Schätzverfahren für den Verkehrszustand an LSA unter Verwendung von Detektoren an der Haltelinie oder haltlinienaher Detektoren in Verbindung mit der Warteschlangentheorie

(Working Paper)

Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Nr.30, Teil B.
Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2005.

Ning Wu[1]

1 Abstract

Basiert auf der Warteschlangentheorie werden die Möglichkeiten zum Schätzen der Verkehrszustände an Lichtsignalanlage (LSA) dargestellt. Dabei werden ausschließlich Messwerte aus Detektoren an der Haltlinie oder aus haltlinienahen Detektoren verwendet, die in der Praxis meistens bereits zur Verfügung stehen.

Im Gegensatz zum TRANSVER - Verfahren (Mück, 2001) werden hier von den Eigenschaften des Warteschlangensystems an LSA Gebrauch gemacht, damit die Korrelationen zwischen den gemessenen und geschätzten Parametern genauer berücksichtigt werden. Der Ansatz weist folgende Besonderheiten auf: a) Anwendbar sowohl für Detektoren an der Haltlinie als auch für haltlinienahe Detektoren; b) Berücksichtigung der Nichtlinearität des Warteschlangensystems; c) Berücksichtigung der Einflüsse der Koordinierung, der Ein- und Abbiegeströmen und der Störung auf Streckenabschnitten und d) vielfältige Möglichkeiten zur Kalibrierung von Parametern.

Der Ansatz kann ohne großen Aufwand in die vorhandenen Anlagen integriert und online kalibriert werden.

---

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

2 Einleitung

2.1 Eigenschaften des Warteschlangensystems an LSA

Um die Verkehrszustände schätzen zu können, müssen die bewertungsrelevanten Parameter des zugehörigen Warteschlangensystems durch messbare Daten ermittelt werden. Zur Bewertung der Kapazität und Qualität der Verkehrsanlagen werden überwiegend Wartezeiten und Rückstaulängen verwendet.

Bei Lichtsignalanlagen sind die Rückstaulängen am Ende der Sperrzeit (Rotende) für die Dimensionierung der Fahrstreifen von maßgebender Bedeutung. Die mittlere Wartezeit und Rückstaulänge widerspiegeln die Kapazität der Lichtsignalanlage. Auch die Rückstaulängen am Stauende (Rückstaulängen an Zeitpunkten, wo der Stau vor der Haltelinie vollständig abgebaut wird, gemessen von der Haltelinie bis zum Ende des Rückstaus) müssen in Betracht gezogen werden. Rückstaulängen am Grünende sind für die LSA nicht maßgebend, sie liegen aber der Berechnung der Wartezeit und der Rückstaulängen am Rot- und Stauende zugrunde.

Die Wartezeiten und Rückstaulängen sind i. A. durch die Stärke des Zu- und Abflusses und durch die stochastischen Eigenschaften des Warteschlangensystems bestimmt. Die Eigenschaften des Warteschlangensystems werden in der Regel durch ein geeignete Modell und seine Modellparameter beschrieben.

Die mittlere Wartezeit und Rückstaulänge können i. A. - gleichgültig ob am Rot- oder Grünende - nach den Warteschlangenmodellen ermittelt werden. Wu (1996) hat eine Reihe von theoretisch-empirischen Funktionen angegeben, mit denen die mittlere Wartezeit und Rückstaulänge am Grün-, Rot- und Stauende unter stationärem und instationärem Verkehr dargestellt werden können. Dort wurden auch die zugehörige 95%- und 99%-Rückstaulänge angegeben. Für weitere Betrachtungen werden hier nur Ansätze für stationären Verkehr angewandet, weil beim vorhandenen Messverfahren nur geglätteten Messwerte als Eingangsparameter verwendet werden und Überlastungen mit Detektoren an der Haltlinie und bei haltlinienahen Detektoren nicht messbar sind. Es wird angenommen, dass sich die Verkehrsbedingungen vor, während und nach dem Betrachtungszeitraum unverändert bleiben. Da die Schätzung nur in einer Zeitperiode von wenigen Umlaufzeiten erfolgt, ist diese Annahme unproblematisch.

Die mittlere Rückstaulänge am Rotende N_{RE} und am Stauende N_{SE} unter stationärem Verkehr können i. A. als Funktionen von der mittleren Rückstaulänge am Grünende N_{GE}, der Verkehrsstärke q, der Umlaufzeit C und der Grünzeit G aufgefasst werden. Als Alternative kann anstatt der Rückstaulänge am Grünende N_{GE} die so genannte Überlastungswahrscheinlichkeit $P_{ü}$ für den Reststau am Grünende verwendet werden. Zwischen N_{GE} und $P_{ü}$ besteht eine eindeutige, funktionale Beziehung.

