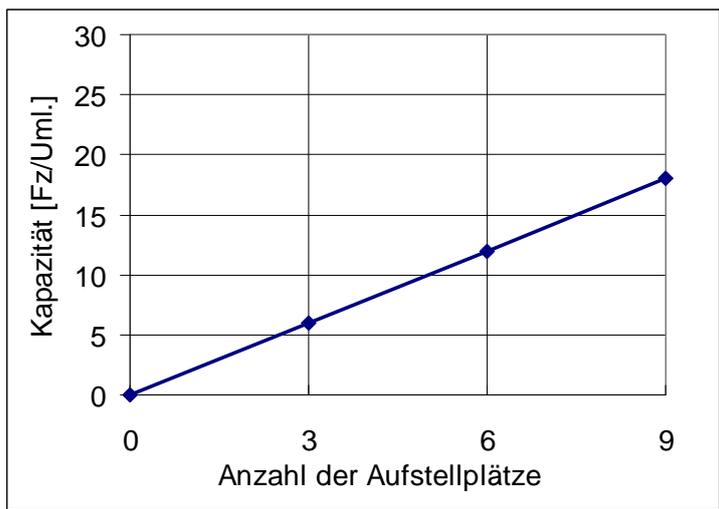


Abbildung 6 - Kapazität für Zufahrten mit kurzen Aufstellstreifen bei nicht gleichzeitiger Freigabe für beide Fahrstreifen nach HBS 2001

Die die simulierte Gesamtkapazität der Zufahrt ist in Abbildung 7 dargestellt. Sie ist eine Funktion der Anzahl der Aufstellplätze und der Kapazitäten der beiden Fahrstreifen. Man kann erkennen, dass der Anteil der Linksabbieger keinen eindeutigen Einfluss auf die Kapazität der Zufahrt hat. Je nach der Anzahl der Aufstellplätze kann der Einfluss positiv oder negativ sein. Eine eindeutige Steigerung der Zufahrtskapazität zeigt sich bei einer steigenden Anzahl von Aufstellplätzen. Nach einer gewissen Anzahl der Aufstellplätze ist eine Grenze erreicht, denn die Kurven weisen einen asymptotischen Verlauf auf (vgl. auch Tabelle 1, Randbedingung 5).

