

Bemessung und Bewertung von Lichtsignalanlagen

-Vergleich zweier neuen Regelwerke HCM 2000 und HBS 2001

Ning Wu¹

(Paper veröffentlicht in "Straßenverkehrstechnik", Heft 12/2003. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 2003

1 Einleitung

Um die Funktionalität von Verkehrsanlagen beurteilen zu können, werden in vielen Ländern Regelwerke erstellt. Mit diesen Regelwerken sollen Verkehrsanlagen nach vorgegebenen Kriterien bemessen und bewertet werden. Die Stufen der Kriterien stellen die zu erwartende Qualität des Verkehrsablaufs dar. Das amerikanische "Highway Capacity Manual (HCM)" ist das Vorbild der Regelwerke für die Bemessung und Bewertung von Verkehrsanlagen (TRB, 2000). Viele Länder übernehmen sogar direkt das HCM als eigenes Regelwerk. Das HCM wird unter Federführung von Transportation Research Board (TRB) erstellt. Das HCM wird regelmäßig erneuert und an die neusten Kenntnisse aus der Straßenverkehrstechnik angepasst. Die erste Version des HCM ist in 1950 erschienen. Das HCM 1965 erschien im Jahr 1966. In dieser Version wurde das Konzept "Level of Service (LOS)" eingeführt, mit dem Verkehrsanlagen qualitativ bewertet werden sollten. Das HCM 1985 erschien im Jahr 1986. Zum 1985er HCM wurden später noch zwei Updates veröffentlicht, die auch erst ca. 1 Jahr später den Benutzern zugänglich waren. Die aktuellste Version des HCM ist HCM 2000. Es erschien pünktlich in 2000. Es erhält mehr als 1100 Seiten und 31 Kapitel. Die Philosophie des HCM ist die Bewertung, d.h. Kapazitätsnachweis, von vorhandenen Verkehrsanlagen mit den Qualitätsstufen (QSV=LOS). Die Bemessung, d.h. der Entwurf der Verkehrsanlagen steht nie im Vordergrund. Das HCM wurde nie als offizielle Richtlinie eingeführt, gilt aber als Standard für gängige Praxis.

¹ Dr.-Ing. habil., Privatdozent an der Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum
Ning.Wu@rub.de

In Deutschland wurde im Jahr 1994 ein erster Versuch gestartet, ein ähnliches Handbuch wie das amerikanische HCM zu etablieren. Am Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum wurde der Entwurf eines Handbuchs erstellt, der bis Ende 2001 auch von der Praxis als Orientierung des Kapazitätsnachweises verwendet wurde. Dieser Entwurf wurde in der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 699 veröffentlicht (Brilon, e.a. 1994). Auf Basis dieses Entwurfs wurde unter der Federführung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) erneut ein Projekt gestartet, ein echtes Handbuch mit dem Namen "Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen" zu erstellen. Dieses Handbuch soll als Standard in Deutschland gelten. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, kurz genannt HBS 2001, steht seit 2001 den Benutzern Verfügung (FGSV, 2001, LfV, 2002). Der Ansatzpunkt des HBS 2001 ist - wie der Name schon sagt, anders als der im HCM - die Bemessung (Dimensionierung) von Verkehrsanlagen.

Im Kapitel 16 von HCM 2000 werden signalisierte Knotenpunkte behandelt. Das Kapitel umfasst 170 Seiten. Außerdem werden noch viele Ansätze bezüglich der Lichtsignalanlage (LSA), wie die Koordinierung im Netzen, in Kapiteln 10 und 15 dargestellt. Das Verfahren in HCM 2000 bietet Ansätze zum Entwerfen von festzeitgesteuerten und verkehrabhängig gesteuerten LSA und zur Bewertung von LSA anhand der Wartezeiten.

Das Kapitel zur Bemessung von LSA in HBS 2001 ist das Kapitel 6. Es enthält ca. 90 Seiten. In diesem Kapitel werden die Prozeduren zur Erstellung festzeitgesteuerter und koordinierter Signalzeitenpläne dargestellt. Zur Bewertung der LSA benutzt das HBS 2001 die Wartezeit für Einzelknotenpunkte und die Anzahl der Halte für Koordinierungen.

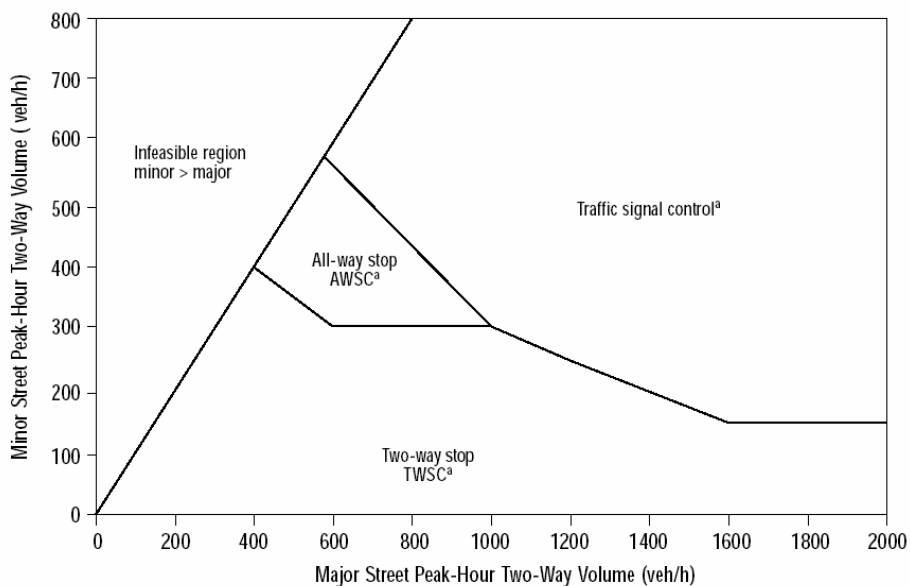
2 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen

2.1 Einsatzbereich der Lichtsignalanlagen

Wann und wo können LSA eingesetzt werden?

Im Prinzip kann eine LSA überall installiert werden. Es gibt keine technischen Zwänge und Einschränkungen. Es ist nur eine Frage der Wirtschaftlichkeit und der Verkehrssicherheit. Ein Bild (Abbildung 1) in HCM 2000, Kapitel 10 gibt an, in welchem Bereich der Belastung am Gesamtknotenpunkt eine LSA eingesetzt werden soll. Man kann sehen, dass bei gleichmäßiger Verteilung der Belastung auf den beiden Straßen bereits ab einer Gesamtbelastung von ca.

1200 Fz/h LSA installiert werden müssen, damit die Sicherheit und die Qualität des Verkehrsablaufs gewährleistet werden.



Notes
 a. Roundabouts may be appropriate within portion of these ranges.

Abbildung 1 - Einsatzbereiche unterschiedlicher Betriebsarten nach HCM 2000 (dort Abb. 10-17)

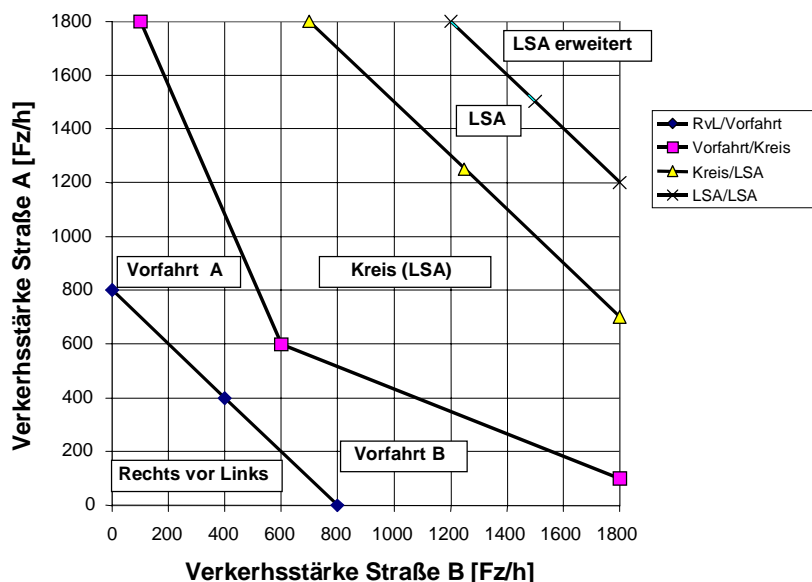


Abbildung 2 - Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Betriebsarten für das deutsche Verhältnis

In HBS 2001 wird keine konkrete Angabe über den Einsatzbereich der LSA gemacht. Nach den vorhandenen Kenntnissen ist es jedoch möglich, für deutsche Verhältnisse ein ähnliches

Diagramm zu erstellen. Die Einsatzbereiche unterschiedlicher Betriebsarten können wie in Abbildung 2 dargestellt aussehen. Abbildung 2 zeigt auch, dass der Kreisverkehr in das traditionelle Hoheitsgebiet der LSA eingedrungen ist und dort der LSA Konkurrenz macht.