Nach dem Warteschlangenmodell für LSA können beiden Parameter $P_{ü}$ und N_{GE} als Funktionen vom Auslastungsgrad x und von der Kapazität pro Umlauf $m = sG$, mit s = Sättigungsverkehrsstärke, ausgedrückt werden. D.h., $P_{ü} = f(x, m)$ und $N_{GE} = f(x, m)$. Die Funktionen $P_{ü} = f(x, m)$ und $N_{GE} = f(x, m)$ sind vielfach in der Literatur angegeben. Laut Miller (1978) gelten folgende Gleichengen:

$$P_{ü} = \exp\left(-A\sqrt{m}\,\frac{1-x}{x}\right) \quad [s] \qquad (1)$$

$$N_{GE} = \frac{\exp\left(-B\sqrt{m}\,\frac{1-x}{x}\right)}{2(1-x)} \quad [s] \qquad (2)$$

mit m = sG = Kapazität eines Umlaufs [Fz]

s = Sättigungsverkehrsstärke der Signalgruppe [Fz/s]

G = Grünzeit [s]

x = Auslastungsgrad = q/s = n/m [-]

n = qC = Verkehrsmenge eines Umlaufs

q = Verkehrsstärke der Signalgruppe [Fz/s]

A, B = Modellparameter, für eine Festzeitsteuerung ist A = 1,58 und B = 1,33 = 0,84*A

Hierfür können wir können auch andere Regressionsformeln verwenden. Z.B. (vgl. Wu, 1990, 1996):

$$P_{ü} = x^{a\sqrt{m}} = x^{1/k} \quad \text{mit } k = \frac{1}{a\sqrt{m}} \quad [s] \qquad (3)$$

$$N_{GE} = \frac{x^{b\sqrt{m}}}{2(1-x)} = \frac{x^{0,8a\sqrt{m}}}{2(1-x)} \qquad [s] \qquad (4)$$

mit a, b = Modellparameter, für eine Festzeitsteuerung ist a = 1,77 und b = 1,42
=0,8*a

Für die Festzeitsteuerung liefern die beiden Sätze Formeln fast identische Werte (vgl. Wu, 1990). Die Gleichung (3) und (4) sind im Aufbau einfacher. Sie werden deswegen für weitere Herleitung verwendet.

Der Parameter k stellt die stochastische Eigenschaft des Warteschlangensystems dar. Er wird beeinflusst von den benachbarten LSA, den ein- und abbiegenden Verkehrsflüssen und der Störung auf den Streckenabschnitten. Der Wert von k muss daher online mit gemessenen Daten kalibriert werden. Zur Berücksichtigung der Koordinierung kann noch ein zusätzlicher Faktor F_P verwendet werden (vgl. HCM, 2000). Für unkoordinierte Knotenpunkte ist F_P = 1.

Zusammengefasst lauten die Formeln zur Berechnung der mittleren Rückstaulängen am Grün-, Rot- und Stauende wie folgt (vgl. auch Wu, 1996):

$$N_{GE} = \frac{x^{0,8/k}}{2(1-x)} \qquad [Fz] \qquad (5)$$

$$N_{RE} = N_{GE} + q \cdot (C-G)F_P = \frac{x^{0,8/k}}{2(1-x)} + q \cdot (C-G)F_P \qquad [Fz] \qquad (6)$$

$$N_{SE} = N_{GE} + \frac{q \cdot (C-G)}{1-\frac{G}{C}x} F_P = \frac{x^{0,8/k}}{2(1-x)} + \frac{q \cdot (C-G)}{1-\frac{G}{C}x} F_P \qquad [Fz] \qquad (7)$$

Die Überlastungswahrscheinlichkeit $P_{ü}$ und die mittlere Wartezeit w lauten entsprechend:

$$w = \frac{N_{GE}}{q} + \frac{C\left(1-\frac{G}{C}\right)^2}{2\left(1-\frac{G}{C}x\right)} F_P = \frac{x^{0,8/k}}{2q(1-x)} + \frac{C\left(1-\frac{G}{C}\right)^2}{2q\left(1-\frac{G}{C}x\right)} F_P \qquad [s] \qquad (8)$$

$$P_{ü} = x^{1/k} \qquad [-] \qquad (9)$$

Alle oben aufgeführten Formeln sind Funktionen von nur 4 Parametern: Auslastungsgrad x, Verkehrsstärke q so wie die Modellparameter k und F_P.

Die Aufgabe eines Schätzverfahrens besteht jetzt nur darin, durch direkt Messbare Daten (x, q, $P_ü$, N_{GE} N_{SE} etc.) die Modellparameter k und F_P zu kalibrieren.

Weil die Parameter $P_ü$ und N_{GE} bei der Herleitung des Schätzverfahrens eine wichtige Rolle spielen werden, wollen wir ihnen im Folgenden mehr Aufmerksamkeiten widmen. Zur Anschauung des Verlaufs von $P_ü = f(x, m)$ und $N_{GE} = f(x, m)$ sind die Ergebnisse nach Gleichung (3) und (4) in Abb. 1 dargestellt.