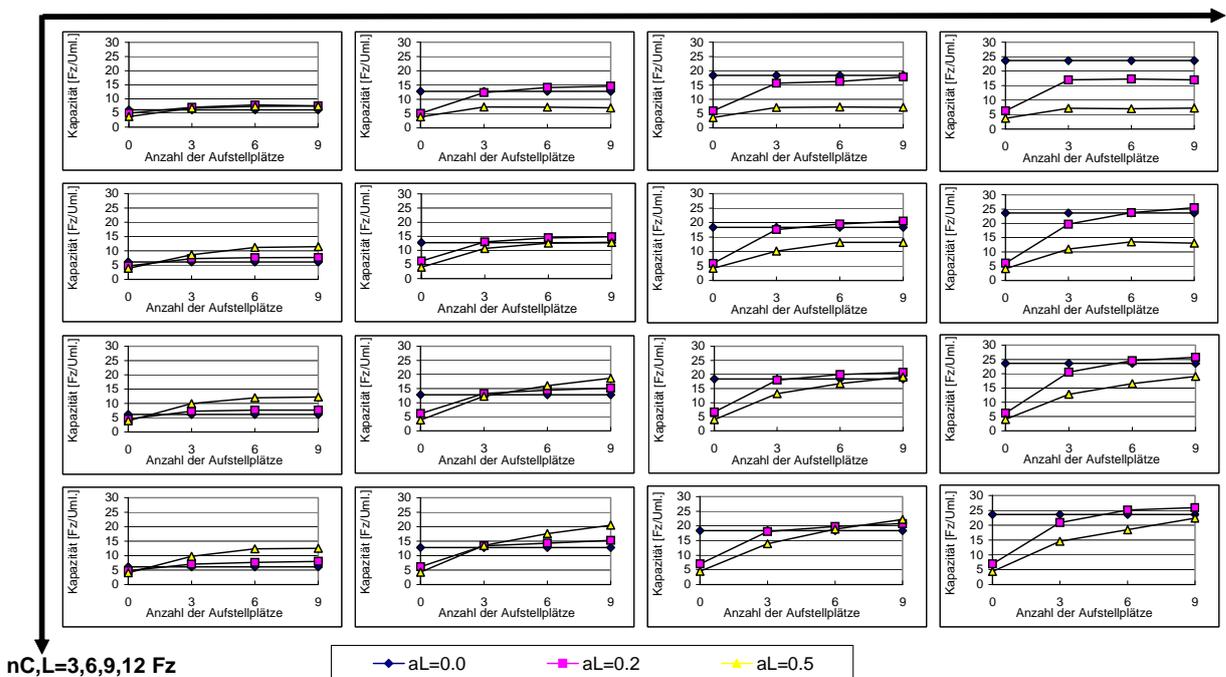


Abbildung 7 - Simulierte Gesamtkapazität für Zufahrten mit kurzen Aufstellstreifen bei nicht gleichzeitiger Freigabe für beide Fahrstreifen nach VISSIM

5 Regressionsfunktion der Simulationsergebnisse

Die Gesamtkapazität einer Zufahrt mit kurzen Aufstellfahrstreifen kann mit einer allgemeinen Annäherungsfunktion dargestellt werden (vgl. Wu, 1999). Dies trifft zu für Zufahrten sowohl mit als auch ohne LSA. Diese Funktion lautet für Zufahrten mit 2 Strömen:

$$C_M = \frac{1}{1+f(N_K) \sqrt{\left(\frac{a_L}{C_L}\right)^{1+f(N_K)} + \left(\frac{1-a_L}{C_G}\right)^{1+f(N_K)}}} \quad (5)$$

Dabei steht C entweder für Kapazität C oder Sättigungsverkehrsstärke q_s oder Kapazität pro Umlauf n_c . Die Funktion $f(N_K)$ ist eine monoton steigende Funktion von N_K . In Gl. (5) werden alle Randbedingungen erfüllt, die in Tabelle 1 angegeben sind. In HBS 2001 (FGSV, 2001) wird für Zufahrten ohne LSA $f(N_K)=N_K$ verwendet. Es gilt hierfür:

$$C_M = \frac{1}{1+N_K \sqrt{\left(\frac{a_L}{C_L}\right)^{1+N_K} + \left(\frac{1-a_L}{C_G}\right)^{1+N_K}}} \quad (6)$$

Mit Hilfe der Simulationsergebnisse kann die Gleichung (5) für Zufahrten mit LSA für unterschiedliche Fälle kalibriert werden.

5.1 Fall I: Gleichzeitige Freigabe für beide Fahrstreifen / Grünzeiten vollständig überlagert

Die Kalibrierung der Gl. (5) für gleichzeitige Freigabezeiten wird mit den Daten durchgeführt, die in Abbildung 5 dargestellt sind. Das Ergebnis der Kalibrierung lautet:

$$n_{c,M,I} = \frac{1}{1+N_K/m \sqrt{\left(\frac{a_L}{n_{c,L}}\right)^{1+N_K/m} + \left(\frac{1-a_L}{n_{c,G}}\right)^{1+N_K/m}}} \quad (7)$$

mit $n_{c,M,I}$ = Kapazität der Zufahrt pro Umlauf für gleichzeitige Freigabezeiten

$$m = \left(0,32 \cdot \sqrt{n_{c,G} \cdot n_{c,L}}\right)^{1,22}$$

$n_{c,L}$ = Kapazität der Linksabbieger pro Umlauf

$n_{c,G}$ = Kapazität der Geradeausfahrer/Rechtsabbieger pro Umlauf

a_L = Anteil der Linksabbieger

Die Gl. (7) behält auch dann ihre Gültigkeit, wenn die beiden Freigabezeiten für L und G nicht gleich lang sind. Maßgebende Bedingung für die Anwendung der Gl. (7) ist es, dass eine der Freigabezeiten vollständig innerhalb der Dauer der anderen Freigabezeit abläuft (vollständige Überlagerung). Da hier die Kapazität pro Umlauf als Eingangsparameter verwendet wird, kann die Gl. (7) auch für Zufahrten mit bedingt verträglichen Linksabbiegern verwendet werden.