2.2 Bemessung und Bewertung der LSA

Sobald feststeht, dass eine LSA geplant werden muss, wird die LSA nach folgendem Schema bearbeitet: a) Erstellung eines Signalzeitenplans, hier werden die Zwischenzeiten (t_z), die Umlaufzeit (t_U) und die Freigabezeiten (t_F) bestimmt, b) Berechnung der Kapazitäten der Verkehrsströme und c) und Bewertung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV) anhand der Wartezeit, der Anzahl der Halte und der Rückstaulänge.

Es ist manchmal auch notwendig, dass der Knotenpunkt zusammenfassend beurteilt wird. Außerdem ist sinnvoll, die Koordinierung und die Verkehrsabhängigkeit der LSA in die Bewertung einzubeziehen.

Bei der Bemessung und Bewertung der LSA werden viele Eingangsdaten vordefiniert, die das Ergebnis der Bemessung und Bewertung direkt beeinflussen. Diese grundlegenden Parameter werden in HBS 2001 und HCM 2000 unterschiedlich gesetzt. Das HBS 2001 benutzt z.B. eine Stunde als Bemessungsperiode, das HCM 2000 15 Minuten. Das HBS 2000 benutzt die mittlere Verkehrsstärke über eine Stunde als Bemessungsverkehrsstärke, das HCM 2000 die mittlere Verkehrsstärke über 15 Minuten mit einem Spitzenstundenfaktor von 0,88 (entspr. $q_{60}=q_{15}*0.88$). Die Grundsättigungsverkehrsstärke ist nach HBS 2001 2000 Pkw-E/h, nach HCM 2000 1900 Pkw-E/h.

2.2.1 Ermittlung der Zwischenzeiten

Major Street	Minor Street	Number of Phases	L (s)
Protected	Protected	4	16
Protected	Permitted	3	12
Permitted	Protected	3	12
Permitted	Permitted	2	8

Note:
Protected and Permitted refer to left turns.

Tabelle 1 - Zwischenzeiten nach HCM 2000 (dort Abb. 10-19)

Der größte Unterschied zwischen den Grundparametern in HCM 2000 und HBS 2001 liegt bei der Berechnung der Zwischenzeiten. Während in HBS 2001 die Zwischenzeiten nach Einfahr- und Räumweg genau berechnet werden müssen, werden in HCM 2000 die Zwischenzei-

ten einheitlich für alle Konfliktbeziehungen benutzt. In der Regel wird eine Zwischenzeit von 4s eingesetzt (Tabelle 1). Für größere Knotenpunkte werden manchmal auch Zwischenzeiten von 5s verwendet.

Die in HBS 2001 nach Einfahr- und Räumweg berechneten Zwischenzeiten zwischen den Kfz können - je nachdem wie groß der Knotenpunkt ist - bis zu 9 s lang sein (vgl. Tabelle 2).

Räumende Verkehrsströme	Einfahrende Verkehrsströme													
	Kleine Knotenpunkte (max. 2 Fahrstreifen je Zufahrt)						Große Knotenpunkte (max. 5 Fahrstreifen je Zufahrt)							
	Kfz, geradeaus + rechts	Kfz, linksabbiegend	ÖV-Fahrzeug, ohne \textcircled{H}	ÖV-Fahrzeug, mit \textcircled{H}	Radfahrer	Fußgänger (Zufahrt)	Fußgänger (Ausfahrt)	Kfz, geradeaus + rechts	Kfz, linksabbiegend	ÖV-Fahrzeug, ohne H	ÖV-Fahrzeug, mit H	Radfahrer	Fußgänger (Zufahrt)	Fußgänger (Ausfahrt)
Kfz, geradeaus + rechtsabbiegender	6	5	6	3	5	5	7	8	4	7	4	6	5	9
Kfz, linksabbiegend	7	6	6	3	5	5	8	9	7	10	7	9	5	10
ÖV-Fahrzeug, ohne \textcircled{H}	8	7	7	4	6	6	9	9	6	8	5	7	6	10
ÖV-Fahrzeug, mit \textcircled{H}	9	8	8	5	7	7	10	11	8	10	7	9	7	12
Radfahrer	8	7	7	4	-	-	-	13	10	12	9	-	-	-
Fußgänger (Zufahrt)	7	7	7	7	-	-	-	12	12	12	12	-	-	-
Fußgänger (Ausfahrt)	7	7	7	7	-	-	-	4	4	4	1	-	-	-

Tabelle 2 - Zwischenzeiten nach HBS (HBS2001, Tab. 6-3)

Im Vergleich mit den einheitlichen Zwischenzeiten nach HCM 2000 entsteht dann für kleine Knotenpunkte ein Unterschied der Gesamtzwischenzeit von (2-phasig) ca. 6s, für große Knotenpunkte (3-4-phasig) ca. 7s.

Die unterschiedlich eingesetzte Zwischenzeit führt dazu, dass bei der Berechnung der Signalzeitenpläne nach HCM 2000 deutliche mehr Freigabezeit zur Verfügung steht als nach HBS 2001.

2.2.2 Ermittlung der Umlaufzeit

Mit vorgegebenen Grundparametern kann die Umlaufzeit dann nach HBS 2001 mit der Gl.(1) (dort Gl.(6-9) und Gl.(6-12)) berechnet werden.

$$t_{U,opt} = \frac{1,5 \cdot T_Z + 5}{1 - \sum_{i=1}^p q_{\text{maßg},i} / q_{Si}} \quad \text{oder} \quad t_{U,min} = \frac{T_Z}{1 - \sum_{i=1}^p q_{\text{maßg},i} / (g_i \cdot q_{Si})} \tag{1}$$

Dabei werden die Gesamtzwischenzeit TZ, die Sättigungsverkehrsstärke und die Verkehrsstärke der maßgebenden Signalgruppen als Ausgangsparameter benutzt. Damit kann die optimale Unlaufzeit mit minimierter Wartezeit oder die minimale Umlaufzeit mit vorgegeben Sättigungsgraden berechnet werden. Es bleibt aber eine Frage offen: wie werden die maßgebenden Signalgruppen ermittelt? Ist es phasen-orientiert oder Signalgruppen-orientiert? In HBS 2001 ist nur von Phasen die Rede (allerdings werden in den Rechbeispielen die maßgebenden Signalgruppen wiederum von den Phasen abweichend bestimmt). Was ist dann hier eine Phase? Was sind die Zwischenzeiten zwischen den Phasen? Wie berücksichtigt man die Vor- und Nachlaufzeit einer Signalgruppe?

In HCM 2000 wird eine ähnliche Formel verwendet (Gl.(2), in HCM 2000 Gl.(B16-13)). Die maßgebenden Signalgruppen werden signalgruppenorientiert ermittelt. Durch Einsetzen eines einheitlichen Sättigungsgrades $q_C = 0.90$ wird angestrebt, dass die maßgebenden Signalgruppen gleichmäßig ausgelastet werden.

$$t_{U,min} = \frac{T_Z}{1 - \sum_{i=1}^p q_{maßg,i} / (g_C \cdot q_{Si})} \tag{2}$$

Die Problematik der maßgebenden Signalgruppen wird hier mit einem kleinen Beispiel demonstriert (Abbildung 3).