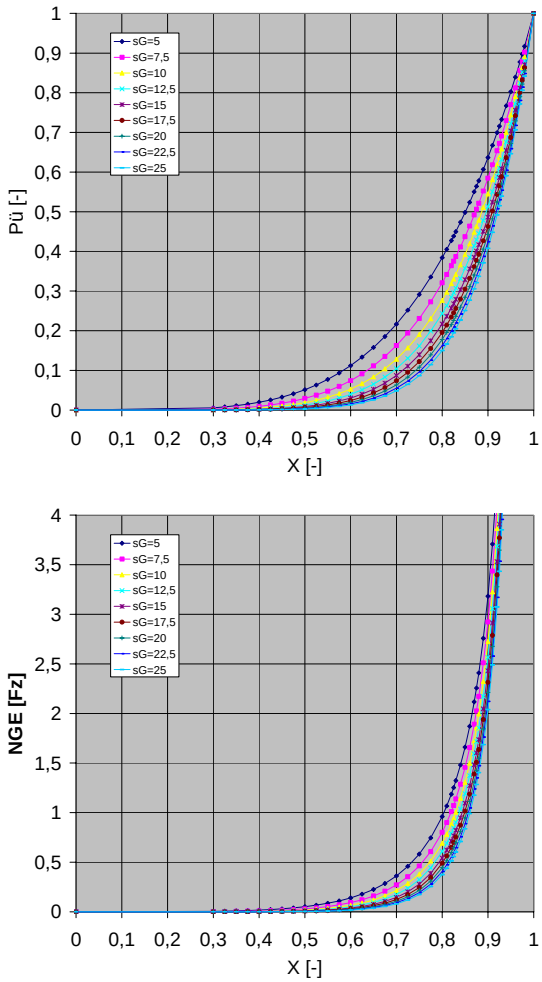

Abb. 1 – Verlauf der Parameter $P_ü = f(x, m)$ und $N_{GE} = f(x, m)$ nach Gleichung (3) und (4) für die Festzeitsteuerung

2.2 Messbare Daten

Je nachdem ob Detektoren an der Haltlinie oder haltlinienahe Detektoren verwendet werden, sind unterschiedliche Daten direkt messbar.

Mit Detektoren an der Haltlinie lassen sich die Parameter

- Auslastungsgrad x
- Verkehrsstärke q (eingeschränkt für $x \leq 1$)
- Überlastungswahrscheinlichkeit $P_{ü}$ für den Reststau
- (Sättigungsverkehrstärke s)

direkt messen.

Mit haltlinienahen Detektoren lassen sich die Parameter

- Füllzeit dt des Zwischenraums bis zur Haltelinie (vgl. Mück, 2000)
- Verkehrsstärke q (eingeschränkt für $x \leq 1$)

direkt und die Parameter

- Überlastungswahrscheinlichkeit $P_{ü}$ für den Reststau (aus dt)
- Reststau am Grünende N_{GE} (aus dt)

indirekt messen.

Für beide Typen von Detektoren werden im Folgenden Schätzverfahren formuliert.

3 Entwickelung der Verfahren in Verbindung mit der Warteschlangentheorie

In Verbindung mit Warteschlangenmodellen können die Rückstaulängen (damit auch die Wartezeit) genauer geschätzt werden. Dabei muss das Verfahren nicht zwingend kompliziert sein. Auch eine online Kalibrierung ist möglich.

3.1 Schätzung der Verkehrszuständen mit Detektoren an der Haltlinie

An der Haltlinie kann der Auslastungsrad x leicht gemessen werden. Dies kann durch Messung der Belegzeit B an der Haltelinie direkt ermittelt werden. Es besteht in der Regel

eine eindeutige, funktionale Beziehung zwischen der Belegzeit B und dem Auslastungsgrad x ($x = f(B)$). Diese funktionale Beziehung lautet

$$x = \frac{qC}{sG} = \frac{B}{G} \quad \text{mit} \quad B = \frac{qC}{s} = mt_B \qquad [-] \qquad (10)$$

Dabei wird die Belegzeit wie folgt ermittelt:

$$B = t_{ra} + \frac{l_{Fz}}{v} = \left(t_{ra} - \frac{l_D}{v}\right) + \left(\frac{l_{Fz} + l_D}{v}\right) = t_{ra} - \frac{l_D}{v} + B^* \qquad [s] \qquad (11)$$

mit

t_{ra} = Nettozeitlücke (=1,2 – 1,4 s)

B^* = Belegzeit des Detektor

$$= \left(\frac{l_{Fz} + l_D}{v}\right)$$

l_{Fz} = Länge des Fahrzeuges

l_D = Länge des Detektors

v = mittlere Geschwindigkeit des Fahrzeuges

Da die Länge des Detektors an LSA in der Regel sehr kurz ist, kann man sie vernachlässigen. Man erhält die Belegzeit demnach:

$$B \approx t_{ra} + B^* \qquad [s] \qquad (12)$$

Die Auswirkung des Schwerverkehrsanteils, des Anfahrvorgangs und der eventuellen Störung wird in der Belegzeit mit l_{Fz} und v implizit berücksichtigt.