Abbildung 8 zeigt den Vergleich zwischen den simulierten Kapazitäten und denen nach der Regressionsformel (Gl.(7)). Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

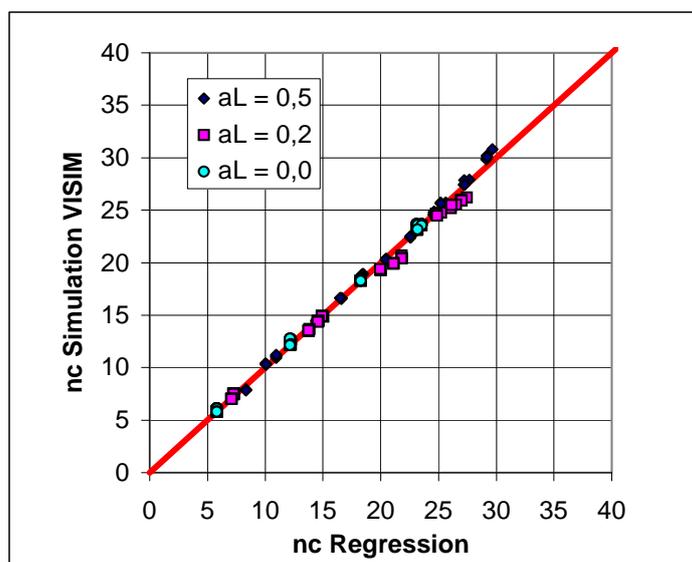


Abbildung 8 - Vergleich zwischen den simulierten Zufahrtkapazitäten und den Zufahrtkapazitäten nach der Regressionsformel (Gl.(7)) bei gleichzeitiger Freigabe beider Fahrstreifen (n=192, s=0,44 Fz/Uml.)

Bei $N_K=0$ geht die Gl.(7) über in die Formel der Mischfahrstreifen:

$$n_{c,M,I}|_{N_K=0} = \frac{1}{\frac{a_L}{n_{c,L}} + \frac{1-a_L}{n_{c,G}}} \quad (8)$$

Für den Fall, dass die beiden Fahrstreifen nur einer Fahrtrichtung (z. B. geradeaus) zur Verfügung stehen, erhält man:

$$n_{c,M,I}|_{L=G} = \frac{2}{1+N_K/m\sqrt{2}} \cdot n_{c,G} \quad (9)$$

mit $m = (0,32 \cdot n_{c,G})^{1,22}$

Die Gl.(9) kann eingesetzt werden, wenn eine Zufahrt am Knotenpunkt aufgeweitert wird und eine Fahrrichtung mehr als einen Fahrstreifen zur Verfügung hat.

Der Verlauf der Gesamtkapazität nach Gl. (7) ist in Abbildung 9 dargestellt. Sie zeigt die Abhängigkeit der Zufahrtskapazität von der Anzahl der Aufstellplätze und vom Anteil der Linksabbieger für die Parameter für $n_{c,G}=20$ und $n_{c,L}=10$. Für die praktische Anwendung sind weitere Abbildung ($n_{c,G}=10, 15, 20, 25$ und $n_{c,L}=5, 10, 15$) als Monographen vom Autor erhältlich (Wu, 2003).

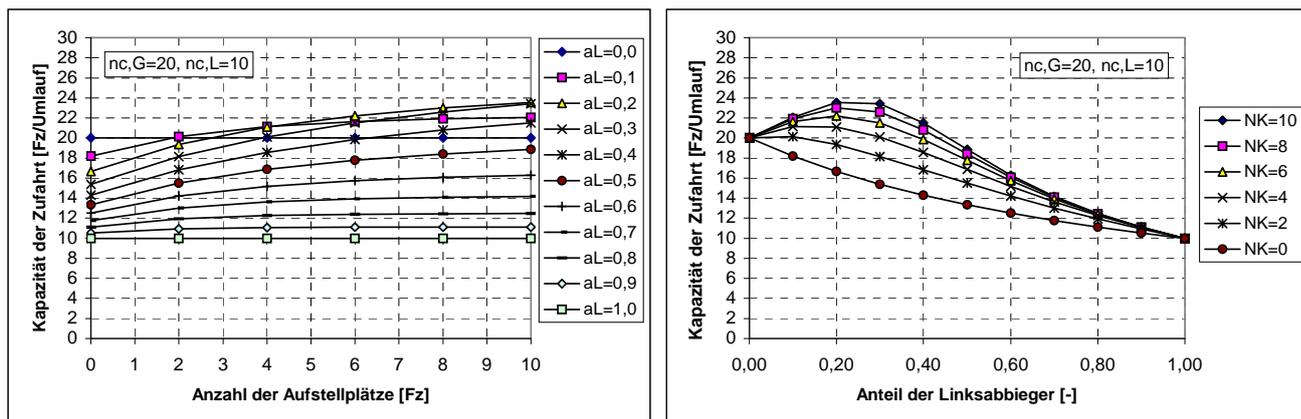


Abbildung 9 - Verlauf der Zufahrtskapazität nach Gl. (7) in Abhängigkeit von der Anzahl der Aufstellplätze und vom Anteil der Linksabbieger für $n_{c,G}=20$ und $n_{c,L}=10$