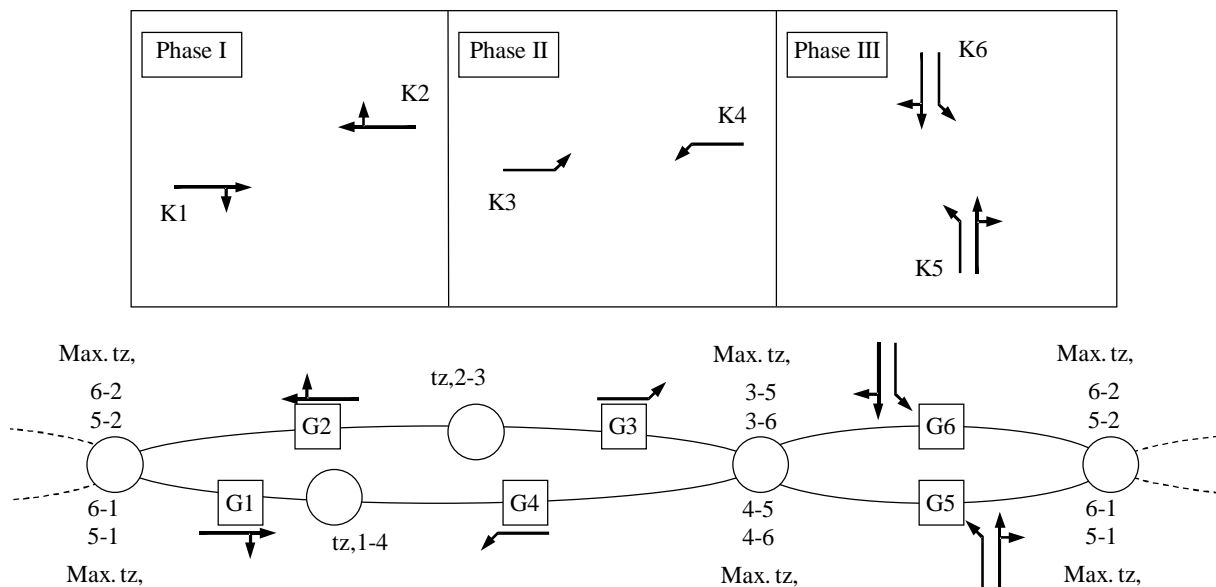


Abbildung 3 - Phasen und maßgebende Signalgruppen

Betrachtet wird ein Knotenpunkt mit einer 3-phasigen Signalisierung: In der ersten Phase werden die Geradeausfahrer in der Hauptfahrtrichtung freigegeben. In der zweiten Phase die Linksabbieger aus der Hauptfahrtrichtung. Und in der dritten Phase aller Verkehr aus der Nebenrichtung. Auf den ersten Blick würde man sagen, dass die maßgebenden Signalgruppen die Signalgruppen sind, die in jeder Phase den meisten Verkehr haben. Dieser Schein täuscht. Beim starken Richtungsverkehr werden die Geradeausfahrer und der Linksabbieger, hier K1 und K3 aus einer Zufahrt, die Phase 1 und 2 dominieren, die eigentlich miteinander verträglich sind. Hier muss man im Bereich der Phase 1 und 2 den Sperrzyklus K1 gegen K4 und den Sperrzyklus K2 gegen K3 miteinander verglichen und dann die Signalgruppen aus dem Sperrzyklus mit den größeren Belastungen/Zwischenzeiten als maßgebende Signalgruppen entnehmen.

Die Problematik der Zwischenzeit muss besonderes behandelt werden, wenn Fußgänger-Signalgruppen berücksichtigt werden. Die Fußgänger haben bekanntlich sehr lange Räumzeit und daher auch sehr lange Zwischenzeiten gegenüber Kfz-Signalgruppen. Die möglichen Sperrzyklen für die maßgebenden Signalgruppen sind für das Beispiel

$$1. \text{ Zyklus: } G2 + t_{z_{\text{maßg.}}} + G3 + t_{z_{\text{maßg.}}} + \max(G6, G5)$$

$$2. \text{ Zyklus: } G1 + t_{z_{\text{maßg.}}} + G4 + t_{z_{\text{maßg.}}} + \max(G6, G5)$$

Abgesehen von der Problematik der unterschiedlichen Zwischenzeiten hat das HCM 2000 eine klare Definition des maßgebenden Sperrzyklus angegeben. Bei überlagernden Phasen muss der maßgebende Sperrzyklus folgenden Regeln entsprechen: a) außerhalb der Zwischenzeit muss immer eine Signalgruppe des maßgebenden Sperrzyklus fließen, b) zu keiner Zeit dürfen mehr als eine Signalgruppe des maßgebenden Sperrzyklus gleichzeitig fließen und c) der maßgebende Sperrzyklus hat das größte Gesamtflussverhältnis $B = \sum(q/q_s)$. Das HCM 2000 berücksichtigt keine unterschiedlichen Zwischenzeiten.

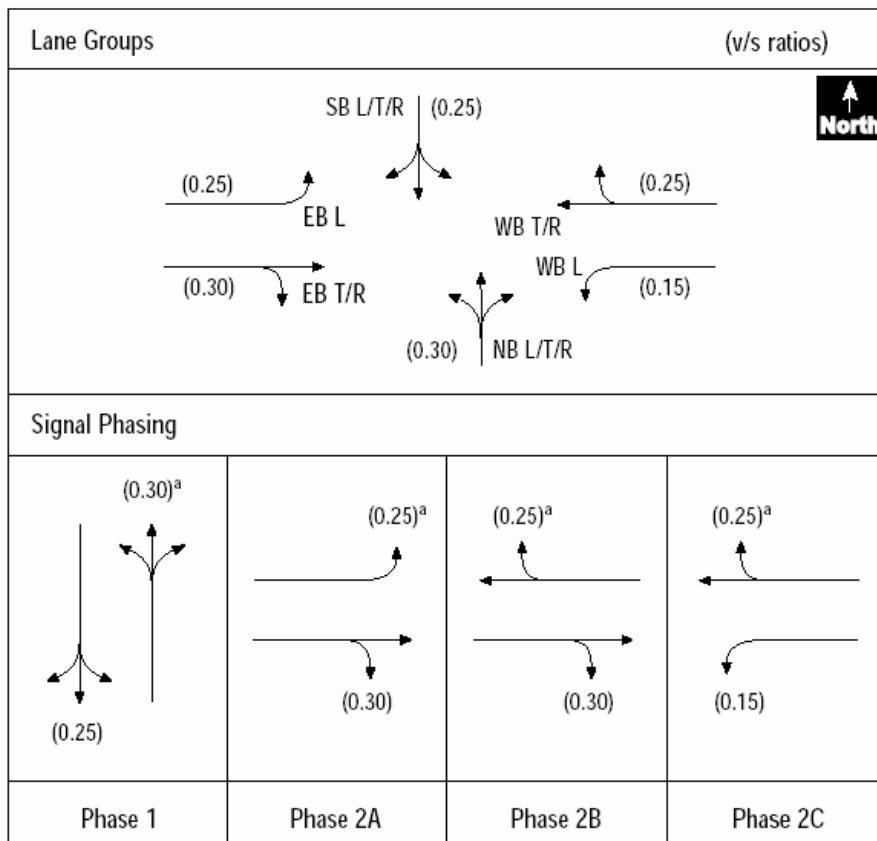
Unter dieser Bedingung können nach der HCM-Definition die Signalgruppen des maßgebenden Sperrzyklus einfach gefunden werden. Die Definition der maßgebenden Signalgruppen nach HCM 2000 entspricht auch der Definition in RiLSA (1992). In HBS 2001 wird solch eine praktikable Definition nicht angegeben.

In Abbildung 4 ist ein Beispiel aus dem HCM 2000 dargestellt. Die Fußgänger werden hier nicht berücksichtigt. Hier sind 2 Sperrzyklen im Bereich der Phase 2 vorhanden: der erste geht über Geradeausfahrer von links zu Linksabbiegern von rechts, der zweite über Linksab-

bieger von links zu Gradeausfahrern von rechts. Der maßgebende Sperrzyklus ist der mit dem größeren Gesamtflussverhältnis

$$B = \sum b_i = \sum \left(\frac{q}{q_s} \right)_i = 0.30 + \max \left(\begin{matrix} 0.25 + 0.25 = 0.50 \\ 0.15 + 0.30 = 0.45 \end{matrix} \right) = 0.80 \quad (3)$$

Die maßgebenden Signalgruppen sind demnach die für a) die Ströme von unten, b) den Linksabbieger von links und c) den Gradausfahrer von rechts.



Note:
a. Critical v/s

Abbildung 4 - Beispiel zur Bestimmung der maßgebenden Signalgruppen (HCM 2000, Abb. 16-18)

Außer der Schwierigkeit zur Bestimmung der maßgebenden Signalgruppen wird die Umlaufzeit mit unterschiedlichen Formeln und nach unterschiedlichen Verkehrsstärken bemessen. Das HBS 2001 berechnet die optimale Umlaufzeit mit minimaler Wartezeit und das HCM 2000 nur die minimale Umlaufzeit mit vorgegebenem Spitzenstundenfaktor und Sättigungsgrad.

Der Unterschied zwischen den Umlaufzeiten nach beiden Regelwerken ist in Abbildung 5 dargestellt. Das HBS-Verfahren liefert im Vergleich zum HCM bei niedrigerer Belastung länger, bei höherer Belastung kürzere Umlaufzeit.

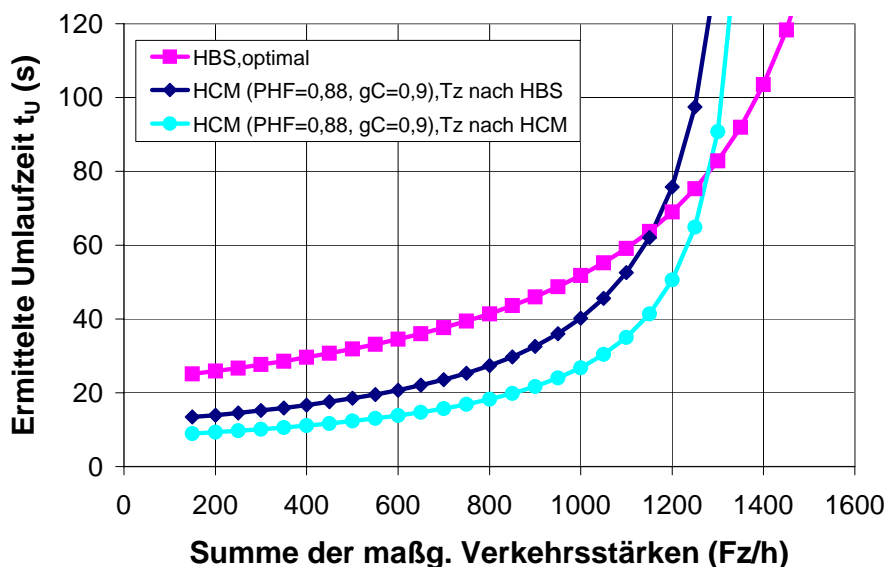


Abbildung 5 - Länge der Umlaufzeiten nach HCM 2000 und HBS 2001

2.3 Ermittlung der Freigabezeiten und Kapazitäten

2.3.1 Ermittlung der Freigabezeiten

Wenn die Umlaufzeit bekannt ist, werden die Freigabezeiten proportional zu ihren Flussverhältnissen verteilt. Die Formeln hierzu sind in beiden Regelwerken gleich (Gl.(4) und Gl.(5)).