Die Anwesenheit des Reststaus am Grünende kann ebenfalls durch Detektoren an der Haltlinie ermittelt werden. Wenn die Zeitlücke t des ersten Fahrzeugs am Anfang der Sperrzeit größer ist als den Zeitbedarfswert t_B, ist kein Reststau an der Haltelinie. Ansonst ist ein Reststau vorhanden. Auf diese Weise kann durch wiederholte Beobachtungen die Wahrscheinlichkeit des Reststaus $P_ü$ ermittelt werden. Da sowohl x als auch $P_ü$ Zufallsgröße sind, sollen im Schätzverfahren x und $P_ü$ sinnvoll geglättet werden, damit zufällige Schwankungen der Messwerte abgefiltert werden können.

Aus den gemessenen *x*- und $P_{ü}$-Werten lässt sich der Parameter *k* in Gleichung (3) dann wie folgt kalibrieren:

$$k = \frac{1}{a\sqrt{m}} = \frac{\ln x}{\ln P_{ü}} = \frac{\ln\left(\frac{B}{G}\right)}{\ln P_{ü}} \quad [s] \qquad (13)$$

Setzt man *k* und *x* in Gleichung (4) ein, erhält man

$$N_{GE} = \frac{P_{ü}^{\left(\frac{b}{a}\right)}}{2\left(1-P_{ü}^{\,k}\right)} = \frac{P_{ü}^{\,0,8}}{2\left(1-P_{ü}^{\,k}\right)} \quad [s] \qquad (14)$$

Man geht hier davon aus, dass das Verhältnis *b/a = const.* = 0,8 auch bei variablen Grün- und Umlaufzeiten konstant bleibt. Dies ist eine vernünftige Annahme. Hier wird angenommen, dass die Varianz des Zu- und Abflusses die Wahrscheinlichkeit des Reststaus $P_{ü}$ und damit auch die Restrückstaulänge am Grünende N_{GE} gleichermaßen beeinflusst.

Da die Werte der Verkehrsstärke *q* und der Belegzeit *B* ebenfalls messbar sind, erhält man die Sättigungsverkehrsstärke

$$s = \frac{qC}{xG} \text{ oder } s = \frac{qC}{B} \quad [s] \qquad (15)$$

Dadurch können alle Parameter zur Beschreibung des Warteschlangensystems an LSA durch Messungen an Detektoren an Haltlinie geschätzt werden.

Die mittlere Wartezeit *w* und die maximale Staulänge am Stauende N_{SE} ergebt dann aus den Gl. (8) und (7):

$$w = \frac{N_{GE}}{q} + \frac{C\left(1-\frac{G}{C}\right)^2}{2\left(1-\frac{G}{C}x\right)}F_P = \frac{P_{ü}^{\,0,8}}{2q\left(1-P_{ü}^{\,k}\right)} + \frac{C\left(1-\frac{G}{C}\right)^2}{2q\left(1-\frac{G}{C}P_{ü}^{\,k}\right)}F_P \quad [s] \qquad (16)$$

$$N_{SE} = N_{GE} + \frac{(C-G)q}{\left(1-\frac{G}{C}x\right)}F_P = \frac{P_{ü}^{\,0,8}}{2\left(1-P_{ü}^{\,k}\right)} + \frac{(C-G)q}{\left(1-\frac{G}{C}P_{ü}^{\,k}\right)}F_P \quad [s] \qquad (17)$$

Hier ist F_P ein Parameter zur Berücksichtigung der Koordinierung (siehe HCM 2000). Für unkoordinierte Knotenpunkte ist F_P=1. Wenn die Werte von N_{SE} ebenfalls gemessen werden können, kann F_P aus (17) kalibriert werden:

$$F_P = \frac{\left[N_{SE} - \frac{P_{\ddot{u}}^{0,8}}{2\left(1-P_{\ddot{u}}^{k}\right)}\right]\left(1-\frac{G}{C}P_{\ddot{u}}^{k}\right)}{(C-G)q} \quad [\text{s}] \qquad (18)$$

3.2 Schätzung der Verkehrszustände mit haltlinienahen Detektoren

3.2.1 Erläuterung des Verfahrens von TRANSVER

TRANSVER hat (Mück, 2001) ein Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren vorgestellt und patentiert. Die Kernidee dieses Verfahrens wird im Folgenden vereinfacht dargestellt.