5.2 Fall II: Nicht gleichzeitige Freigabe für beide Fahrstreifen / Grünzeiten nicht überlagert

Die Kalibrierung der Gl. (5) für nicht gleichzeitige Freigabezeiten wird mit den Daten durchgeführt, die in Abbildung 6 dargestellt sind. Das Ergebnis hat die selbe Form wie die Gl. (7). Das Ergebnis der Kalibrierung mit einer relativ komplizierten Funktion lautet:

$$n_{c,M,II} = \frac{1}{\sqrt[1+N_K/m]{\left(\frac{a_L}{n_{c,L}^*}\right)^{1+N_K/m} + \left(\frac{1-a_L}{n_{c,G}^*}\right)^{1+N_K/m}}} \quad (10)$$

mit $n_{c,M,II}$ = Kapazität der Zufahrt pro Umlauf für nicht gleichzeitige Freigabezeiten

$$m = \left(0,18 \cdot \sqrt{n_{c,G} \cdot n_{c,L}}\right)^{1,70}$$

$$n_{c,L}^* = \min\left[\frac{2+N_K}{1-a_L}, n_{c,L}\right]$$

$$n_{c,G}^* = \min \left[\frac{2 + N_K}{a_L}, n_{c,G} \right]$$

$n_{c,L}$ = Kapazität der Linksabbieger pro Umlauf

$n_{c,G}$ = Kapazität der Geradeausfahrer/Rechtsabbieger pro Umlauf

a_L = Anteil der Linksabbieger

Abbildung 10 zeigt den Vergleich zwischen den simulierten Kapazitäten und denen nach der Regressionsformel (Gl.(10)). Es zeigt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung.

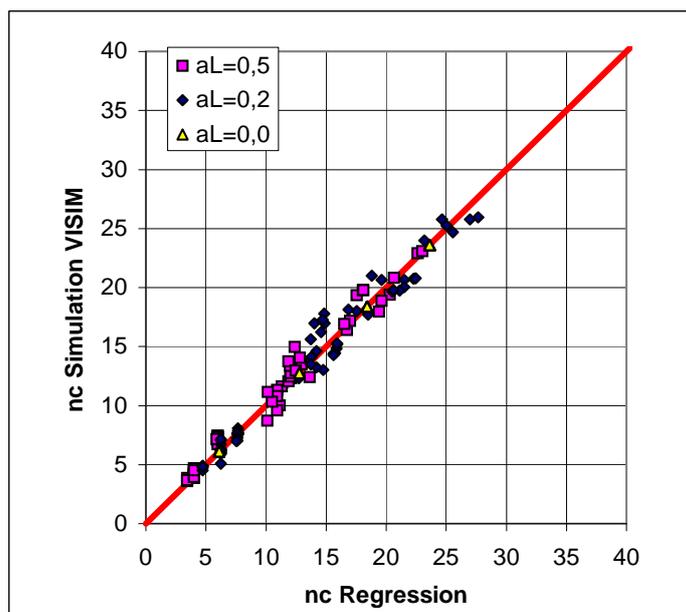


Abbildung 10 - Vergleich zwischen den simulierten Zufahrtkapazitäten und den Zufahrtkapazitäten nach der Regressionsformel (Gl. (10)) bei nicht gleichzeitiger Freigabe ($n=192$, $s=0,85$ Fz/Uml.)

Bei $N_K=0$ geht die Gl. (10) über in:

$$n_{c,M,II}|_{N_K=0} = \frac{1}{a_L \cdot (1 - a_L)} = \left(\frac{1}{a_L} + \frac{1}{(1 - a_L)} \right) \quad (11)$$

Dies ist die theoretische Mindestkapazität für den Fall, dass die beiden Fahrtrichtungen einen einzigen Fahrstreifen benutzen. Diese Kapazität kann nach der Wahrscheinlichkeitstheorie hergeleitet werden. Sie ist, im Gegensatz zur allgemeinen Vermutung, nicht gleich null, da ab und zu ein Geradeausfahrer oder Linksabbieger abfließen kann, wenn er an der ersten Stelle bei Grünbeginn an der Haltelinie wartet.

