

Verfahren zur Bewertung von verkehrsabhängigen, zeitlückengesteuerten Lichtsignalanlagen

Ning Wu¹

(veröffentlicht in *Straßenverkehrstechnik*, Heft 9/2005. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 2005)

Abstract

Es werden einige Modelle zur Bewertung von verkehrsabhängigen, zeitlückengesteuerten LSA vorgestellt und erweitert. Diese Modelle werden mit plausiblen Parametern evaluiert. Es zeigt sich, dass der Hauptvorteil einer verkehrsabhängigen Steuerung auf der Anpassung der Grünzeiten an die Ganglinie der Verkehrsstärken beruht. Die Abfilterung der stochastischen Schwankungen der Verkehrsstärken spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle. Für stationäre Zuflüsse erzeugt die vollverkehrsabhängige Steuerung eine quasi-wartezeitoptimale Umlaufzeit. Nach den vorhandenen Kenntnissen kann ein vereinfachtes, einschlägiges Berechnungsverfahren zur Bewertung von verkehrsabhängigen, zeitlückengesteuerten LSA vorgeschlagen werden.

In this paper, some important models for calculating traffic actuated signals are introduced and extended. These models are evaluated by plausible parameters. It can be recognized that the major advantage of the traffic actuated signals is mainly based on adapting the green time to the traffic flow patterns during the peak-hour. The adaptation of green times to random deviations of the traffic flow plays hereby only a subordinated rule. For stationary flow rate, a traffic actuated signal leads to a nearly delay-optimized cycle time. According to the existing knowledge, a simple delay analysis procedure can be established for traffic actuated signals.

¹ Verfasseranschrift: Privatdozent, Dr.-Ing. habil. N. Wu, Lehrstuhl für Verkehrswesen
Ruhr-Universität Bochum, ning.wu@rub.de

1 Einleitung

Lichtsignalanlagen (LSA) sind unverzichtbare Anlagen zur Steuerung von Verkehrsflüssen an plangleichen Knotenpunkten. Die Steuerungsarten der LSA und deren Einsatzbereiche sind von der Netzfunktion des betrachteten Knotenpunktes, von der Verkehrsbelastung und von den Investitions- und Betriebskosten abhängig. Bei der verkehrstechnischen Berechnung von LSA ist die grundsätzliche Aufgabe eines Verkehrsingenieurs, die Signalzeitenpläne mit den Zielsetzungen a) Sicherheit und b) Kapazität und Verkehrsqualität zu gestalten. Die Aspekte der Sicherheit gelten als gewahrt, wenn die Vorschriften der RiLSA (FGSV, 1992, 2003) und der VDE/DIN 0832 eingehalten sind. Hierzu sind außer Zwischenzeiten noch andere Restriktionen (z.B. Mindestfreigabezeit, Maximalsperrzeit, Vorgabezeit für Fußgängersignalgruppen) einzuhalten. Für die Berechnung der Kapazität und die Bewertung der Verkehrsqualität stehen unterschiedliche Regelwerke und Rechenverfahren zur Verfügung, mit denen verschiedene Steuerungsarten der LSA bewertet und beurteilt werden können.

Die Steuerungsverfahren für LSA können in drei Hauptgruppen unterteilt werden, die unterschiedliche Flexibilitäten in den Elementen der Signalzeitenprogramme aufweisen.

Die erste Hauptgruppe der Lichtsignalsteuerungsverfahren ist die Festzeitsteuerung, bei der alle Elemente der Signalzeitenpläne festgelegt sind. Beim Entwurf und bei der Bewertung der Festzeitsteuerung werden nur makroskopische Daten wie Verkehrsstärke, mittlere Wartezeit, mittlere Geschwindigkeit etc. berücksichtigt. Die Festzeitsteuerung basiert auf kollektiven Daten der Verkehrsteilnehmer und gehört demnach zu den so genannten makroskopischen Steuerungsverfahren. Bei der Festzeitsteuerung werden bei sachgerechter Vorgehensweise mehrere Signalprogramme offline für prognostizierte Verkehrsstärken vorgeplant und bei Bedarf zeitplan- oder verkehrsabhängig eingesetzt. Für diese Art der Steuerung kann die Berechnung der Kapazität und die Bewertung der Verkehrsqualität relativ einfach durchgeführt werden, da alle erforderlichen Kenngrößen vorgegeben sind. Die Verfahren hierfür sind ausgereift. Sie sind in unterschiedlicher Weise in bekannten Regelwerken (z.B. HCM 2000 (TRB, 2000), HBS 2001 (FGSV, 2001)) formuliert.

Die zweite Hauptgruppe der Lichtsignalsteuerungsverfahren ist die so genannte vollverkehrsabhängige Steuerung, bei der sowohl die Freigabezeiten als auch die Signalstrukturen online verkehrsabhängig bestimmt werden können. Bei der gängigen vollverkehrsabhängigen Steuerung werden die Lichtsignalanlagen anhand von Messungen der

Zeitlücken zwischen den einzelnen Fahrzeugen und gemäß der An- und Abmeldungen der Detektoren geschaltet. Sie ist ereignisorientiert und wird deswegen auch mikroskopische Steuerung genannt. Bei geringeren Verkehrsbelastungen bietet die vollverkehrsabhängige Steuerung genügend Flexibilität im Hinblick auf die Anpassung des Signalzeitenplans an die aktuellen Verkehrsbedingungen. Bei hohen Verkehrsbelastungen tendiert eine vollverkehrsabhängige Steuerung oft zu einem scheinbaren Festzeitsteuerungsprogramm, da der vorgegebene Dauerschaltkreis und die vorgegebenen maximalen Freigabezeiten in allen Phasen eingesetzt werden müssen.

Zwischen der Festzeitsteuerung und der vollverkehrsabhängigen Steuerung liegt die dritte Hauptgruppe der Lichtsignalsteuerungsverfahren, die teilverkehrsabhängige Steuerung (auch Freigabezeitanpassung oder Freigabezeitmodifizierung genannt), bei der die Signalstrukturen und die Umlaufzeit vorgegeben sind und nur die Längen einiger Freigabezeiten online verkehrsabhängig ermittelt werden. Dies kann sowohl mikroskopisch (ereignisorientiert) als auch makroskopisch (verkehrsbelastungsabhängig) durchgeführt werden.

Zur Bewertung der verkehrsabhängigen Steuerungen (vollverkehrsabhängige Steuerung und Freigabezeitanpassung) existieren bereits einschlägige Ansätze, die wegen ihrer komplizierten Formulierung noch nicht in der Praxis für breite Anwendungen eingesetzt werden können.

In diesem Betrag werden die wichtigsten Berechnungsverfahren zur Bewertung der verkehrsabhängig, zeitlückengesteuerten LSA zusammengetragen und entsprechend erweitert, dass ein für die praktische Anwendung überschaubares Verfahren dargestellt werden kann. Dieses Verfahren kann z. B. als Ergänzung zu den Berechnungsverfahren in das HBS 2001 (FGSV, 2001) integriert werden.

2 Vorhandene Berechnungsverfahren für verkehrsabhängige Steuerung

In HBS 2001 (FGSV, 2001) wird kein Berechnungsverfahren für die Bewertung der verkehrsabhängig gesteuerten LSA angegeben. Dagegen ist im amerikanischen HCM 2000 (TRB, 2000) ein einschlägiges Verfahren dargestellt. Mit diesem Verfahren kann die mittlere Umlaufzeit der LSA iterativ ermittelt werden. Zur Bewertung der Verkehrsqualität wird – wie bei der festzeitgesteuerten LSA – die mittlere Wartezeit verwendet. Die Wartezeit wird in Abhängigkeit von der verwendeten Abbruchzeitlücke berechnet.

Newell (1969) hat eine 2-phasige vollverkehrsabhängige Steuerung untersucht und ein Model zur Ermittlung der mittleren Grünzeiten und der entsprechenden mittleren Umlaufzeit formuliert. Er hat auch eine Formel für die mittlere Wartezeit angegeben.

Akcelik (1994) hat ein Model vorgeschlagen, mit dem die mittleren Grünzeiten und die mittlere Umlaufzeit bei vollverkehrsabhängiger Steuerung ermittelt werden können. Die mittleren Grünzeiten und die mittlere Umlaufzeit sind Funktionen von Verkehrsstärken, Zwischenzeiten und Abbruchzeitlücken.