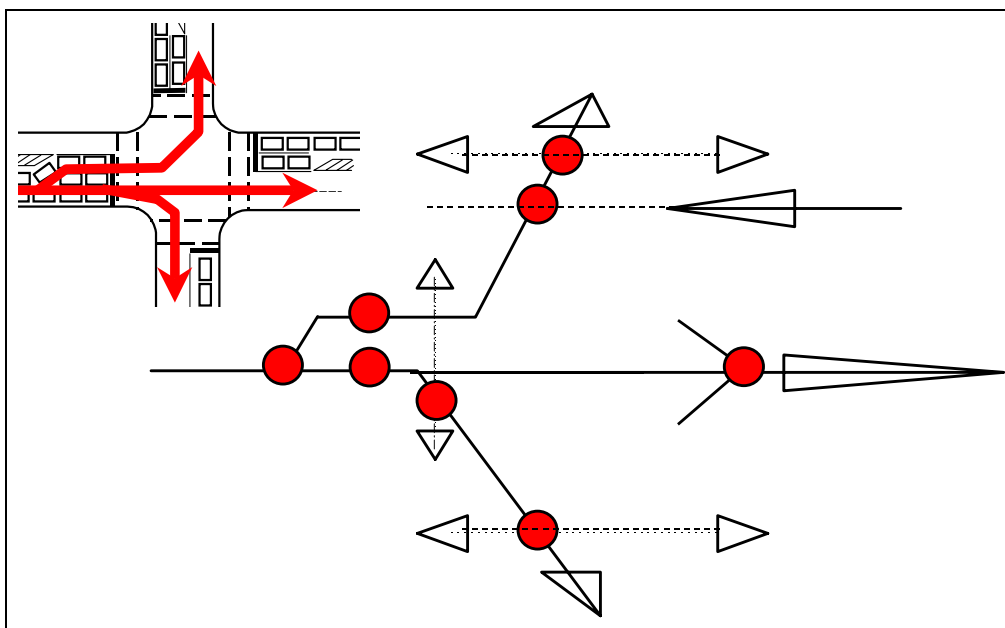
$$t_{F,i} = \frac{q_{\text{maßg},i}/(g_i \cdot q_{S_i})}{\sum_{i=1}^p q_{\text{maßg},i}/(g_i \cdot q_{S_i})} \cdot (t_U - T_Z) \quad \text{(HBS 2001, Gl.(6-15))} \quad (4)$$

$$t_{F,i} = (q_{\text{maßg},i}/q_{S_i}) \cdot (t_U / g_C) \quad \text{(HCM 2000, Gl.(B16-7))} \quad (5)$$

mit

$$g_C = \frac{\sum_{i=1}^p (q_{\text{maßg},i}/q_{S_i}) \cdot t_U}{(t_U - T_Z)} \quad \text{(HCM 2000, Gl.(B16-6))} \quad (6)$$

2.3.2 Ermittlung der Kapazitäten

**Abbildung 6 - Kritische Punkte der Kapazitätsnachweise**

Wenn der Signalzeitplan (die Umlaufzeit und die Freigabezeiten) vorgegeben ist oder - wie vorher erläutert - berechnet wurde, wird er nach bestimmten Kriterien bewertet. Diese Kriterien sind vor allem die Kapazitäten und die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) für alle Signalgruppen und Ströme. Für die Bewertung müssen alle kritischen Punkte der Verkehrsströme betrachtet werden. Diese kritischen Punkte - hier aus einer Zufahrt betrachtet - sind die Haltelinie in der Zufahrt, die Konfliktpunkte mit den entgegenkommenden Fahrzeugen, die Konfliktpunkte mit den parallel laufenden Fußgängern, die Konfliktpunkte mit den Fußgängern beim Rechtsabbiegen bei ROT, der Mischfahrstreifen und die Ausfahrten auf den anderen Seiten des Knotenpunkts (vgl. Abbildung 6). Die meisten aber nicht all diesen kritischen Punkte werden vom HCM 2000 und HBS 2001 behandelt.

In Tabelle 3 sind die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen HBS 2001 und HCM 2000 in ihren Berechnungsmodulen zusammengestellt. Man kann erkennen, dass das Verfahren HBS 2001 praktisch eine Untermenge vom HCM 2000 ist. Nur in zwei Punkten bietet das HBS 2001 mehr als das HCM 2000.

		HBS 2001	HCM 2000
Grundsättigungsverkehrsstärke		2000 Pkw-E/h	1900 Pkw-E/h
Angleichungsfaktoren für Kapazitäten gesicherter Ströme	Schwerverkehrsanteil	Ja	Ja
	Fahrstreifenbreite	Ja	Ja
	Abbiegen	Ja	Ja
	Fahrbahnlängsneigung	Ja	Ja
	Parkaktivität	Nein	Ja
	Haltestelle	Nein	Ja
	Lage	Nein	Ja
	Anzahl der Fahrstreifen	Ja	Ja
verwendete Faktoren		max. 2	alle
Kapazität bedingt verträglicher Ströme	LT/RT gegen Kraftfahrzeuge	Ja	Ja
	LT/RT gegen Fußgänger	Ja	Ja
	LT/RT gegen Fahrräder	Nein	Ja
	Rechtsabbiegen bei Rot	Ja	Ja
Berechnung der Wartezeit	Multiperioden Analyse	Ja	Ja
	Signale stromaufwärts	Nein	Ja
	verkehrsabhängige Signale	Nein	Ja
Kapazität der Misch-/Kurzfahrstreifen	Kurzfahrstreifen	Ja	Nein
	Mischfahrstreifen	Ja	Ja
	Zufahrt mit Kurzfahrstreifen	Nein	Nein
	Zufahrt stromabwärts	Nein	Nein
Qualitätsnachweis	QSV F bei Wartezeit	w>100s (T=1)	w>80s (T=0.25)
	Percentile der Staulänge	Ja	Ja
	Anzahl der Halte	Ja	Nein
	Back of Queue	Nein	Ja
	Kapazität der maßgebenden Signale	Ja	Ja
Berechnung der Umlaufzeit t_U		opt., min.=f(g)	min.=f(g)
Verkehrsabhängige Steuerung		Ja	Ja
Berücksichtigung der Koordinierung		Anzahl der Halte	Ankunftstypen

Tabelle 3 - Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Berechnungsmodulen in HBS 2001 und HCM 2000

Im folgenden werden nur die Grundmodule miteinander verglichen, die am meisten aussagekräftig sind. Diese Module sind a) die Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke mit Angleichungsfaktoren für Fahrstreifenbreite, Schwerverkehrsanteile, Anzahl der Fahrstreifen

und Abbiegebeziehungen, b) die Berechnung der Kapazität der Links- und Rechtsabbieger und c) die Ermittlung der QSV.

Die Berechnung der Umlaufzeit t_U wurde bereits im Ansatz 2.2.2 erläutert.