Der Verlauf der Zufahrtkapazität nach Gl. (10) ist in Abbildung 11 dargestellt. Sie zeigt die Abhängigkeit der Zufahrtkapazität bei nicht gleichzeitiger (nicht überlagerten) Freigabe von der Anzahl der Aufstellplätze und vom Anteil der Linksabbieger für die Parameter $n_{c,G}=20$ und $n_{c,L}=10$. Hier haben die Kurve für $N_K=0$ bis 2 nur eine theoretische Bedeutung, da Zufahrten mit einem sehr kurzen Abbiegestreifen nicht mit unterschiedlichen Grünzeiten gesteuert werden dürfen. Für die praktische Anwendung sind weitere Abbildung ($n_{c,G}=10, 15, 20, 25$ und $n_{c,L}=5, 10, 15$) vom Autor erhältlich (Wu, 2003).

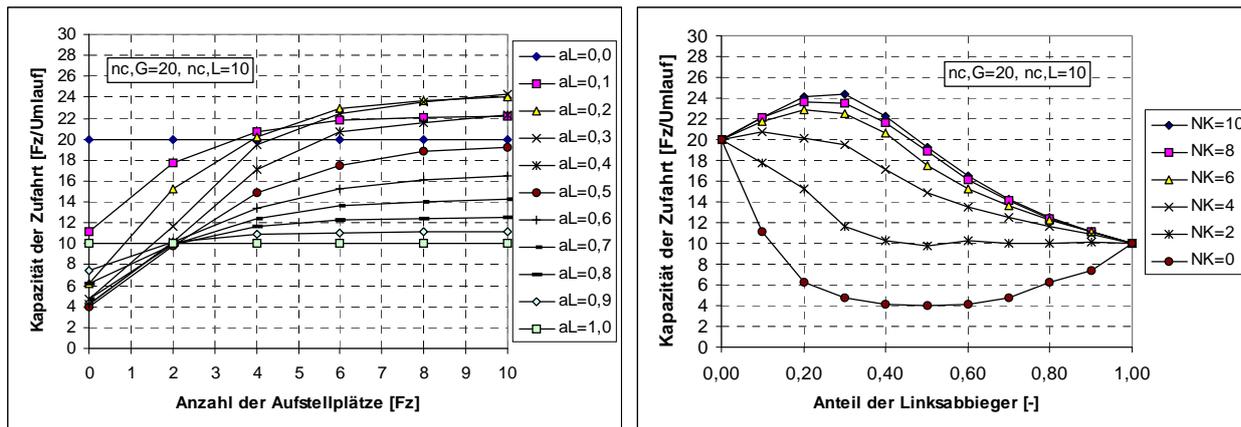


Abbildung 11 - Verlauf der Kapazität nach Gl. (10) in Abhängigkeit von der Anzahl der Aufstellplätze und vom Anteil der Linksabbieger für $n_{c,G}=20$ und $n_{c,L}=10$

5.3 Fall III: Teilweise überlagerte Grünzeiten: Interpolation zwischen Fall I und Fall II

Für den Fall, dass die Grünzeiten der beiden Ströme nur teilweise überlagert sind, kann die Kapazität der Zufahrten näherungsweise durch Interpolation zwischen dem Fall I (Grünzeiten vollständig überlagert) und Fall II (Grünzeiten nicht überlagert) ermittelt werden. Die Interpolationsgröße ist die Länge der Überlagerung ΔG (vgl. Abbildung 12).

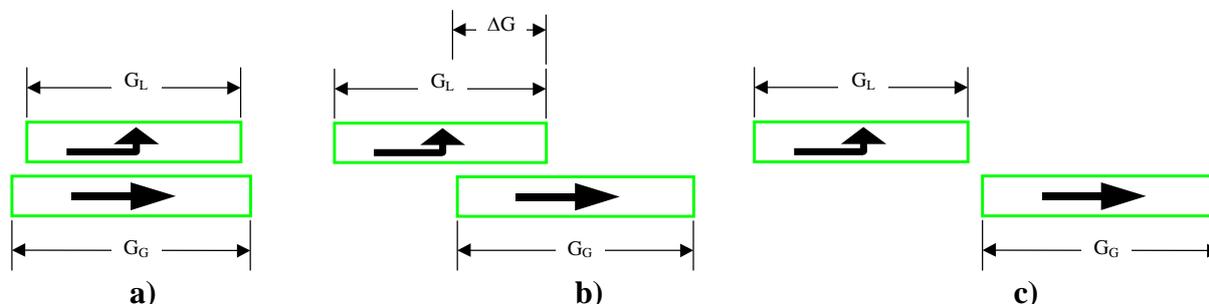


Abbildung 12 - Interpolation für teilweise überlagerte Grünzeiten
 a) Fall I: Grünzeiten vollständig überlagert
 b) Fall III: Grünzeiten teilweise überlagert
 c) Fall II: Grünzeiten nicht überlagert