In den Ansätzen von Newell (1969) und Akcelik (1994) wurde aus Grunde der Vereinfachung davon ausgegangen, dass die aktuelle Grünzeit auch die Werte Null und Unendlich annehmen kann. In der Wirklichkeit werden die Grünzeiten durch die vorgegebene Mindest- und Maximalgrünzeit begrenzt. Die dadurch entstandene Abweichung bei der Ermittlung der mittleren Grünzeiten ist von der Länge der zu erwartenden mittleren Grünzeiten abhängig. Diese Abweichung ist in der Regel nicht signifikant, da die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die aktuelle Grünzeit stark von der mittleren Grünzeit abweicht, sehr klein ist. Für die Bewertung der LSA müssen die ermittelten, mittleren Grünzeiten durch die Mindest- und Maximalgrünzeit ersetzt werden, wenn sie außerhalb der gültigen Bereiche liegen.

Zur Berücksichtigung der Mindest- und Maximalgrünzeit bei der Ermittlung der mittleren Wartezeit haben Li et. al. (1994) eine ausführliche Simulationsuntersuchung unter verschiedenen Verkehrsbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind auch in HCM 2000 (TRB, 2001) integriert.

Außer den oben genannten Quellen existieren noch viele anderen Arbeiten, die sich mit der Problematik der verkehrsabhängigen LSA befassen. Dazu sind vor allem die Arbeiten von Newell and Osuna (1969), Cowan (1978), Stauton (1976), and Lin (1982) zu nennen.

3 Bewertung der vollverkehrsabhängig gesteuerten LSA nach Newell (1969), Akcelik (1994) und HCM 2000

3.1 Mechanismus der vollverkehrsabhängiger Steuerung

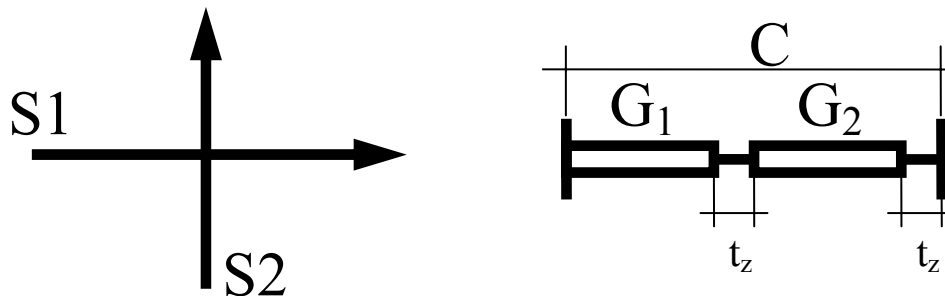


Abb. 1 – Kreuzung mit zwei Signalgruppen und zwei Phasen

Bei vollverkehrsabhängig gesteuerten LSA werden im Allgemeinen Freigabephasen und Phasenübergänge vordefiniert, die dann online durch eine vorgegebene Logik miteinander verknüpft werden. Die Länge der jeweils geschalteten Freigabezeit ist dann abhängig von der aktuellen Verkehrsbelastung. In der Regel wird noch ein so genannter Dauerschaltkreis definiert, in dem alle Verkehrsströme nach einer vorgegebenen Reihenfolge freigegeben werden. Die gängige Methode der vollverkehrsabhängigen Steuerung ist die so genannte Zeitlückenmethode. Dabei werden die Zeitlücken zwischen den hintereinander kommenden Fahrzeugen vor der Haltelinie gemessen. Kürzere Zeitlücken sind mit höheren Verkehrsstärken verbunden, längere Zeitlücken mit niedrigen Verkehrsstärken. Es wird eine bestimmte Länge der Zeitlücke vorgegeben, die zum Abbruch der jeweiligen Freigabephase führt. Wenn die aktuelle gemessene Zeitlücke länger als die vorgegebene Zeitlücke ist (2-5s nach RiLSA, 2 und 3s empfohlen), wird die aktuelle Freigabezeit abgebrochen und die konkurrierende Phase freigegeben. Vorher muss noch der zugehörige Phasenübergang geschaltet werden, damit die erforderlichen Zwischenzeiten angehalten werden. Anschließend werden in einem konkurrierenden Strom die Zeitlücken gemessen und die Freigabezeit wird dann wieder abgebrochen, wenn eine Zeitlücke dort größer als der vorgegebene Wert ist. So entsteht ein Signalzeitenplan mit wechselnden Freigabezeiten, deren Längen von den aktuellen Verkehrsstärken abhängig sind. Für eine Modellkreuzung mit zwei Signalgruppen und einer 2-Phasensteuerung (vgl. Abb. 1) kann die Entwicklung der Rückstaulängen vor den Haltlinien in Abb. 2 grafisch anschaulich dargestellt werden.

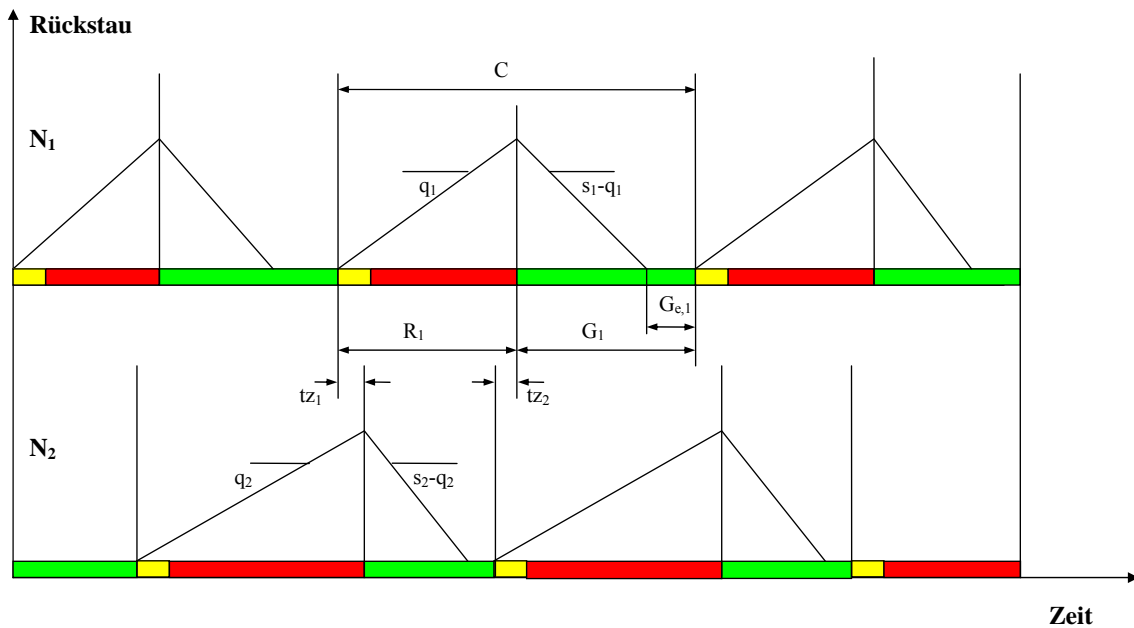


Abb. 2 – Rückstaulängen vor den Haltlinien

3.2 Ermittlung der mittleren Grün- und Umlaufzeit

Gemäß der in Abb. 2 dargestellten Ganglinien der Rückstaulängen können die Mittelwerte der erforderlichen Grünzeiten und der Umlaufzeit sowie die mittlere Wartezeit ermittelt werden. Nach Akcelik (1994) sind die mittleren Grünzeiten und die mittlere Umlaufzeit Funktionen der Verkehrsstärken, der Zwischenzeiten und der Abbruchzeitlücken. Seine Herleitung für die Berechnung der mittleren Grünzeiten und der mittlere Umlaufzeit wird im Folgenden dargestellt.