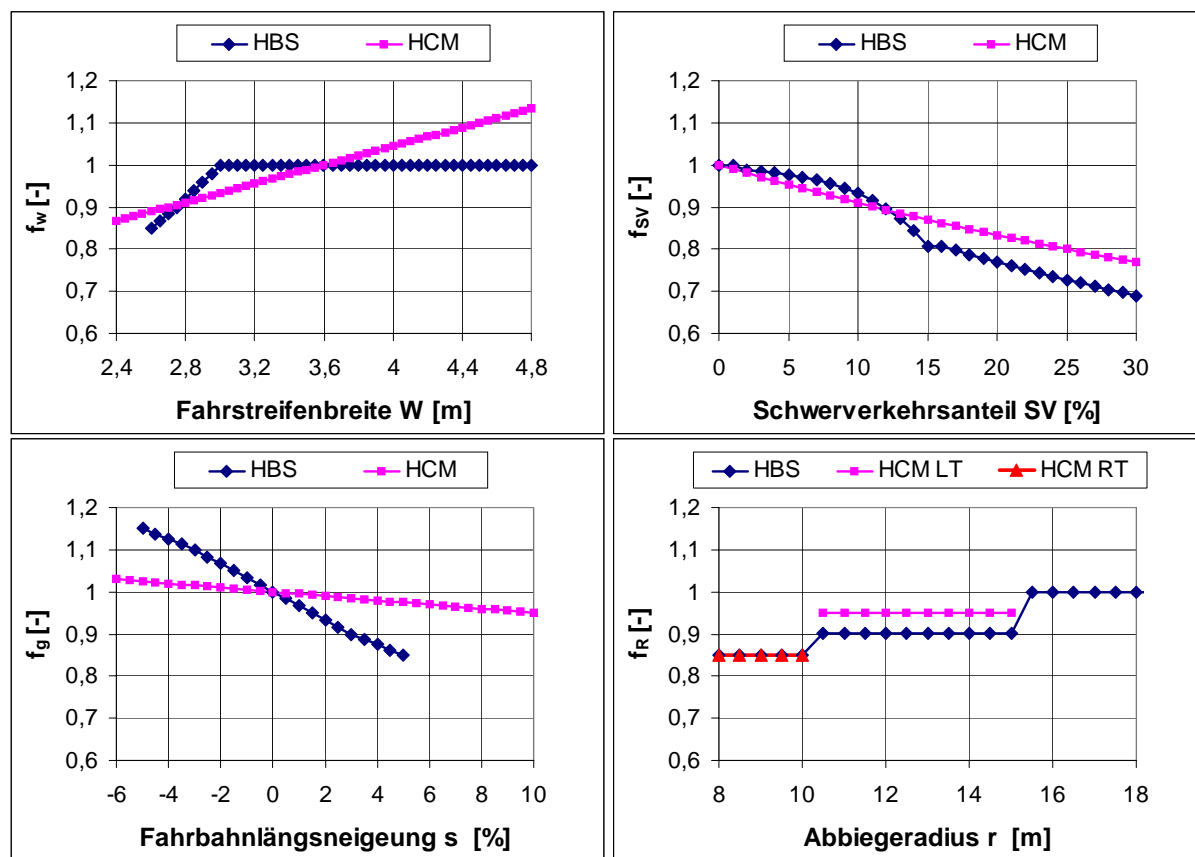


Abbildung 7 - Vergleich der Angleichungsfaktoren für die Sättigungsverkehrsstärke

Für den idealen Fall geht das HCM 2000 von einer Fahrstreifenkapazität von 1900 Pkw-E/h aus. Das HBS 2001 benutzt 2000 Pkw-E/h. Unter abweichenden Umfeldbedingungen werden dann Angleichungsfaktoren verwendet, die die Fahrstreifenkapazität entsprechend modifizieren. Die vier wichtigsten Angleichungsfaktoren sind a) der für Fahrstreifenbreite f_w , b) der für Schwerverkehrsanteil f_{sv} , c) der für Längsneigung f_g und d) der für abbiegenden Verkehr f_{LT} oder f_{RT} .

Diese vier Angleichungsfaktoren nach HBS 2001 und HCM 2000 sind in Abbildung 7 gegenübergestellt. Mit einer Ausnahme für die Längsneigung liefern beide Verfahren im normalen Anwendungsbereich Angleichungsfaktoren gleicher Größenordnung. Die starke Abweichung des Angleichungsfaktors für die Längsneigung ist vermutlich auf die weit verbreiteten Automatikgetriebe in Nordamerika zurückzuführen.

Durch Multiplikation dieser Angleichungsfaktoren wird die Grundsättigungsverkehrsstärke modifiziert und für weitere Berechnung eingesetzt. In HBS 2001 werden maximal 2 Angleichungsfaktoren gleichzeitig angewendet. In HCM 2000 ist es unbegrenzt. Der maximale Abminderungseffekt der Angleichungsfaktoren ist jedoch vergleichbar. Nach HBS 2001 (für einen Schwerverkehrsanteil SV=20%) kann die Grundstätigungsverkehrsstärke q_s maximal auf 65% abgemindert werden. Für die gleichen Bedingungen wird q_s nach HCM 2000 maximal auf 58% abgemindert.

Die Verfahren zur Berechnung der Kapazität bedingt verträglicher Rechtsabbieger sind in beiden Regelwerken qualitativ und quantitativ vergleichbar. Beide Verfahren gehen davon aus, dass die Fußgänger nur einen Teil der Freigabezeit blockieren. Die Rechtsabbieger können nach der Blockzeit frei fließen. Nur die Formeln zur Berechnung der Blockzeit der Fußgänger - in beiden Regelwerken sind es Regressionsformeln - sehen anders aus (Abbildung 8), sie liefern zahlenmäßig aber fast die gleichen Werte. Beide Verfahren berücksichtigen eine Mindestkapazität, die allein durch Phasenwechseln (engl. Sneakers) zustand kommt.

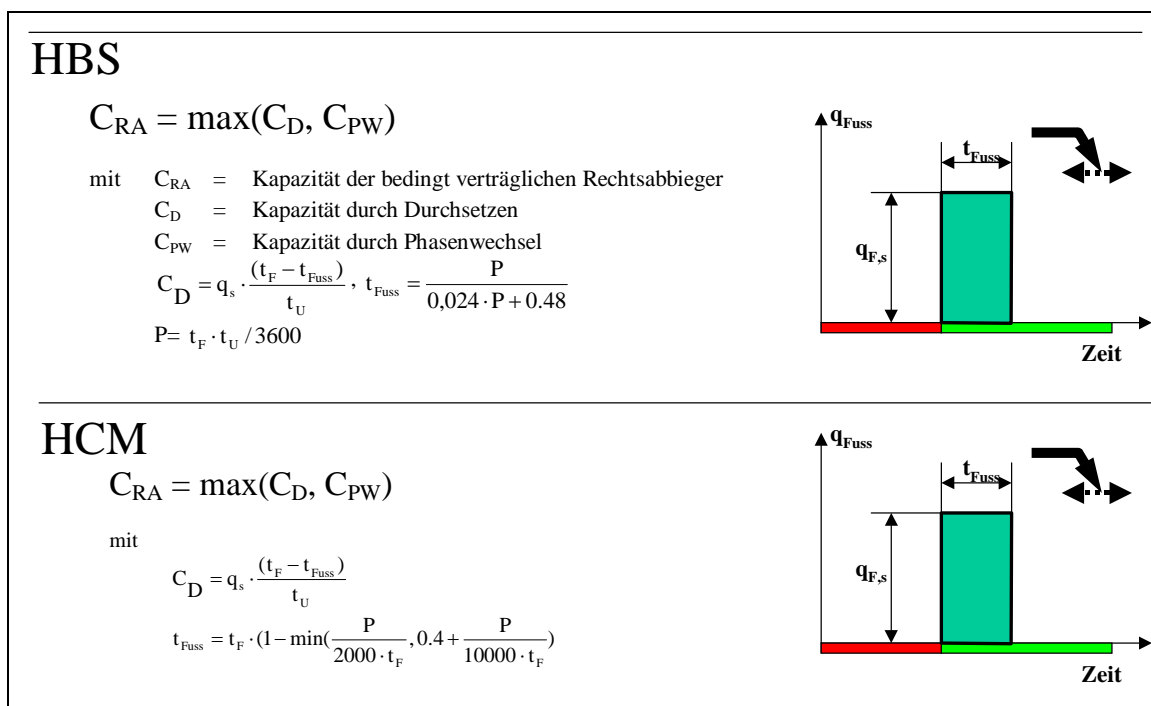
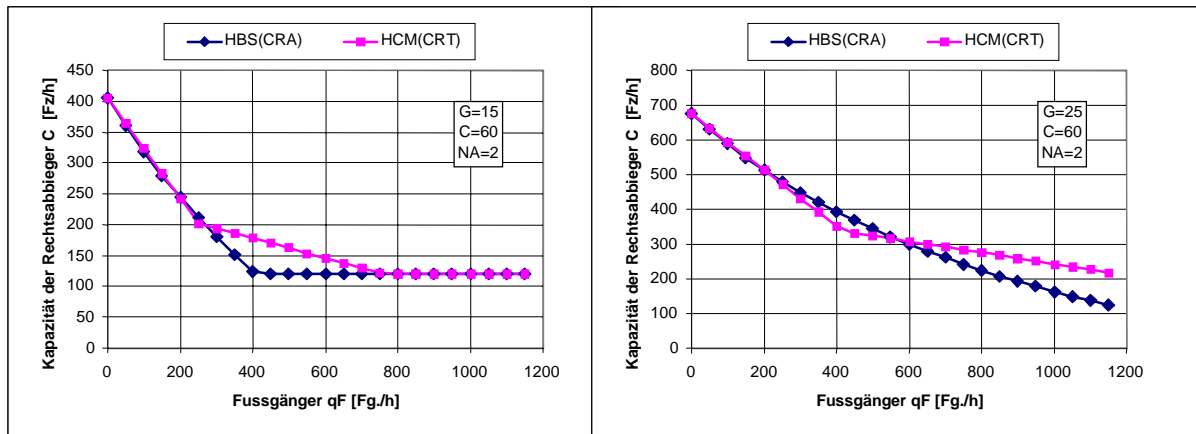


Abbildung 8 - Gleichungen zur Berechnung der Kapazität für bedingt verträgliche Rechtsabbieger (in HBS 2001: Gl.(6-30)-(6-32); in HCM 2000: Gl.(B16-1)-(B16-3))

Die Kapazitäten der Rechtsabbieger nach HCM 2000 und nach HBS 2001 sind hier in Abbildung 9 gegenübergestellt. Sie liegen zahlenmäßig in der gleichen Größenordnung.