Es werden zwei Größen für die Beurteilung der Verkehrsqualität verwendet:

- Die Füllzeit *dt*, die vom Grünende eines Signals bis zur Dauerbelegung eines Detektors verstreicht.
- Die Belegzeit eines Detektors während der Freigabe des zugehörigen Signals.

Es wird zuerst eine Referenzdauer dt_0 für die Füllzeit definiert. Man kann das Ereignis „Unterschreiten der Referenzdauer“ durch einen „Stau-Kennwert“ δ mit

$$\delta = \begin{cases} 1 & dt \le dt_0 \\ 0 & dt > dt_0 \end{cases} \quad [-] \qquad (19)$$

formulieren (*dt* ist die gemessene Füllzeit am Ende der Grünzeit, dt_0 der Referenzwert) und mit $\overline{\delta}_n = \alpha_\delta \cdot \delta_n + (1-\alpha_\delta) \cdot \overline{\delta}_{n-1}$ für jeden Umlauf *n* exponentiell glätten. Auch die maximale Rückstaulänge L_n (= N_{SE}) lässt sich mit einem a_L auf die gleiche Weise glätten. Dann kann über Korrelationsrechnung ein Zusammenhang zwischen diesen stetigen Werten δ_n und L_n in der Form einer Ursprungs-Regressionsgeraden hergestellt werden, wie Abb. 2 anhand manuell erhobener Messdaten darstellt.

Liegt der Stau-Kennwert d_n aus Messungen vor, kann bei einer gegebenen Steigung m auf die Rückstaulänge geschlossen werden, was folgende Bestimmungsgleichung zur Berechnung einer unbekannten maximalen Rückstaulänge ermöglicht:

$$L_n = m \cdot \overline{\delta} \qquad [s] \qquad (20)$$

Auswertungen haben gezeigt, dass die Steigung m der Gl.(20) für jeden Detektor individuell festgelegt werden muss, da sie nicht nur vom Abstand zwischen Detektor und Haltelinie, sondern auch von Eigenschaften des Verkehrsflusses abhängt. Die erforderliche Kalibrierung dieses Parameters lässt sich online durchführen. Die Anwendung des Verfahrens zur Rückstauschätzung zeigte in Feldversuchen gute Resultate.

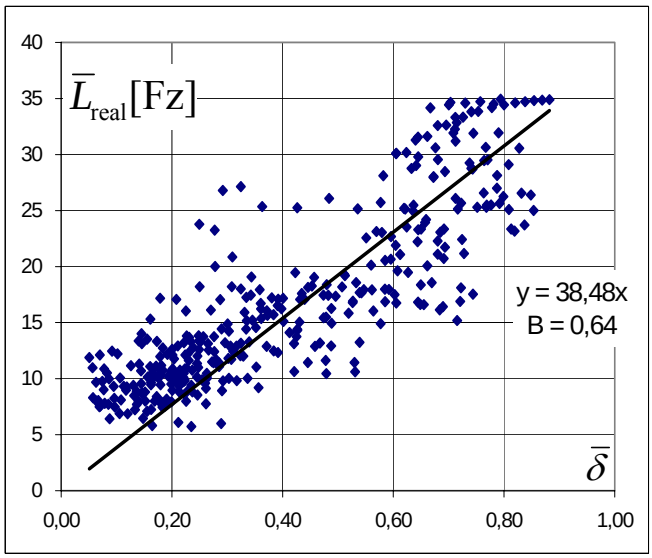

Abb. 2 - Maximale Staulänge L [Fz] über dem geglätteten Stau-Kennwert δ [-] (München, LSA S1-37-1, D82, 15.05.01, Quelle: Mück, 2001)

Nach kritischer Betrachtung des TRANSVER-Verfahrens werden folgende Punkte als verbesserungsbedürftig festgestellt:

1. Es wird unterstellt, dass eine Linearbeziehung zwischen dem „Stau-Kennwerte“ δ und der Maximalrückstaulänge am Stauende L_{max} besteht. Dies führt zur Unterschätzung der L_{max} bei hoher und niedriger Belastung sowie zur Überschätzung der L_{max} bei mittlerer Belastung (siehe Abb. 2, entspr. Bild 1 in Mück, 2001)).

2. Die Einflüsse der Koordinierung, der Ein- und Abbiegevorgänge und der Störung auf Streckenabschnitten werden unzureichend berücksichtigt.
3. Die Definition des Referenzwerts dt_0 ist schwierig.
4. Zur Kalibrierung des Verfahrens werden zusätzliche Messungen von L_{max} benötigt, was von haltlinienahen Detektoren nicht erfasst werden kann.

Im Folgenden wird ein neuer Ansatz formuliert, der auf der Warteschlangentheorie basiert und einen großen Teil der oben genannten negativen Punkte überwindet.