Die Grünzeit G einer vollverkehrsabhängigen Signalgruppe i kann aus zwei Teilen zusammengesetzt werden:

$$G_i = G_{s,i} + G_{e,i} \quad G_{\min} \leq G_i \leq G_{\max} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

mit G_s = Grünzeit zur Abwicklung der stehenden Fahrzeuge [s]

G_e = Verlängerung nach G_s [s]

G_{\min} = Mindestgrünzeit [s]

G_{\max} = Maximalgrünzeit [s]

Die Anzahl der Fahrzeuge m_i , die in dem betrachteten Umlauf C ankommen, ist

$$m_i = q_i C \quad [\text{Fz}] \quad (2)$$

mit C = Umlaufzeit [s]

q_i = Verkehrsstärke der Signalgruppe i [Fz/s]

Die Fahrzeuge, die während der Verlängerung der Grünzeit $G_{e,i}$ ankommen, müssen nicht anhalten. Dann ist die Anzahl der Fahrzeuge $m_{s,i}$, die wirklich zum Stehen kommen:

$$m_{s,i} = q_i(C - G_{e,i}) \quad [\text{Fz}] \quad (3)$$

Um diese Fahrzeuge abzuwickeln, wird eine Grünzeit der Länge $G_{s,i}$ benötigt:

$$G_{s,i} = \frac{m_{s,i}}{s_i} = \frac{q_i(C - G_{e,i})}{s_i} = y_i(C - G_{e,i}) \quad [\text{s}] \quad (4)$$

mit s_i = Sättigungsverkehrsstärke der Signalgruppe i [Fz/s]

$$y_i = \frac{q_i}{s_i}$$

Die Gesamtlänge der Grünzeit lautet dann:

$$G_i = G_{s,i} + G_{e,i} = y_i(C - G_{e,i}) + G_{e,i} = y_i C + (1 - y_i)G_{e,i} \quad [\text{s}] \quad (5)$$

Addiert man die Grünzeiten aller maßgebenden Signalgruppen und die zugehörigen Zwischenzeiten, erhält man die Umlaufzeit

$$C = \sum G_i + TZ = \sum [y_i C + (1 - y_i)G_{e,i}] + TZ \quad [\text{s}] \quad (6)$$

mit $TZ = \sum t_{z_i}$ = Summe der maßgebenden Zwischenzeiten

Aufgelöst nach der Umlaufzeit C erhält man

$$(1 - \sum y_i)C = \sum (1 - y_i)G_{e,i} + TZ \quad (7)$$

Bildet man die Erwartungswerte auf beiden Seiten dieser Gleichung und löst man die Gleichung nach der mittleren Umlaufzeit C auf, erhält man

$$C_{\text{mittl}} = \frac{\sum [(1 - y_i)G_{e,i,\text{mittl}}] + TZ}{1 - \sum y_i} \quad [\text{s}] \quad (8)$$

Nach der Zeitlückentheorie kann der Mittelwert der Grünzeitverlängerung $G_{e,i,\text{mittl}}$ mit der folgenden Gleichung angegeben werden (vgl. auch Akcelik, 1994):

$$G_{e,i,mittl} = -\frac{1}{q_i} + \left(\frac{\Delta_i}{1 - \Delta_i q_i} + \frac{1}{q_i} \right) \exp(q_i(ZL_i - \Delta_i)) \quad [s] \quad (9)$$

mit ZL_i = Zeitlücke für Abbruch der Grünzeit [s]

Δ_i = Mindestzeitlücke [s]

Die mittlere Grünzeit $G_{i,mittl}$ lautet

$$G_{i,mittl} = y_i C_{mittl} + (1 - y_i) G_{e,i,mittl} \quad [s] \quad (10)$$

In den Gl. (8) und (9) ist zu erkennen, dass die mittlere Umlaufzeit eine Funktion der Verkehrsstärken q_i , der Zwischenzeiten t_{z_i} und der Abbruchzeitlücken ZL_i ist. In Abb. 3 ist der Verlauf der Umlaufzeiten einer 2-phasigen Steuerung in Abhängigkeit von der Summe der maßgebenden Verkehrsstärken und von der Länge der Abbruchzeitlücke dargestellt. Zur Vereinfachung wird eine einheitliche Zwischenzeit von 5s zwischen allen Phasen verwendet. Für beide Phasen wird ebenfalls eine Abbruchzeitlücke gleicher Länge eingesetzt. Zum Vergleich wird in Abb. 3 auch die Wartezeit mit der optimierten Umlaufzeit nach Webster und Cobbe (1966) für die gleichen Bedingungen dargestellt. Die Gleichung der Optimalumlaufzeit nach Webster und Cobbe (1966) lautet (vgl. auch HBS 2001 (FGSV, 2001)):

$$C_{opt} = \frac{1,5TZ + 5}{1 - \sum y_i} \quad [s] \quad (11)$$

In Abb. 3 ist deutlich zu erkennen, dass die mittlere Umlaufzeit mit zunehmender Gesamtverkehrsstärke zunimmt. Mit zunehmender Länge der Abbruchzeitlücke nimmt die mittlere Umlaufzeit ebenfalls zu. Es ist auch zu erkennen, dass die mittlere Umlaufzeit der vollverkehrsabhängigen Steuerung parallel zu der Optimalumlaufzeit nach Webster und Cobbe (1966, Gl.(11)) verläuft. Bei $ZL=4,5s$ sind die beiden Kurven fast deckungsgleich. Es scheint zu sein, dass die vollverkehrsabhängige Steuerung nach dem Zeitlückenverfahren eine quasi-optimale Umlaufzeit erzeugt. Für eine 2-phasige Steuerung soll demnach $ZL=4$ bis $5s$ gewählt werden, um eine wartezeitoptimale Umlaufzeit zu erhalten.

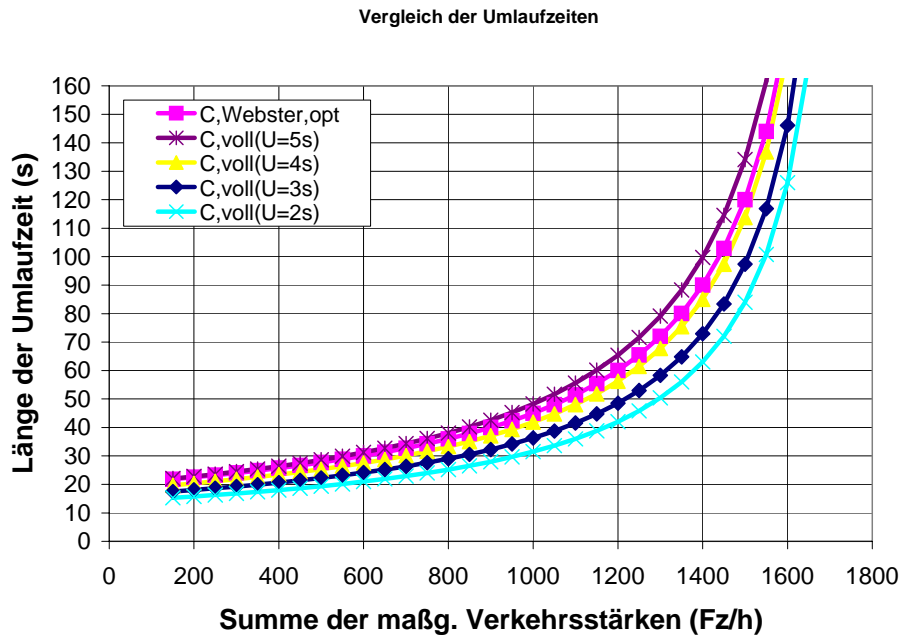


Abb. 3 – Verlauf der Umlaufzeiten einer 2-phasigen Steuerung in Abhängigkeit von der Summe der maßgebenden Verkehrsstärken und von der Länge der Abbruchzeitlücke

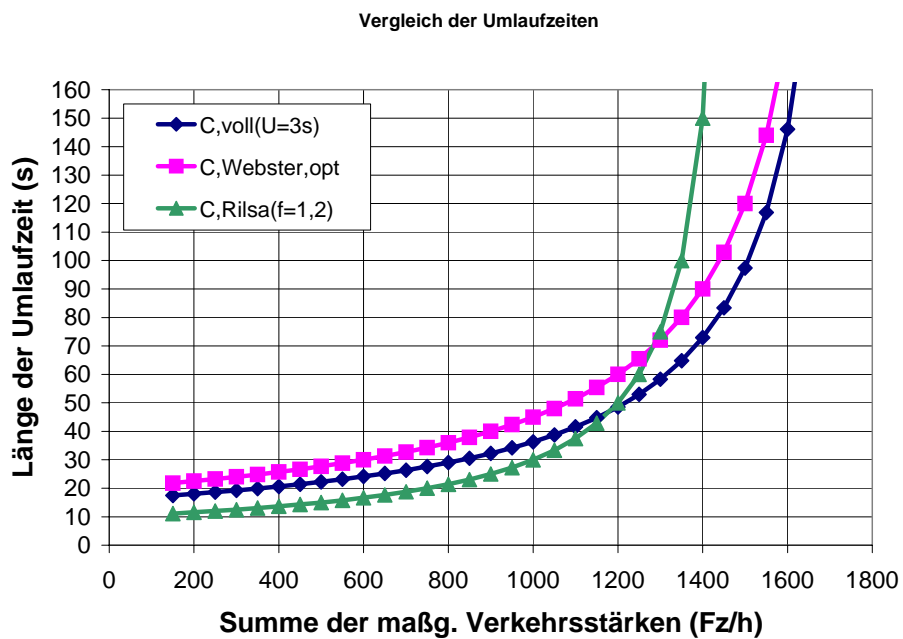


Abb. 4 – Verlauf der Umlaufzeiten einer 2-phasigen Steuerung im Vergleich mit der Optimalumlauftzeit nach Webster und Cobbe (1966) und mit der erforderlichen Umlauftzeit nach RiLSA (FGSV, 1992)