NA=Anzahl der Aufstellplätze hinter der Haltelinie

Abbildung 9- Kapazität für bedingt verträgliche Rechtsabbieger

Anders als die Verfahren zur Berechnung der Kapazität der Rechtsabbieger, sind die Verfahren zur Berechnung der bedingt verträglichen Linksabbieger im HBS 2001 und HCM 2000 unterschiedlich (vgl. Abbildung 10).

HBS

$$C_{LA} = C_D + C_{PW}$$

mit C_{LA} = Kapazität der bedingt verträglichen Linksabbieger
 C_D = Kapazität durch Durchsetzen
 C_{PW} = Kapazität durch Phasenwechsel

$$C_D = f \cdot \frac{3600 - \frac{q}{f} \cdot t_c}{t_f} \cdot e^{-\frac{q}{f} (t_0 - t_c) / (3600 - \frac{q}{f} \cdot t_c)}$$

($t_0=4,2s$, $t_f=3,0s$, $t_c=1,8s$ für $N=1$, $t_c=0s$ für $N>1$)

HCM

$$C_{LA} = \max(C_D, C_{PW})$$

mit $C_D = f \cdot \frac{1 - \frac{q}{f \cdot q_s} \cdot e^{-\frac{q}{3600} \cdot t_g}}{1 - \frac{q}{q_s} \cdot e^{-\frac{q}{3600} \cdot t_f}}$

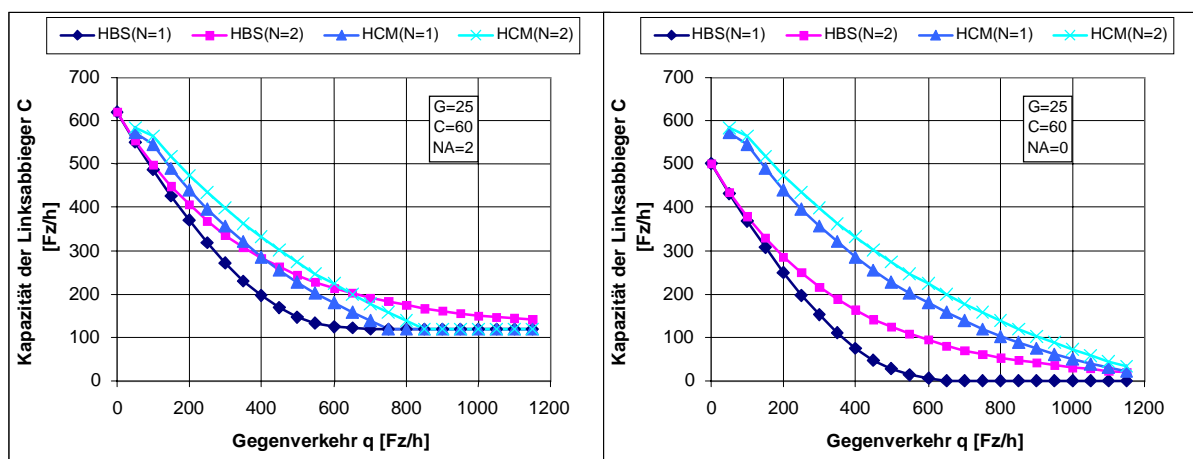
($t_g=4,5s$, $t_f=2,5s - 4,5s$)

Abbildung 10 - Gleichungen zur Berechnung der Kapazität für bedingt verträgliche Linksabbieger (in HBS 2001: Gl.(6-35)-(6-36); in HCM 2000: Abb. C16-3)

Das Verfahren in HBS 2001 unterstellt, dass der Gegenverkehr über die Gesamtlänge der Freigabezeit gleichmäßig verteilt ist. Die Kapazität der Linksabbieger wird dann nach der Theorie der Grenzzeitlücken berechnet. Dazu kommt noch ein Teil der Kapazität durch Phasenwechseln.

Dagegen wird in HCM 2000 die reale Ganglinie des Gegenverkehrs betrachtet. Der Gegenverkehr fließt zuerst mit der Sättigungsverkehrsstärke, in diesem Bereich können die Linksabbieger nicht abfließen. Und dann mit normaler Verkehrsstärke, für diesen Bereich wird dann die Kapazität der Linksabbieger nach der Theorie der Grenzzeitlücken berechnet. Die Kapazität durch Phasenwechseln wird nicht dazu addiert. Sie wird nur als Mindestkapazität eingesetzt.

Die Kapazitäten der Linksabbieger mit unterschiedlichen Parametern sind hier in Abbildung 11 gegenübergestellt. Die Linksabbieger nach HCM 2000 besitzen in der Regel höhere Kapazität gegenüber dem HBS 2001. Ursache dafür könnte sein, dass die Linksabbieger in den USA oft durchgelassen werden. Dieses Phänomen ist auch in den Kapiteln für Knotenpunkten ohne LSA zu beobachten, in dem im HCM 2000 der Linksabbieger ebenfalls höhere Kapazität aufweisen als im HBS 2001.



NA=Anzahl der Aufstellplätze hinter der Haltelinie, N=Anzahl der Fahrstreifen im Gegenverkehr

Abbildung 11 - Kapazität für bedingt verträgliche Linksabbieger

2.4 Ermittlung der Wartezeiten und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs

Die Kapazitäten können wie oben ermittelt werden. Die Verkehrsqualitäten werden jedoch nicht nach den Kapazitäten beurteilt, sondern nach den zu erwartenden mittleren Wartezeiten. Die Kapazität ist nur ein Ausgangsparameter zur Berechnung der Wartezeit.

In HBS 2001 werden die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs in 6 Stufen eingeteilt: von A bis F. Zwischen Stufe E und F ist die Kapazitätsgrenze. In HBS 2001 wird diese Grenze für Kraftfahrzeuge bei 100s gesetzt (Tabelle 4). Da die Berechnung der Wartezeit von der Länge des Bemessungsintervalls T abhängig ist, muss diese Länge T festgelegt werden. In HBS

2001 wird T=1h eingesetzt. Die Koordinierung der LSA wird mit dem Koordinierungsmaß k (=Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt) bewertet.

QSV	zulässige mittlere Wartezeit w [s]				Koordinierungsmaß k = Prozentsatz der Durchfahrten ohne Halt [%]
	Straßen- gebundener ÖPNV	Fahrrad- verkehr	Fußgänger- verkehr ¹⁾	Kraftfahrzeugverkehr (nicht koordinierte Zufahrten)	Kraftfahrzeugverkehr (koordinierte Zufahrten)
A	≤ 5	≤ 15	≤ 15	≤ 20	≥ 95
B	≤ 15	≤ 25	≤ 20	≤ 35	≥ 85
C	≤ 25	≤ 35	≤ 25	≤ 50	≥ 75
D	≤ 40	≤ 45	≤ 30	≤ 70	≥ 65
E	≤ 60	≤ 60	≤ 35	≤ 100	≥ 50*
F	> 60	> 60	> 35	> 100	< 50*

¹⁾ Zuschlag von 5 s bei Überquerung von mehreren Furten

* Koordinierung unwirksam

Tabelle 4 - Grenzwerte der mittleren Wartezeiten für die Qualitätsstufen für die verschiedenen Verkehrsteilnehmergruppen und Verkehrsarten nach HBS 2001 (dort Tab. 6-2)

In HCM 2000 werden die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs ebenfalls in 6 Stufen eingeteilt. Die Grenze zwischen E und F wird bei einer Wartezeit von 80s gesetzt (Tabelle 5). In HCM 2000 wird ein Bemessungsintervall von 15 min benutzt. Außerdem wird ein Spitzenstundenfaktor von 0,88 verwendet. Mit dem Spitzestundenfaktor wird der Unterschied zwischen der Verkehrsstärke in 15-min-Intervallen und der Verkehrsstärke im 60-min-Intervallen berücksichtigt. Zur Bewertung der Koordinierung benutzt das HCM 2000 den Parameter Platoon Ratio R_p. Die Koordinierung wird nach Tabelle 6 bewertet. Die Bewertung der Koordinierung ist kein Bestandteil des Kapazitätsnachweises.