3.2.2 Der Neue Ansatz

Man kann aus den haltliniennahen Detektoren mehr rausholen als es im TRANSVER-Verfahren getan wurde.

Ausgehend von der Grenzfüllzeit dt_0 (Referenzwert, vgl. Mück, 2001) und der aktuellen Füllzeit dt können zwei wichtige Parameter für das Warteschlangensystem an einer LSA ermittelt werden: die Überlastungswahrscheinlichkeit $P_{ü}$ (Wahrscheinlichkeit dafür, dass am Ende der Grünzeit ein Reststau zurückbleibt) und die mittlere Rückstaulänge am Grünende N_{GE}. Dabei ist dt_0 eine Funktion von der mittleren Verkehrsstärke q_{GE} im Zeitraum zwischen dem Grünende und dem Zeitpunkt, dass der Stau den Detektor erreicht, und von der Aufnahmekapazität vom Detektor zur Haltelinie m_D:

$$dt_0 = \frac{m_D}{q_{GE}} \quad [s] \qquad (21)$$

Der Wert von $q_{maßg}$ ist von der Ganglinie der Verkehrsstärke innerhalb des Umlaufs abhängig. Er wird beeinflusst von den benachbarten LSA, von den ein- und abbiegenden Verkehrsflüssen und von der Störung auf den Streckenabschnitten. Der Wert von $q_{maßg}$ und damit auch der Wert von dt_0 muss daher online kalibriert werden. Für allein stehende Knotenpunkte ist $q_{maßg}$ die mittlere Verkehrsstärke des Zuflusses q.

Der im TRANSVER - Verfahren verwendete Parameter "Stau-Kennwert" δ entspricht per Definition exakt dem Parameter $P_{ü}$ ($dt \leq dt_0$ entspricht dem Zustand, dass der Stauraum beim Grünende vorbelegt ist bzw. dass am Grünende Reststau vorhanden ist). Der Reststau am Grünende N_{GE} kann vereinfacht (Bemerkung: mit Berücksichtigung der

Kontinuitätstheorie kann auch eine genauere Funktion angegeben werden) ausgedrückt werden:

$$N_{GE} = (dt_0 - dt) q_{maßg} \quad [s] \quad (22)$$

mit $N_{GE} < m_D$. Bei N_{GE} größer als m_D ist N_{GE} nicht mehr messbar.

Löst man Gl.(3) nach x auf, erhält man

$$x = P_{ü}^{\,k} \quad [s] \quad (23)$$

Setzt man x in Gl.(4) ein, erhält man

$$N_{GE} = \frac{P_{ü}^{\left(\frac{b}{a}\right)}}{2\left(1 - P_{ü}^{\,k}\right)} = \frac{P_{ü}^{\,0,8}}{2\left(1 - P_{ü}^{\,k}\right)} \quad [s] \quad (24)$$

Löst man diese Gleichung nach k auf, erhält man

$$k = \frac{1}{a\sqrt{m}} = \frac{\ln\left(1 - \frac{P_{ü}^{\,0,8}}{2N_{GE}}\right)}{\ln P_{ü}} \quad [s] \quad (25)$$

Nach Gl.(25) lässt sich der Parameter $k = 1/\left(a\sqrt{m}\right)$ gegen die Messwerte von $\delta = P_{ü}$ und N_{GE} online kalibrieren. Dabei können die aktuelle Verkehrs- und Steuerungsbedingungen berücksichtigt werden. Der Auslastungsgrad x und die Rückstaulänge am Grünende N_{GE} können dann mit Gl.(23) und (24) errechnet werden.

3.2.3 Kalibrierung des Referenzwerts dt_0 ohne Messwerte von N_{SE}

Der Referenzwert dt_0 ist ein entscheidender Parameter für das Verfahren. Abweichungen bei der Bestimmung dieses Parameters führen oft zur großen Fehlschätzung der Verkehrszustände. Der Referenzwert dt_0 lässt sich mit Messwerten kalibrieren. Dabei ist die Ermittlung von q_{GE} (mittlere Verkehrsstärke im Zeitraum zwischen dem Grünende und dem Zeitpunkt, dass der Stau den Detektor erreicht) von entscheidender Bedeutung. Um den q_{GE}-Wert kalibrieren zu können, werden zusätzliche, mit haltlinienahen Detektoren messbare Parameter benötigt. Angenommen, dass der Auslastungsrad x bekannt ist (dies kann durch Messung der Kapazität und des Zuflusses oder durch