Als Vergleich ist in Abb. 4 noch die nach RiLSA (FGSV, 2003) berechnete erforderliche Umlaufzeit (mit $f=1,2$) zusammen mit der mittleren Umlaufzeit der vollverkehrsabhängigen Steuerung ($ZL=3s$) und der Optimalumlaufzeit nach Webster und Cobbe (1966) dargestellt. Die Formel nach RiLSA (FGSV, 1992) lautet:

$$C_{erf} = \frac{TZ}{1 - \sum y_i f} \quad [s] \quad (12)$$

Dabei sind die Differenzen zwischen den verschiedenen Umlaufzeiten zu erkennen. Für die in Deutschland gängige Abbruchzeitlücke von 3s ist die mittlere Umlaufzeit bei der vollverkehrsabhängigen Steuerung kürzer als die wartezeitoptimale Umlaufzeit nach Webster und Cobbe (1966). Zwischen der erforderlichen Umlaufzeit nach RiLSA (FGSV, 1992) und den Ergebnissen anderer beiden Verfahren ist kein eindeutiger, funktionaler Zusammenhang zu erkennen. In wie fern sich diese Differenzen auf die Verkehrsqualität auswirken, wird im folgenden Absatz diskutiert.

Wenn die Zeitlücken von vorgelegten Detektoren gemessen werden, die entfernt von den Haltlinien installiert sind, können die Grünzeit früher abgebrochen werden. Für den Fall, dass die Fahrzeiten zwischen den Detektoren und der Haltlinien größer sind als die vorgegebene Zeitlücke ZL (zuzüglich der Reaktionszeit des Steuerungsgerätes), können die Grünzeiten um die Länge ZL verkürzt werden. Bei der Schätzung der mittleren Grün- und Umlaufzeiten kann es entsprechend berücksichtigt werden (siehe Wu, 2004).

In vielen praktischen Fällen werden die Abbruchzeitlücken noch variiert, je nach dem wie lang die Freigabezeit bereits geschaltet ist. In solchen Fällen lassen sich die mittleren Grünzeiten nach Gl.(8) nicht explizit berechnen. Sie können aber iterativ ermittelt werden (siehe auch HCM 2000 (TRB, 2000)).

Die hier vorgestellten Gleichungen sind für allgemeine Bedingungen hergeleitet worden. Sie sind nicht auf die einfache Modellkreuzung mit 2-Phasen (siehe Abb. 1) eingeschränkt, sondern gelten für beliebig viele Phasen.

Für die Bewertung der LSA müssen die nach Gl.(10) ermittelten, mittleren Grünzeiten durch die Mindestgrünzeit G_{min} und Maximalgrünzeit G_{max} ersetzt werden, wenn sie außerhalb der gültigen Bereiche liegen. Es ist auch denkbar, dass eine Maximalumlaufzeit vorgegeben wird und die Maximalgrünzeiten innerhalb der Maximalumlaufzeit aufgeteilt werden. Falls für einige Phasen die Mindest- oder die Maximalgrünzeit verwendet wird, muss die mittlere Umlaufzeit nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$C_{\text{mittl}} = \frac{\sum_{\text{alle Phasen o. p}} [(1 - y_i) G_{e,i,\text{mittl}}] + TZ + \sum_p (G_{\text{min}} \text{ oder } G_{\text{max}})}{1 - \sum_{\text{alle Phasen o. p}} y_i} \quad [\text{s}] \quad (13)$$

$$G_{i,\text{mittl}} = \min(\max(y_i C_{\text{mittl}} + (1 - y_i) G_{e,i,\text{mittl}}, G_{\text{min}}), G_{\text{max}}) \quad [\text{s}] \quad (13)^*$$

Der Parameter p steht für die Menge der Phasen mit gewählten Mindest- oder Maximalgrünzeiten. Um extrem unbalancierte Wartezeiten zwischen den maßgebenden Signalgruppen zu vermeiden, sollen im Fall der Überlastung die Maximalgrünzeiten proportional zu den Verkehrsstärken definiert werden.

Wenn in einer Phase mehr als eine Signalgruppe freigegeben wird, sollen die Signalgruppen mit den maßgebenden Verkehrsstärken bei der Berechnung betrachtet werden (siehe auch Newell and Osuna, 1969).

3.3 Schätzung der Wartezeit

Die Wartezeit an LSA setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Wartezeit erster (uniform delay) Art W_I und zweiter (incremental delay) Art W_{II} . Die Wartezeit erster Art entsteht durch die wechselweise Schaltung der Freigabe- und Sperrzeit. Die Wartezeit zweiter Art wird durch den Reststau am Ende der Freigabezeit verursacht. Es existiert eine Vielzahl von Modellen zur Berechnung der mittleren Wartezeit an LSA. Z.B. lautet die Formel in HCM 2000 (TRB, 2000) zur Berechnung der mittleren Wartezeit für die Festzeitsteuerung:

$$W = W_I + W_{II} = \frac{R^2}{2C \left(1 - \frac{q}{s}\right)} + \frac{T}{4} \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8x}{sGT}} \right] \quad [\text{s}] \quad (14)$$

Newell (1969) untersuchte eine 2-phasige vollverkehrsabhängige Steuerung und gab eine Formulierung zur Ermittlung der mittleren Wartezeit. Er betrachtete nur den Fall, dass die Freigabezeiten ohne Verlängerung ($G_e=0$) und ohne Restriktionen ($G_{\text{min}}=0$, $G_{\text{max}}=\infty$) geschaltet werden. Sein Ansatz kann auch auf LSA mit beliebig vielen Phasen erweitert werden (vgl. Wu, 2004). Die Wartezeitformel kann dann vereinfacht dargestellt werden in der Form:

$$W_{\text{mittl}} \approx \frac{R_{i,\text{mittl}}^2}{2C_{\text{mittl}} \left(1 - \frac{q_i}{s_i}\right)} \left[1 + \frac{\text{var}(R_{i,\text{mittl}}^*)}{R_{i,\text{mittl}}^2} \right] = \frac{R_{i,\text{mittl}}^2}{2C_{\text{mittl}} \left(1 - \frac{q_i}{s_i}\right)} [1 + K_i] \quad [\text{s}] \quad (15)$$

mit $R_{i,mittl}$ = mittlere Sperrzeit [s]

$$K_i = \frac{\text{var}(R_{i,mittl}^*)}{R_{i,mittl}^2} \quad [-] \quad (16)$$

$$R_{i,mittl}^* = R_{i,mittl} - TZ \quad [s]$$

Für die Phase 1 lautet der Wert von $\text{var}(R_{1,mittl}^*)$:

$$\text{var}(R_{1,mittl}^*) \approx \frac{C_{mittl} \frac{y_2^*}{s_2^*} \left[(1 - y_1)^2 + \frac{y_1 q_2^*}{s_1} \right]}{(1 - y_1 - y_2^*) (1 - y_1 - y_2^* + 2y_1 y_2^*)} \quad [s^2] \quad (17)$$

mit $y_2^* = \sum_{i=2}^n y_i$, $q_2^* = \sum_{i=2}^n q_i$, $s_2^* = \frac{q_2^*}{y_2^*}$

n = Anzahl der betrachteten Phasen

C_{mittl} = mittlere Umlaufzeit (nach Gl. (8))

Da die Gl.(17) nur von der mittleren Umlaufzeit aber nicht von den Grünzeiten abhängig ist, kann sie auch für vollverkehrsabhängige Steuerung mit Grünzeitverlängerung ($G_e > 0$) verwendet werden. Hierfür muss die mittlere Umlaufzeit C_{mittl} nach Gl. (8) berechnet werden.

Die hier errechnete Wartezeit ist die Wartezeit erster Art (uniform delay) W_I , die durch die wechselnde Schaltung zwischen Freigabe und Sperrung verursacht wird. Vergleicht man die Gl.(15) mit der Wartezeitformel für die Festzeitsteuerung (z.B. Gl.(14)), kann man feststellen, dass die Wartezeit erster Art bei vollverkehrsabhängiger Steuerung um den Faktor K größer ist als die bei der Festzeitsteuerung. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass die Freigabe- und die Sperrzeiten bei vollverkehrsabhängiger Steuerung Zufallsgrößen sind und daher eine Varianz größer als null aufweisen. Der Wert von K liegt für normale Verkehrsverhältnisse zwischen 0,05 bis 0,25.