Die Interpolationsformel lautet demnach:

$$n_{c,M,III} = n_{c,M,II} + (n_{c,M,I} - n_{c,M,II}) \cdot \frac{\Delta G}{\min(G_L, G_G)} \quad (12)$$

mit $n_{c,M,III}$ = Kapazität der Zufahrt pro Umlauf für überlagerte Freigabezeiten

$n_{c,M,II}$ = Kapazität der Zufahrt pro Umlauf nach Gl. (10)

$n_{c,M,I}$ = Kapazität der Zufahrt pro Umlauf nach Gl.(7)

G_L = Grünzeit der Linksabbieger

G_G = Grünzeit der Geradeausfahrer/Rechtsabbieger

ΔG = Länge der Überlagerung

6 Zusammenfassung

Die Kenntnisse, die hier durch Simulationen gewonnen wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die vereinfachten Annahmen führten dazu, dass bei den Kapazitätsberechnungen nach HBS 2001 einfache aber nur unrealistische Ergebnisse erzielt werden. Das Verfahren in HBS 2001 ist ungenau und manchmal auch unplausibel.

Das HBS - Verfahren hat vor allem zwei signifikante Mängel:

- Der Anteil der Linksabbieger wird bei der Berechnung der Zufahrtskapazität für kurze Aufstellfahrstreifen nicht berücksichtigt. Dies gilt sowohl bei gleichzeitiger Freigabe der Ströme als auch bei nicht gleichzeitiger Freigabe.
- Die ermittelten Zufahrtskapazitäten werden nicht gegen die maximal mögliche Kapazität (Randbedingungen in Tabelle 1) geprüft. So kommt es manchmal vor, dass die Zufahrtskapazität größer als die Summe der Kapazität aller Fahrstreifen ist.

Die beiden Mängel sind nur in HBS 2001 vorhanden. Im so genannten D-HCM 1996 (früher Entwurf des HBS, Brilon e. a., 1996) war beides ausreichend abgesichert.

Außerdem können Zufahrten mit teilweise überlagerten Grünzeiten oder Zufahrten mit bedingt verträglichen Linksabbiegern nicht nach HBS 2001 (FGSV, 2001) berechnet werden.

Die Gleichungen (7), (9), (10) und (12) bilden ein komplettes, theoretisch begründetes und durch Simulationen gut abgesichertes Verfahren, das alle möglichen Konstellationen an Zufahrten mit kurzen Ausstellfahrstreifen berücksichtigt. Damit wird eine Lücke im

bisherigen Berechnungsverfahren geschlossen. Das neue Verfahren soll nach Möglichkeit in eine zukünftige Version des HBS integriert werden.

Für die Anwendung in der Praxis werden Monographen mit Hilfe der Gl.(7) und (10) in der Form von Abbildung 9 und Abbildung 11 erstellt. Sie können vom Autor bezogen werden. Darin ist auch ein Rechenbeispiel für die Anwendung der Monographen dargestellt.

7 Literaturverzeichnis

- Brilon, W.; Großmann, M.; Blanke, H. (1996).** Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen. *Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik"*, Heft 669. Bonn.
- FGSV (2001).** *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 299, FGSV Verlag GmbH, Köln.
- LfV (2002).** Korrekturen zum HBS 2001. <http://www.verkehr.bi.ruhr-uni-bochum.de/vk/deutsch/Forschung/hbskorrektur>. Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum. 2002.
- Wu, N. (1999).** Capacity of Shared/Short Lanes at Unsignalised Intersections. *Transportation Research*, A33, Issue: 3-4. Elsevier Science Ltd., New York, Tokyo, Oxford.
- Wu, N. (2003).** Kapazität der Zufahrten an signalisierten Knotenpunkten mit kurzen Aufstellfahrstreifen. *Arbeitsblätter der Lehrstuhl für Verkehrswesen*, Nr. 23. Ruhr-Universität Bochum.