Messung der Belegzeit an der Haltelinie ermittelt werden), kann der Wert q_{GE} mit dem folgenden Gleichungssystem implizit dargestellt werden:

$$\begin{cases} q_{GE} = \dfrac{N_{GE}}{dt_0 - dt} \\ N_{GE} = \dfrac{x^{\frac{0,8}{k}}}{2(1-x)} \\ k = \dfrac{\ln x}{\ln P_{\ddot{u}}} \\ P_{\ddot{u}} = \overline{\delta}_n \\ \overline{\delta}_n = \alpha_\delta \cdot \delta_n + (1-\alpha_\delta) \cdot \overline{\delta}_{n-1} \\ \delta = \begin{cases} 1 & dt \le dt_0 \\ 0 & dt > dt_0 \end{cases} \\ dt_0 = \dfrac{m_D}{q_{GE}} \end{cases} \quad [\text{s}] \qquad (26)$$

Der Wert q_{GE} kann dann mit dem Anfangswert $q_{GE}^{\ 0} = q_{mittl}$ und den zugehörigen $P_{ü}$-Werten iterative ermittelt werden. Es muss noch eine konvergierende Iterationsvorschrift gefunden werden. Die Iterationsvorschrift in der Form

$$\begin{cases} q_{GE}^{\ i+1} = \dfrac{N_{GE}^{\ i}}{dt_0^{\ i} - dt} \\ N_{GE}^{\ i} = \dfrac{x^{\frac{0,8}{k^i}}}{2(1-x)} \\ k^i = \dfrac{\ln x}{\ln P_{\ddot{u}}^{\ i}} \\ P_{\ddot{u}}^{\ i} = \overline{\delta}_n^{\ i} \\ \overline{\delta}_n^{\ i} = f(dt, dt_0^{\ i}) \\ dt_0^{\ i} = \dfrac{m_D}{q_{GE}^{\ i}} \end{cases} \quad [\text{s}] \qquad (27)$$

das heißt, in der Form

$$q_{GE}^{\,i+1} = \frac{x^{\frac{0{,}8}{\left(\frac{\ln x}{\ln f\left(dt, \frac{m_D}{q_{GE}^{\,i}}\right)}\right)}}}{\frac{2(1-x)}{\frac{m_D}{q_{GE}^{\,i}} - dt}} \qquad [s] \qquad (28)$$

konvergiert leider nicht.

Die Iterationsvorschrift nach einer Umformung

$$\begin{cases} q_{GE}^{\,i+1} = \dfrac{m_D}{\frac{N_{GE}^{\,i}}{q_{GE}^{\,i}} + dt} \\ N_{GE}^{\,i} = \dfrac{x^{\frac{0{,}8}{k^i}}}{2(1-x)} \\ k^i = \dfrac{\ln x}{\ln P_{\ddot{u}}^{\,i}} \\ P_{\ddot{u}}^{\,i} = \bar{\delta}_n^{\,i} \\ \bar{\delta}_n^{\,i} = f\left(dt, dt_0^{\,i}\right) \\ dt_0^{\,i} = \dfrac{m_D}{q_{GE}^{\,i}} \end{cases} \qquad [s] \qquad (29)$$

das heißt, in der Form

$$q_{GE}^{\,i+1} = \frac{m_D}{\frac{x^{\frac{0{,}8}{\left(\frac{\ln x}{\ln f\left(dt, \frac{m_D}{q_{GE}^{\,i}}\right)}\right)}}}{\frac{2(1-x)}{q_{GE}^{\,i}}} + dt} \qquad [s] \qquad (30)$$

konvergiert.

3.2.4 Schätzung der maximalen Staulänge N_{SE} und zusätzliche Kalibrierungsmöglichkeiten

Mit den ermittelten Werten x und N_{GE} und zusätzlichen gemessen Parametern q (=n/C), G und C (Alle Werte sind als geglättete Werte zu verstehen) können nach der Warteschlangentheorie alle Parameter zur Beschreibung der Verkehrszustände (Rückstaulänge am Rotende, Rückstaulänge am Stauende, mittlere Wartezeit etc.) an LSA berechnet werden (vgl. Wu, 1996).

Die Rückstaulänge am Stauende N_{SE} (=L_{max} nach TRANSVER) lautet nach den gängigen Warteschlangenmodellen für LSA (vgl. Wu, 1996):

$$N_{SE} = N_{GE} + \frac{(C-G)q}{\left(1-\frac{G}{C}x\right)}F_P = \frac{P_{\ddot{u}}^{0,8}}{2\left(1-P_{\ddot{u}}^{k}\right)} + \frac{(C-G)q}{\left(1-\frac{G}{C}P_{\ddot{u}}^{k}\right)}F_P \qquad [s] \qquad (31)$$

Dies entspricht

$$L_{max} = \frac{\delta^{0,8}}{2\left(1-\delta^{k}\right)} + \frac{(C-G)q}{\left(1-\frac{G}{C}\delta^{k}\right)}F_p \qquad [s] \qquad (32)$$

Hier ist F_P ein Parameter zur Berücksichtigung der Koordinierung (siehe HCM 2000). Für unkoordinierte Knotenpunkte ist F_P = 1.