Wenn die Grünzeit frei wählbar ist, ist die Wartezeit zweiter Art (incremental delay) W_{II} immer gleich null, solange keine Überlastung vorliegt. Die Gesamtwartezeit besteht nur aus der Wartezeit erster Art (W nach Gl. (15) mit K nach (16)). Als Vergleich werden diese Wartezeit für die vollverkehrsabhängige Steuerung (Gl. (15)) und die Wartezeit für die Festzeitsteuerung in Abb. 5 zusammen dargestellt (Umlaufzeit jeweils nach RiLSA (FGSV, 1992) und Webster und Cobbe (1966) berechnet, Wartezeit nach Gl.(14)). Dieser Vergleich gilt nur für stationäre Zuflüsse in allen Strömen, d.h.: der Mittelwert der Verkehrsstärke ist

über längere Zeit konstant und er ist kleiner als die Kapazität. In der Abbildung kann man erkennen, dass die mittlere Wartezeit bei der vollverkehrsabhängigen Steuerung deutlich geringer ist als bei der Festzeitsteuerung. Leider trifft diese Aussage nur für den speziellen Fall, dass die Grünzeit uneingeschränkt frei wählbar ($G_{\min}=0$, $G_{\max}=\infty$) ist, zu.

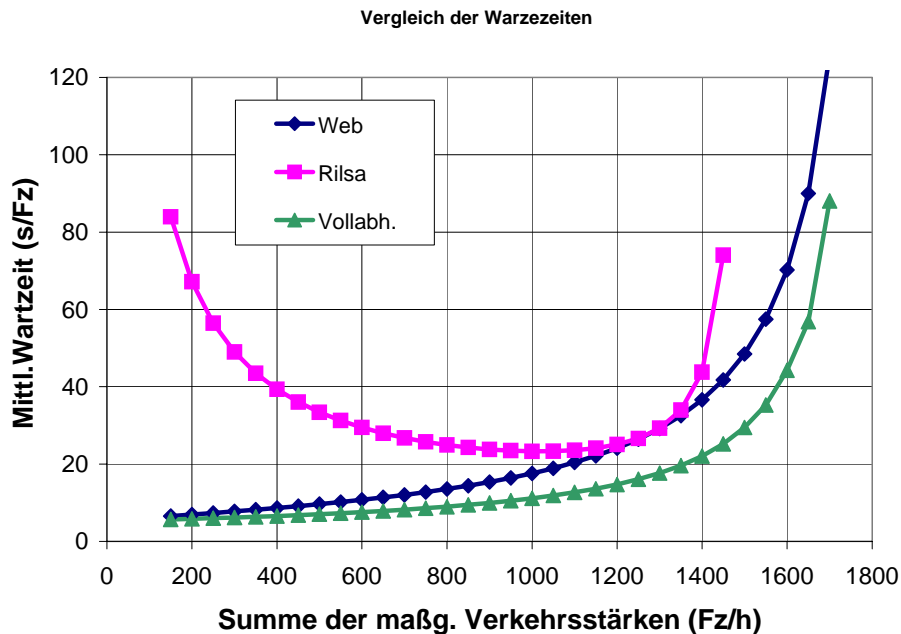


Abb. 5 – Vergleich der Wartezeiten für a) vollverkehrsabhängige Steuerung, b) Festzeitsteuerung mit C nach RiLSA (FGSV,1992) und c) Festzeitsteuerung mit optimalen C nach Webster und Cobbe (1966)

Da auch bei der vollverkehrsabhängigen Steuerung die Mindest- und Maximalgrünzeiten eingehalten werden müssen, entsteht in der Wirklichkeit auch hier die Wartezeit zweiter Art. Hier ist W_{II} aber immer kleiner als bei der Festzeitsteuerung.

Zur Berücksichtigung der Mindest- und Maximalgrünzeit bei der Ermittlung der mittleren Wartezeit haben Li et. al. (1994) eine ausführliche Simulationsuntersuchung unter verschiedenen Verkehrsbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind auch in HCM 2000 (TRB, 2001) integriert. In HCM 2000 wird die mittlere Wartezeit für die vollverkehrsabhängig gesteuerten LSA berechnet nach der Formel:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{mittl}} &= W_{I,\text{mittl}} + W_{II,\text{mittl}} \\
 &\approx \frac{R_{\text{mittl}}^2}{2C_{\text{mittl}} \left(1 - \frac{q}{s}\right)} [1 + K] + \frac{T}{4} \left[(x_{\text{mittl}} - 1) + \sqrt{(x_{\text{mittl}} - 1)^2 + \frac{8kx_{\text{mittl}}}{sG_{\text{mittl}}T}} \right] \quad [\text{s}] \quad (18)
 \end{aligned}$$

mit $x = \text{Auslastungsgrad} = qC/sG$ [-]

$T = \text{Länge der Untersuchungsperiode}$ [s]

$k = \text{Faktor zur Berücksichtigung der Wartezeit zweiter Art (siehe Tabelle 1)}$ [-]

Die Wartezeit zweiter Art wird durch den Faktor k entsprechend angepasst. Der Wert von k ist hierfür eine Funktion der Abbruchzeitlücke ZL und des mittleren Auslastungsgrades $x_{\text{mittl}} = qC_{\text{mittl}}/sG_{\text{mittl}}$. Die Werte des Faktors k sind in Tabelle 1 angegeben. Für die Festzeitsteuerung ist $k=0,5$.

x	$G_e=2$	$G_e=2,5$	$G_e=3$	$G_e=3,5$	$G_e=4$	$G_e=4,5$	$G_e=5$	Festzeit
0,5	0,04	0,08	0,11	0,13	0,15	0,19	0,23	0,5
0,6	0,13	0,16	0,19	0,2	0,22	0,25	0,28	0,5
0,7	0,22	0,25	0,27	0,28	0,29	0,31	0,34	0,5
0,8	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,38	0,39	0,5
0,9	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,45	0,5
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabelle 1 – Abminderungsfaktor k zur Berücksichtigung der Wartezeit zweiter Art in HCM 2000 (TRB, 2000)

Wenn die Mindest- und Maximalgrünzeit berücksichtigt werden, ist der K -Wert kleiner als die mit Gl.(16) errechneten Werte. Im HCM 2000 (TRB, 2000) werden die Werte für K zwischen 0 und 0,08 verwendet. Es ist zu erwarten, dass der K -Wert beim Erreichen der Maximalgrünzeiten am geringsten ist (es geht in die Festzeitsteuerung über). Es ist auch zu erwarten, dass bei zunehmender Auslastung die Maximalgrünzeiten öfter erreicht werden. Daher ist es sinnvoll, K linear zum Auslastungsgrad x zu berechnen. D.h.:

$$K_i = 0,08(1 - x_i) \quad [-] \quad (19)$$

Im Vergleich zur Wartezeitformel von Newell (1969) ist die Formel im HCM 2000 (TRB, 2000) praxisnäher formuliert. Mit dem Auslastungsgrad x kann sie implizit die Mindest- und Maximalgrünzeit berücksichtigen. Demnach kann sie für breitere Verkehrs- und Steuerungsbedingungen verwendet werden. Daher wird hier die Formel des HCM 2000 (TRB, 2000) für die weiteren Betrachtungen verwendet. Für die gleichen Randbedingungen (verwendet in Abb. 5) werden in Abb. 6 die Wartezeit nach HCM 2000 (Gl.(18)) für die vollverkehrsabhängige Steuerung und für die Festzeitsteuerung zusammen dargestellt. Man erkennt hier, dass sich - unter der Bedingung der stationären Zuflüsse - die mittlere Wartezeit einer vollverkehrsabhängigen Steuerung nicht signifikant von der Wartezeit einer Festzeitsteuerung mit Optimalumlaufzeit unterscheidet.