Level of Service	Control Delay per Vehicle (s/veh)
A	≤ 10
B	> 10 - 20
C	> 20 - 35
D	> 35 - 55
E	> 55 - 80
F	> 80

Tabelle 5 - Grenzwerte der mittleren Wartezeiten für die Qualitätsstufen nach HCM 2000 (dort Abb. 6-12)

Arrival Type	Range of Platoon Ratio (R _p)	Default Value (R _p)	Progression Quality
1	≤ 0.50	0.333	Very poor
2	> 0.50 - 0.85	0.667	Unfavorable
3	> 0.85 - 1.15	1.000	Random arrivals
4	> 1.15 - 1.50	1.333	Favorable
5	> 1.50 - 2.00	1.667	Highly favorable
6	> 2.00	2.000	Exceptional

Tabelle 6 - Bewertung der Koordinierung nach HCM 2000 (dort Abb. 16-11)

Es besteht folgende Beziehung zwischen dem Platoon Ratio R_p und dem Koordinierungsmaß k

$$R_p = k \cdot \frac{t_U}{t_g} \tag{7}$$

In HCM 2000 und HBS 2001 werden unterschiedliche Bemessungsintervalle verwendet. In HCM 2000 benutzt man standardmäßig das 15-min-Intervall, in dem Verkehrsstärke höher eingesetzt wird. In HBS 2001 benutzt man als Standard das 1-Stunde-Intervall, in dem die Verkehrsstärke niedriger eingesetzt wird. Beide Regelwerke bieten auch ein Verfahren zur Multipelperiode-Analyse. Mit dieser Methode können mehrer kurze Intervalle hintereinander berechnet werden.

Die Formel zur Berechnung der Wartezeit an LSA hat in beiden Regelwerken die gleiche Grundform (Abbildung 12). Die Wartezeit setzt sich zusammen aus zwei Teilen. Das erste Teil repräsentiert die Wartezeit, die durch das periodische Wechseln des Signalbildes verursacht wird. Das zweite Teil der Formel berechnet die Wartezeit, die durch den Reststau am Ende der Umlaufzeit verursacht wird. Die Wartezeit ist im allgemeinen eine Funktion der Länge des Bemessungsintervalls T, der vorhandenen Verkehrsstärke q und der Sättigungsverkehrsstärke q_s.

In HBS 2001 wird zur Berechnung des Reststaus eine mehrteilige Regressionsfunktion eingesetzt, die durch mehrer Stützpunkte beschrieben wird. In HCM 2000 wird der Reststau mit einer einteiligen Funktion ermittelt, die durch die sogenannte "Transition Technic" hergeleitet wird.

$$w = w_1 + \frac{3600 \cdot N_{GE}}{f \cdot q_s} = f(T, q, q_s)$$

HBS

$$w_1 = \frac{t_U \cdot (1-f)^2}{2[1-g \cdot f]}$$

$$N_{GE} =$$

Sättigungsgrad	Gleichungen für N_{GE}
$g_1 \leq 0,65$	$N_{GE} = 0$
$g_2 = 0,90$	$N_{GE} = \frac{1}{0,26 + m/150}$
$g_3 = 1,00$	$N_{GE} = 0,3476 \cdot \sqrt{n_C} \cdot U^{0,565}$
$g_4 = 1,20$	$N_{GE} = [n_C(g-1)U + 25 - 20g]/2$ $N_{GE} = 0,1 \cdot n_C \cdot U + 0,5$
$g_5 > 1,20$	$N_{GE} = n_C(g-1)U/2$

HCM

$$w_1 = \frac{t_U \cdot (1-f)^2 \cdot PF}{2[1 - \min(1.0, g) \cdot f]}$$

$$N_{GE} = 900T \left[(g-1) + \sqrt{(g-1)^2 + \frac{8klg}{q_s \cdot f \cdot T}} \right]$$

Abbildung 12 - Gleichungen zur Berechnung der Wartezeit in HBS 2001 und HCM 2000

Die Ergebnisse beider Wartezeitformel sind durchaus miteinander vergleichbar, wenn die Ausgangparameter gleich gesetzt sind. Im Detail betrachtet liefert die HBS-Formel geringfügig niedrigere Werte (Abbildung 13).

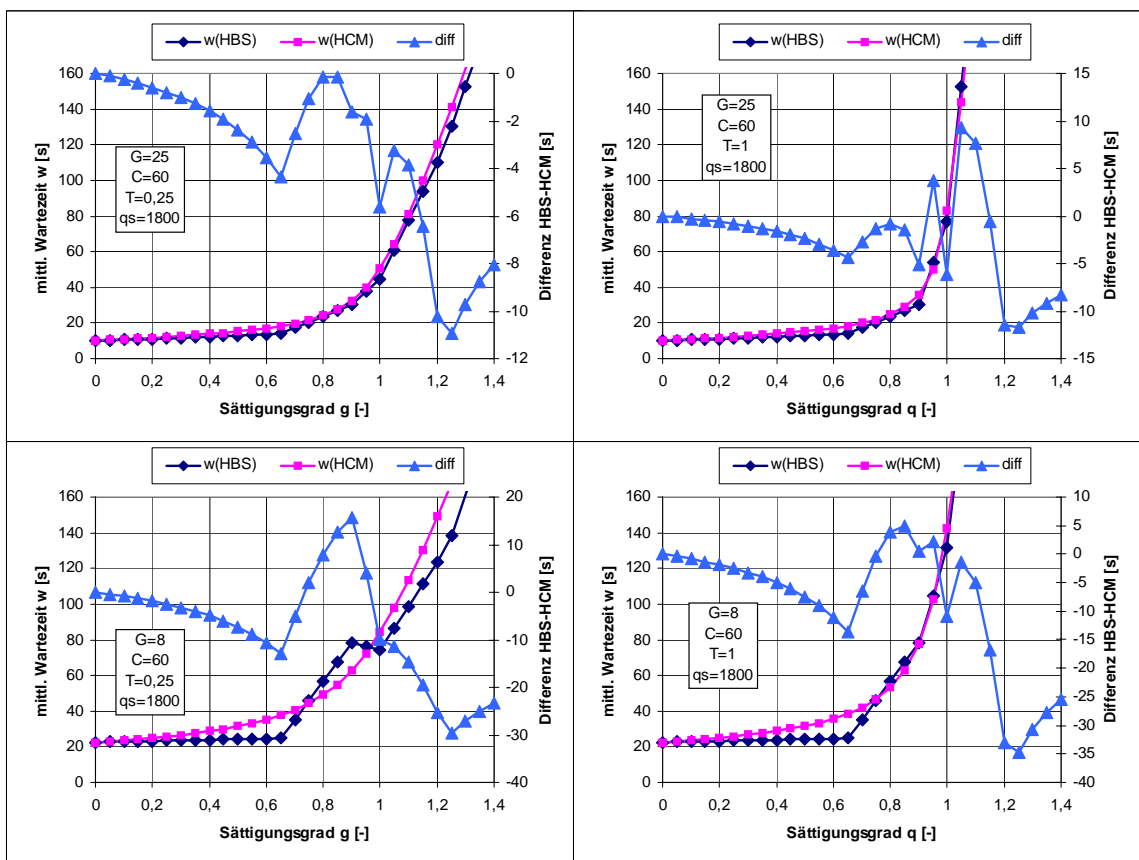
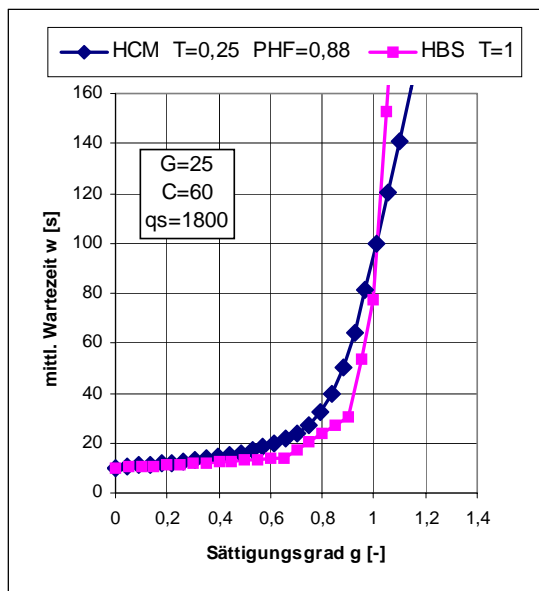


Abbildung 13 - Vergleich der Wartezeiten nach HCM 2000 und HBS 2001

Die Wartezeit-Formel in HBS 2001 liefert bei kurzer Freigabezeit (hier 8) und kurzem Bemessungsintervall (hier 15 min) an manchen Stellen unplausible Werte (Zickzack Abbildung 13 unten links). Es gibt Knicke im Verlauf der Wartezeit. Schuld daran ist der Stützpunkt bei g_2 für die Berechnung von N_{GE} . Der Stützpunkt bei g_2 wird nicht von der Länge des Bemessungsintervalls T abhängig berechnet und weist manchmal größere Werte auf als der Stützpunkt bei g_3 .

Da das Bemessungsintervall in HBS 2001 und HCM 2000 unterschiedlich lang sind, können die QSV, die auf der Wartezeit basieren, nicht direkt miteinander verglichen werden. Der Vergleich der QSV kann nur erfolgen wenn die Wartezeiten nach HBS 2001 in Wartezeit nach HCM 2000 transformiert werden oder umgekehrt (vgl. Abbildung 14).