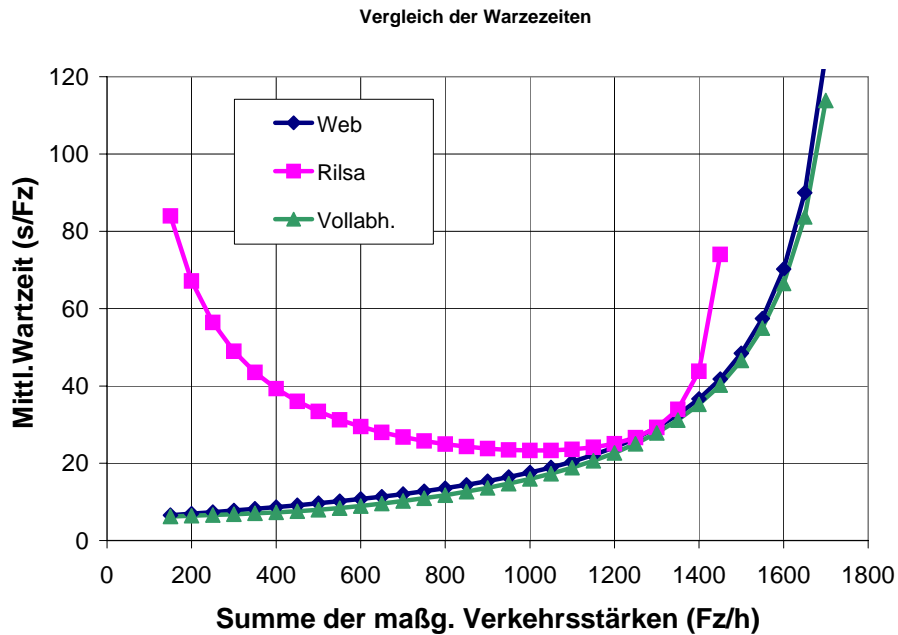


Abb. 6 – Vergleich der Wartezeiten nach HCM 2000 (Gl.(18)) für a) vollverkehrsabhängige Steuerung (C nach (8)), b) Festzeitsteuerung mit C nach RiLSA (Gl.(12)) und c) Festzeitsteuerung mit optimalen C nach Webster und Cobbe (Gl.(11))

Im Vergleich zur Festzeitsteuerung mit einer wartezeitoptimalen Umlaufzeit ist es bei der vollverkehrsabhängigen Steuerung die Wartezeit erster Art größer und die Wartezeit zweiter Art kleiner. Die Summe der Unterschiede ist jedoch nicht signifikant.

Dies bedeutet aber nicht, dass die vollverkehrsabhängige Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung keine Vorteile aufweist. Für die Optimierung eines festzeitgesteuerten Signalzeitenplans setzten sich die genauen Kenntnisse über die Verkehrsstärke in den Zuflüssen voraus. Hierfür ist eine Kurzzeitprognose über die Zuflüsse notwendig, die die Wirklichkeit zwar annähernd beschreibt aber nie vollständig vorhersagen kann. Die dadurch entstandene Abweichung in der Ermittlung der Optimalumlaufzeit führt zwangsläufig zur Zunahme der Wartezeit. Dagegen stellt sich bei der vollverkehrsabhängigen Steuerung die mittlere Umlaufzeit anhand der online gemessenen Verkehrsstärken oder Zeitlücken ein, die immer für die aktuelle Situation optimal ist.

Deshalb steht der Hauptvorteil der vollverkehrsabhängigen Steuerung darin, dass die Umlauf- und Grünzeit an die Ganglinie der Verkehrsstärke anpassen werden können. Dies ist von größerer Bedeutung, wenn die Verkehrsstärke innerhalb der Spitzenperiode variiert. In Abb. 7

ist ein Rechenbeispiel zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen den Umlaufzeiten dargestellt.

Als Beispiel wird wiederum die 2-phasige Steuerung in Abb. 1 und eine Spitzenperiode mit einer durchschnittlichen maßgebenden Gesamtverkehrstärke von 1200 Fz/h betrachtet. Die Ganglinie der Gesamtverkehrstärke ist in Abb. 7 (rechte y-Achse) dargestellt. Für die Festzeitsteuerung ist die erforderliche Umlaufzeit nach RiLSA (Gl.(12)) 50s, die Optimalumlaufzeit nach Webster und Cobbe (Gl.(11)) 60s. Diese Umlaufzeiten gelten für die ganze Spitzenperiode bei der Festzeitsteuerung. Die mittlere Umlaufzeit, die sich durch das Zeitlückenverfahren einstellt (Gl.(8)), liegt zwischen 35s und 81s. Die Ganglinien dieser Umlaufzeiten sind ebenfalls in Abb. 7 dargestellt (linke y-Achse).

Die Ganglinien der mittleren Wartezeiten für das Rechenbeispiel sind in Abb. 8 dargestellt (linke y-Achse). Man kann erkennen, dass die vollverkehrsabhängige Steuerung durch die angepasste Umlauf- und Grünzeit deutlich niedrigere Wartezeit liefert als die Festzeitsteuerung.

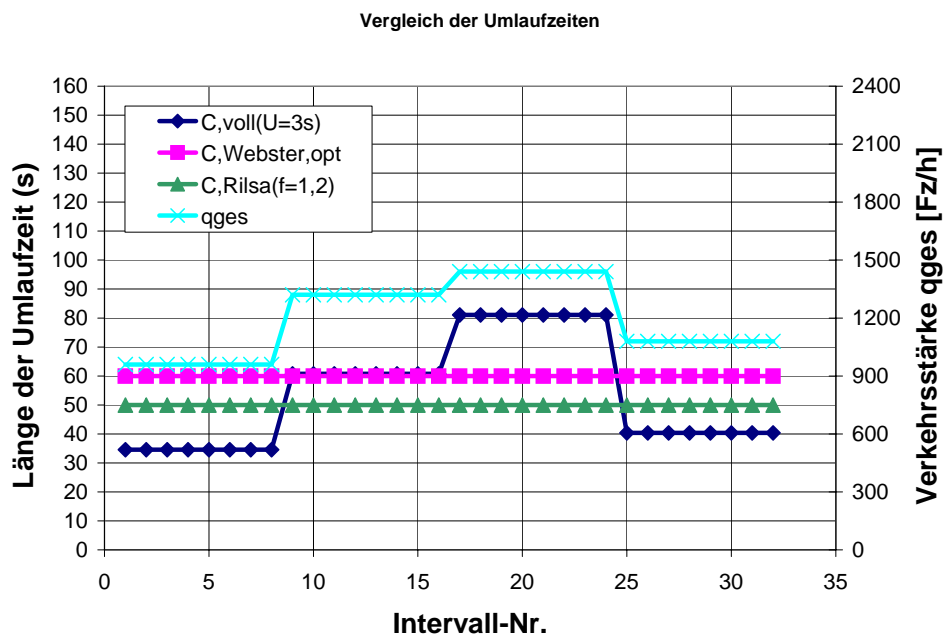


Abb. 7 – Beispiel: Ganglinie der Verkehrsstärke und der Umlaufzeit für a) vollverkehrsabhängige Steuerung (C nach (8)), b) Festzeitsteuerung mit C nach RiLSA (Gl.(12)) und c) Festzeitsteuerung mit optimaler C nach Webster und Cobbe (Gl.(11))

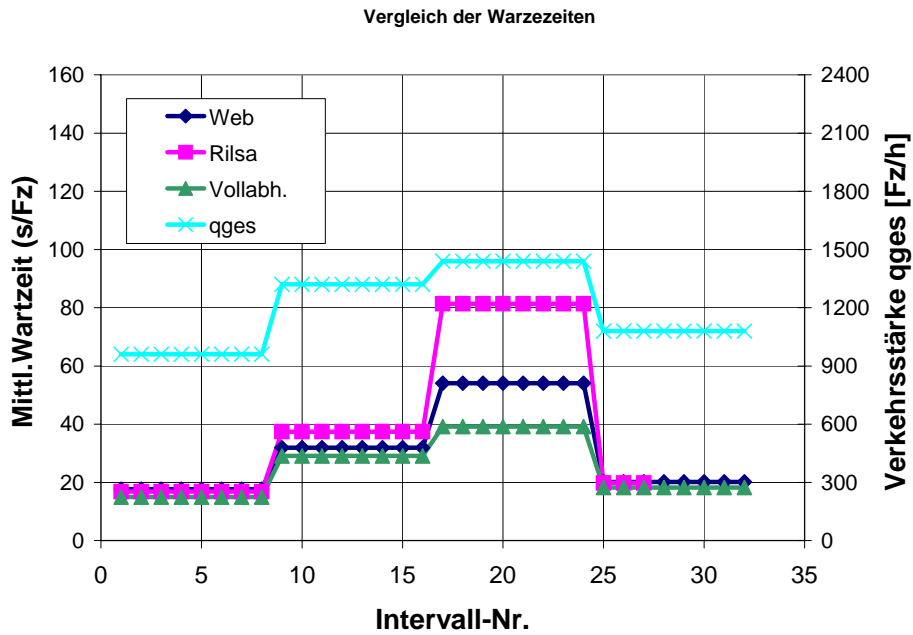


Abb. 8 – Beispiel: Ganglinie der Verkehrsstärke und der mittleren Wartezeiten für a) vollverkehrsabhängige Steuerung (C nach (8)), b) Festzeitsteuerung mit C nach RiLSA (Gl.(12)) und c) Festzeitsteuerung mit optimaler C nach Webster und Cobbe (Gl.(11))

4 Bewertung der LSA mit Freigabezeitenanpassung

Das im vorherigen Absatz dargestellte Verfahren ist nur für LSA mit variierbarer Umlaufzeit anwendbar.

Wenn die Umlaufzeit durch ein übergeordnetes Netz bestimmt ist und nur die Grünzeiten der einzelnen Phasen durch verkehrabhängige Steuerung angepasst werden, spricht man von Freigabezeitenanpassung. Durch die Freigabezeitenanpassung können die Freigabezeiten zwischen den maßgebenden Phasen besser balanciert werden. Für die Freigabezeitenanpassung muss das Verfahren entsprechend angepasst werden.

Bei vorgegebener Festumlaufzeit C_{fest} lautet die erforderliche Grünzeit für eine Signalgruppe i :

$$G_i = y_i C_{fest} + (1 - y_i) G_{e,i} \quad [s] \quad (20)$$

Dann ist das Verhältnis zwischen zwei Grünzeiten:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{y_1 C_{fest} + (1 - y_1) G_{e,1}}{y_2 C_{fest} + (1 - y_2) G_{e,2}} = \frac{y_1 (C_{fest} - G_{e,1}) + G_{e,1}}{y_2 (C_{fest} - G_{e,1}) + G_{e,2}} \quad [-] \quad (21)$$

Die beiden Gleichungen sind nur dann sinnvoll, wenn die vorgegebenen Umlaufzeit C_{fest} größer als die mittlere Umlaufzeit nach Gl. (8) ist. In diesem Fall gilt immer:

$$\sum G_i + \sum tz_i \leq C_{fest} \quad (22)$$

Dabei wird die erforderliche Kapazität zwar gewährleistet, die Freigabezeit wird aber nicht voll ausgenutzt. Eine Restzeit der Länge

$$\Delta C = C_{fest} - \left(\sum G_i + \sum tz_i \right) \quad [s] \quad (23)$$

bleibt unbenutzt. Es stellt sich jetzt die Frage: wie wird diese restliche Zeit verteilt? Nach der Zeitlückenmethode kann es nicht eindeutig ermittelt werden. Sie garantiert nur, dass jede Phase die erforderliche Grünzeit zur Abwicklung der Verkehrsstärke erhält. Wenn die gesamte Restzeit ΔC einer bestimmten Phase j gegeben wird, lassen sich die mittleren Grünzeiten mit der Formel

$$G_i = y_i C_{fest} + (1 - y_i) G_{e,i} \quad \text{mit } G_{min} \leq G_i \leq G_{max} \quad [s] \quad (24)$$

$$G_j = C_{fest} - TZ - \sum_{i \neq j} G_i \quad [s] \quad (25)$$

bestimmen. Normalerweise ist j die Phase mit der größten maßgebenden Verkehrsstärke. Um extrem unbalancierte Wartezeiten zwischen den maßgebenden Signalgruppen zu vermeiden, sollen im Fall der Überlastung die Maximalgrünzeiten proportional zu den Verkehrsstärken definiert werden. Es kann auch sinnvoll sein, dass im Fall der Überlastung (oder bei einer koordinierten Hauptstraße) die Hauptphase die erforderliche Grünzeit erhält und die Nebenphase nur die Zeit bekommt, die noch zur Verfügung steht. In diesem Fall ist j die Phase für die Nebenstraße. Für eine 2-phasige Steuerung wird in der Regel bei Unterbelastung die Nebenphase nach dem Zeitlückenverfahren gesteuert, die Hauptphase bekommt alle restliche Zeit zur Verfügung (mit Berücksichtigung aller einzuhaltenden Mindest- und Maximalgrünzeiten). In Abb. 9 werden die Gesamtverkehrsstärke und deren Vereinteilung angegeben, die als ein Beispiel für eine 2-phasige Steuerung dient. Um die Anpassungsfähigkeit der Zeitlückenmethode zu demonstrieren wird die Verteilung der Verkehrsstärke der beiden Phasen zufällig variiert mit einem mittleren Verhältnis von 40% zu 60%. Eine feste Umlaufzeit der Länge von 90s ist vorgegeben. In Abb. 10 sind die errechneten Grünzeiten nach RiLSA (FGSV, 1992, 2003) und nach Gl. (24) und (25) dargestellt. Nach RiLSA werden die Grünzeiten proportional zum mittleren Verhältnis der

Verkehrsstärken berechnet. Sie sind demnach über die ganze Spitzenperiode gleich. Die Schwankung der Verkehrsstärken kann dabei nicht berücksichtigt werden. Die Grünzeiten nach der Zeitlückenverfahren (Gl. (24) und (25)) variieren dagegen mit den Verkehrsstärken. In Abb. 11 sind die mittleren Wartezeiten des Rechenbeispiels dargestellt. Man kann erkennen, dass bei starker Verkehrsbelastung die Wartezeit nach der Zeitlückenmethode deutlich geringer sind als die nach RiLSA, da die Anpassung der Verkehrsstärken die zeitweise einseitige Überlastung vermeidet.

Auch hier kann die Wartezeit mit Gl.(18) geschätzt werden.

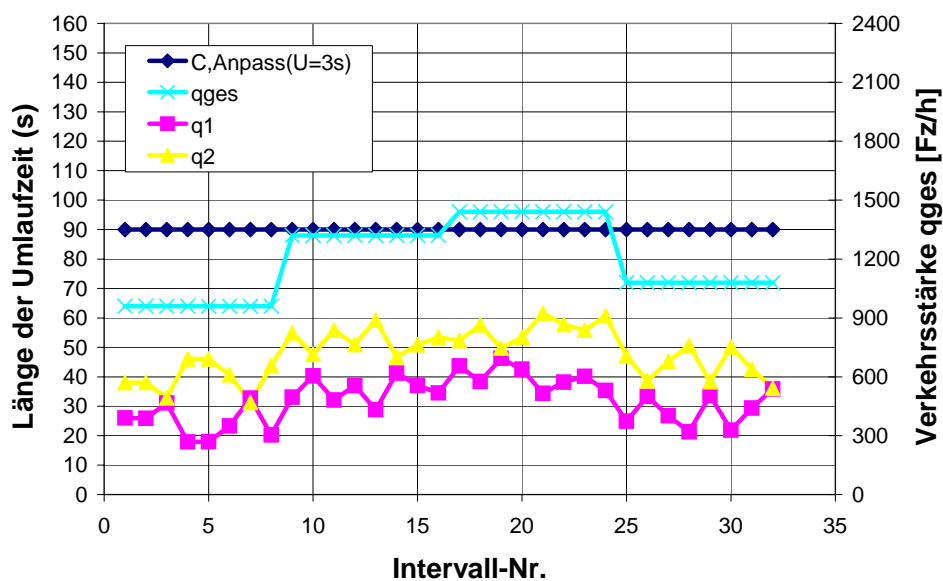


Abb. 9 – Beispiel: Ganglinie der Verkehrsstärke und der vorgegebenen Umlaufzeit (C=90s)

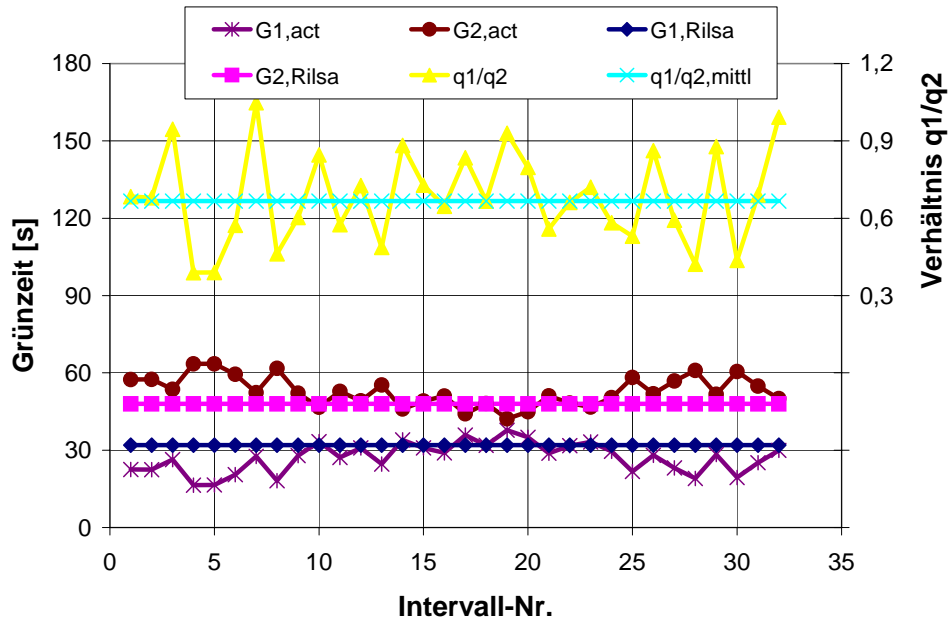


Abb. 10 – Beispiel: Verteilung der Verkehrstärke und der Grünzeiten bei einer vorgegebenen Umlaufzeit ($C=90s$)