Grenzwerte der mittleren Wartezeiten für die Qualitätsstufen für Kraftfahrzeugverkehr

QSV	ohne Koordinierung zulässige mittlere Wartezeit w [s]		
	Kraftfahrzeugverkehr (HBS) (T=1 h)	Entspricht HCM für (T=0,25 h PHF=0,88)	Kraftfahrzeugverkehr (HCM) (T=0,25 h)
A	≤ 20	→ ≤ 25	→ ≤ 10
B	≤ 35	→ ≤ 60	→ ≤ 20
C	≤ 50	→ ≤ 70	→ ≤ 35
D	≤ 70	→ ≤ 85	→ ≤ 55
E	≤ 100	→ ≤ 100	→ ≤ 80
F	> 100	→ > 100	→ > 80

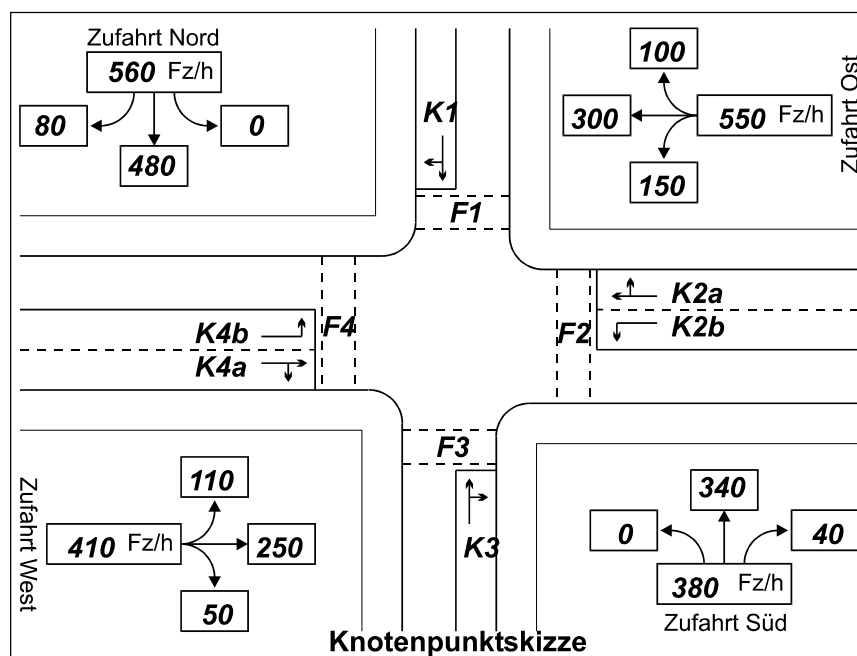
Kapazität: E(HCM)=D(HBS)

Abbildung 14 - Vergleich der Kriterien für QSV in HBS 2001 und HCM 2000

Nach der Transformation entsprechen 100s Wartezeit nach HBS 2001 genau 100s nach HCM 2000. 50s nach HBS 2001 entsprechen 70s nach HCM 2000. Vergleicht man die transformierten Wartezeiten für die QSV in HBS 2001 mit den Wartezeiten für QSV in HCM 2000, wird klar, dass das HBS 2001 den Verkehr weniger streng bewertet. Wenn eine LSA nach HCM 2000 bereits die QSV E erreicht hat, ist es nach HBS 2001 noch bei QSV D.

Im HCM 2000 werden die Wartezeiten bei koordinierten LSA und verkehrsabhängigen Steuerungen durch drei zusätzliche Parameter berücksichtigt. Das HBS 2001 bietet keine Möglichkeit, bei der Berechnung der Wartezeit die Koordinierung und die verkehrsabhängige Steuerung zu berücksichtigen.

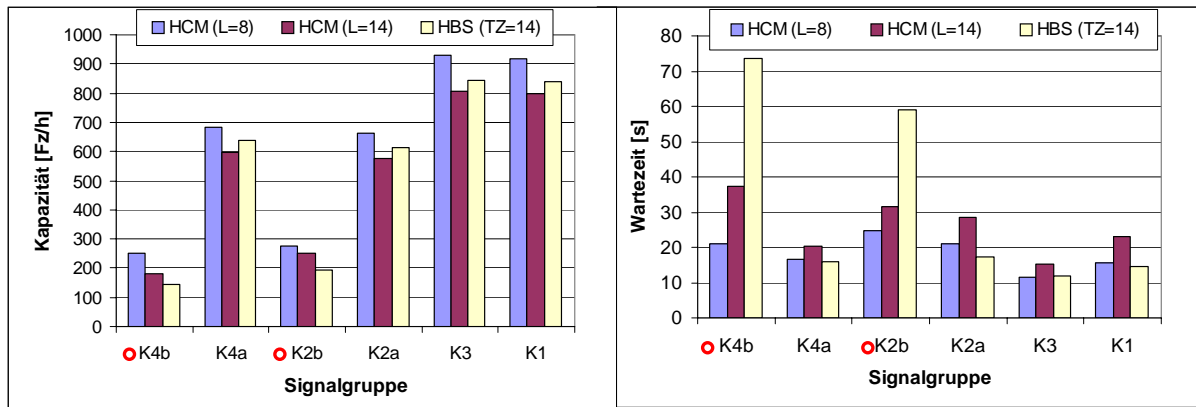
Zum konkreten Vergleich von HCM 2000 und HBS 2001 wird ein einfaches Beispiel betrachtet, das in HBS 2001 benutzt wird (Abbildung 15). Betrachtet wird eine einfache Kreuzung mit insgesamt 6 Signalgruppen. Ein 2-Phasen-System wird verwendet. Die Linksabbieger aus der Hauptrichtung haben zwar eigene Fahrstreifen werden aber bedingt verträglich geführt.



TZ=14 s

Abbildung 15 - Skizze des Rechnbeispiels

Die Bewertungsergebnisse dieser LSA nach HBS 2001 und nach HCM 2000 sind in Abbildung 16 zusammengestellt. Links in Abbildung 16 sind die Kapazitäten, rechts die Wartezeiten der einzelnen Signalgruppen dargestellt. Für das HCM 2000 wurde einmal die realen Zwischenzeiten nach HBS 2001, das sind 14s, und einmal nach den Standardwerten nach HCM 2000, das sind 8s, berechnet. Außer den Linksabbiegern liefert das HCM 2000 mit 8s Zwischenzeiten am besten vergleichbare Kapazitäten und Wartezeiten. Nach den Kriterien der QSV wird die LSA vom HBS 2001 jedoch viel positiver beurteilt als vom HCM 2000. Eine LSA ist nach HBS 2001 "leistungsfähiger" als nach HCM 2000.



LOS	K4b	K4a	K2b	K2a	K3	K1
HCM (L=8)	C	B	C	C	B	B
HCM (L=14)	D	C	C	C	B	C
HBS (TZ=14)	○ E	A	○ D	A	A	A

○ **Linksabbieger**

Abbildung 16 - Vergleich der Qualitätsstufen QSV/LOS für das Rechenbeispiel

3 Zusammenfassung

Anhand von Zahlenbeispielen werden die Berechnungsverfahren für die Bemessung und Bewertung von Lichtsignalanlagen in HBS 2001 und HCM 2000 miteinander verglichen. Es kann festgestellt werden, dass der größte Unterschied zwischen den beiden Verfahren bei der Bestimmung der Zwischenzeiten liegt. Nach HBS 2001 werden Zwischenzeiten verwendet, die das 1,5-Fache der Zwischenzeiten nach HCM 2000 entsprechen. Dies bedeutet, dass eine nach HCM 2000 berechnete Lichtsignalanlage leistungsfähiger ist als eine, die nach HBS 2001 berechnet wird. Geht man aber von gleichen Zwischenzeiten aus, sind die beiden Verfahren in folgenden Schwerpunkten vergleichbar:

- Beide Regelwerken verwenden in der ersten Linie das gleiche Konzept
- Mit der Ausnahme der bedingt verträglichen Linksabbieger werden nach beiden Verfahren Kapazitäten gleicher Größenordnung berechnet
- Unter gewöhnlichen Verkehrsbedingungen sind die Ergebnisse beider Verfahren qualitativ vergleichbar aber in der Regel ist die Bewertung nach HCM 2000 "strenger" als nach HBS 2001

- Im Vergleich zum HCM 2000 ist das HBS 2001 einfacher zu handhaben aber es besteht in manchen Bereichen noch Bedarf zur Ergänzung/Weiterentwicklung

Das HCM hat bereits eine lange Entwicklungsgeschichte hinter sich. Es ist mit der Zeit ein internationaler Standard geworden. Das HCM 2000 wurde mit großem Aufwand in den USA kalibriert und validiert. Im Vergleich zum HCM wurde das HBS in sehr kurzer Zeit entwickelt. Es bedarf demnach noch weiteren Entwicklungen und mehr Kalibrierungsarbeiten um eine entsprechende internationale Anerkennung zu erhalten.

Literaturangaben

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.

RiLSA (1992). *Richtlinien für Lichtsignalanlagen - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 321. Köln. Berichtigter Nachdruck 1998.

TRB (2000). *Highway Capacity Manual (HCM 2000)*. TRB, National Research Council, Washington, D.C.

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