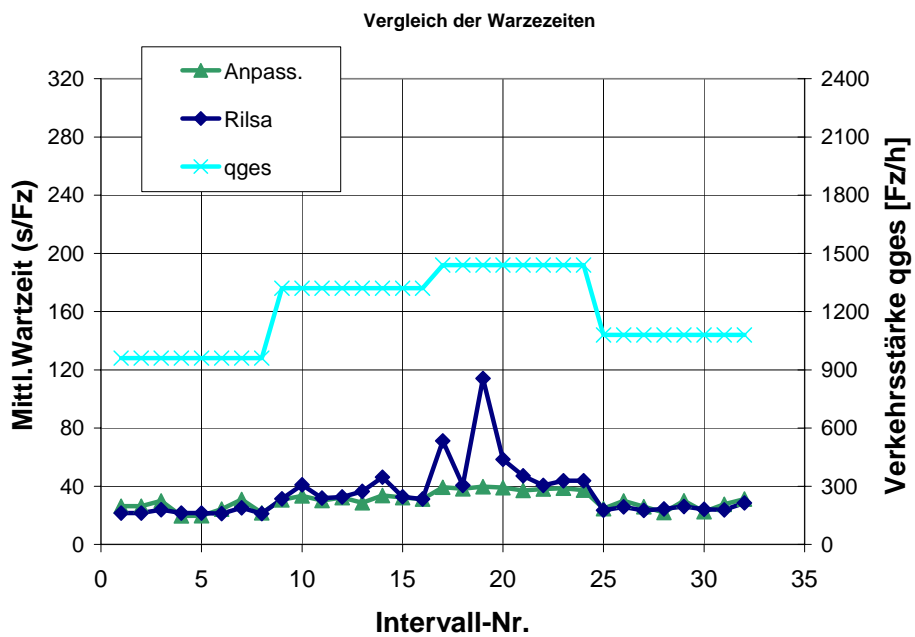


Abb. 11 – Beispiel: Ganglinie der mittleren Wartezeiten für a) verkehrabhängige Steuerung (Freigabezeitenanpassung) und b) Grünzeitenverteilung nach RiLSA und Ganglinie der zugehörigen Verkehrstärke (vorgegebene Umlaufzeit $C=90s$)

5 Zusammenfassung

Es wurden mehrere Modelle zur Berechnung von verkehrsunabhängigen, zeitlückengesteuerten LSA vorgestellt und erweitert. Die Evaluierung dieser Modelle zeigte, dass der Hauptvorteil einer verkehrsunabhängigen Steuerung auf der Anpassung der Grünzeiten an die Ganglinie der Verkehrsstärken beruht. Die Abfilterung der stochastischen Schwankungen der Verkehrsstärken spielt hier nur eine untergeordnete Rolle.

Für stationäre Zuflüsse erzeugt die vollverkehrsunabhängige Steuerung eine quasi-wartezeitoptimale Umlaufzeit. Im Fall der stationären Zuflüsse ist die mittlere Wartezeit bei einer vollverkehrsunabhängigen Steuerung kaum von der mittleren Wartezeit einer wartezeitoptimalen Festzeitsteuerung zu unterscheiden. Im Einzelnen kann hierfür festgestellt werden, dass bei einer vollverkehrsunabhängigen Steuerung die Wartezeit erster Art – im Vergleich zur wartezeitoptimalen Festzeitsteuerung – zunimmt und die Wartezeit zweiter Art abnimmt. Der Unterschied zwischen den Summen beider Wartezeitenarten ist gering.

Nach den dargestellten Kenntnissen kann ein vereinfachtes einschlägiges Verfahren für das zukünftige HBS vorgeschlagen werden. Mit diesem Verfahren kann die vollverkehrsunabhängige Steuerung und die Freigabeanpassung nach der Zeitlückenmethode bewertet werden. Im Vergleich zum Bewertungsverfahren für Festzeitsteuerung besteht der Unterschied nur darin, dass die mittleren Grün- und Umlaufzeiten bei der verkehrsunabhängigen Steuerung geschätzt (Gl. (8), (10) oder Gl. (13) oder Gl. (24), (25)) werden. Die zu erwartenden mittleren Wartezeiten der einzelnen Signalgruppen werden entsprechend mit den geschätzten Grün- und Umlaufzeiten berechnet (z.B. mit Gl.(18)). Bei der Berechnung müssen der Dauerschaltkreis, die Abbruchzeitlücken und die Restriktionen der Grünzeiten vorgegeben werden.

Das Verfahren gilt nur für folgende Randbedingungen:

- Allein stehende isolierte Knotenpunkte
- Die bedingt verträglichen Links- und Rechtsabbieger sind ausreichend leistungsfähig. Die Länge der Aufstellspuren ist ausreichend lang, um alle auftretenden Staus aufzunehmen. D.h.: eine Blockierung des Gradeausstroms ist nicht zu erwarten.
- Konstante Abbruchzeitlücke (unabhängig von der Länge der Grünzeit)
- Keine Phasentausch, keine Aufforderung von besonderen Phasen (z.B. ÖPNV-Phasen)
- Keine Berücksichtigung der Fußgängersignale

Allerdings kann das Verfahren ohne zu großen Aufwand erweitert werden, um die o.g. Randbedingungen zu berücksichtigen.

Dieses Verfahren stellt ein Konzept dar, das als Ergänzung zum HBS (vgl. FGSV, 2001) verwendet werden kann. Ein Praxistest ist wünschenswert. Dabei sind vor allem Restriktionen für die Anwendbarkeit zu ermitteln.

6 Literaturangaben

- Akcelik, R. (1994).** Estimation of Green Times and Cycle Time for Vehicle-Actuated Signals. *Transportation Research Record*, No.1457. TRB. National Academy Press, Washington, D.C.
- Cowan, R. (1978).** An Improved Model for Signalized Intersection with Vehicle-Actuated Control. *Journal of Applied Probability*. 15, pp.384-396.
- FGSV (2001).** *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 299, FGSV Verlag GmbH, Köln.
- FGSV (1992).** *Richtlinien für Lichtsignalanlagen - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr (RiLSA)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 321. Köln.
- FGSV (2003).** *Richtlinien für Lichtsignalanlagen - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr (RiLSA)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 321. Köln. Berichtigter Nachdruck 2003.
- Li, J.; Rouphail, N.M.; Akcelik, R. (1994).** Overflow Delay Estimation for a Simple Intersection with Fully Actuated Signal Control. *Transportation Research Record*, No.1457. TRB. National Academy Press, Washington, D.C.
- Lin, F.B. (1982).** Estimation of average Phase durations for Full-Actuated Signals. *Transportation Research Record*, No.881. TRB. National Academy Press, Washington, D.C.
- Newell, G.F.; Osuna, E.E. (1969).** Properties of Vehicle Actuated Signal: II. Two-Way Streets. *Transportation Science*, 3, pp.99-125. INFORMS, Linthicum, MD.
- Newell, G.F. (1969).** Properties of Vehicle Actuated Signal: I. One-Way Streets. *Transportation Science*, 3, pp.30-52. INFORMS, Linthicum, MD.

Ornl (1996). *Transportation Flow Theory* (1996). Oak Ridge National Laboratory, U.S.
Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Stauton, M.M. (1976). Vehicle-Actuated *Signal* Controls for Isolated Locations. *An Foras Forbartha*, Dublin, Ireland.

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

Webster, F.V.; Cobbe, B.M. (1966). Traffic Signals. *Road Research Technical Paper*, No.56
Her Majesty's Stationery Office, London, England.

Wu, N.: (2004). Evaluierung und Erweiterung von Verfahren zur Bewertung von verkehrsabhängigen, zeitlückengesteuerten Lichtsignalanlagen, Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen Nr. 27, Ruhr-Universität Bochum.