Durch die Gl.(32) wird die nichtlineare Beziehung zwischen δ und L_{max} hergestellt. Als ein Rechenbeispiel wird für Abb. 2 (Bild 1 in Mück, 2001) die Rückstaulänge am Stauende N_{SE} (=L_{max}) berechnet (mit C = 90s, G = 40s (ca. Wert nach Angabe von Herrn Mück für das betrachte Bild), F_P = 1 und a = 2,37). Es zeigt sich dass die nicht-lineare Funktion optisch viel besser zum Verlauf der Messdaten passt.

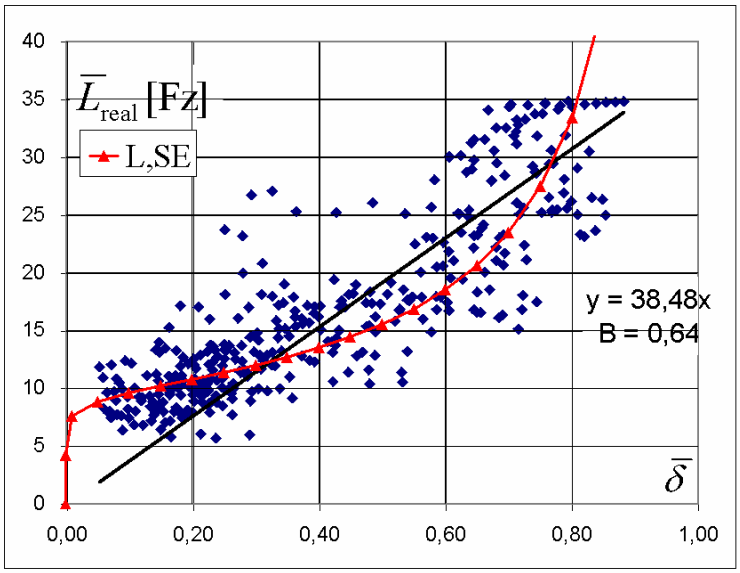

Abb. 3 – Vergleich der Maximalstaulänge L_{max} (=N_{SE}), L_{real} nach Mück (2001), *L,SE* = N_{SE} nach dem neuen Ansatz

Wenn die Werte von L_{max} messbar sind, kann man mit Hilfe der Gl.(32) den Parameter F_P gegen die Messwerte δ und L_{max} kalibrieren. Man erhält

$$F_P = \frac{N_{SE} - \frac{P_{ü}^{0,8}}{2\left(1-P_{ü}^{k}\right)}}{\frac{(C-G)q}{\left(1-\frac{G}{C}P_{ü}^{k}\right)}} = \frac{L_{max} - \frac{\delta^{0,8}}{2\left(1-\delta^{k}\right)}}{\frac{(C-G)q}{\left(1-\frac{G}{C}\delta^{k}\right)}} \qquad [s] \qquad (33)$$

Bei $P_ü = \delta \approx 0$ (schwacher Verkehr) erhält man

$$F_P \approx \frac{N_{SE}}{(C-G)q} = \frac{L_{max}}{(C-G)q} \qquad [s] \qquad (34)$$

Nach HCM (2000) ist F_P eine Funktion vom Anteil P der Fahrzeuge, die während der Grünzeit ankommen. Diese Funktion lautet:

$$F_P = \frac{1-P}{(1-\frac{G}{C})} \qquad [s] \qquad (35)$$

Nimmt man vereinfacht an, dass die Verkehrsstärke während der Sperrzeit konstant ist, erhält man dann

$$q_{GE} = qF_P = \frac{q(1-P)}{(1-\frac{G}{C})} \quad [s] \quad (36)$$

Damit ist der Kreis geschlossen. Mit Gl.(36) und (21) kann der Referenzwert dt_0 iterativ ermittelt werden:

$$dt_0^{\,i+1} = \frac{m_D}{q_{GE}^{\,i}} \quad [s] \quad (37)$$

mit dem Anfangswert

$$q_{GE}^{\,0} = q_{mittl} \quad [s] \quad (38)$$

3.2.5 Kalibrierung von k-Wert gegen gemessene Maximalrückstaulänge L_{max}

Wenn die Werte von $L_{\max}$ messbar sind, kann man auch mit Hilfe der Gl.(32) den Parameter k direkt gegen die Messwerte δ und $L_{\max}$ kalibrieren (für F_P = 1). Das Ergebnis ist dann viel robust in der Hinsicht auf die Schätzung der Maximalstaulänge.

Aus Gl.(32) erhält man

$$2L_{\max}\frac{G}{C}\left(\delta^k\right)^2 - \left[2L_{\max}\left(\frac{G}{C}+1\right) - \delta^{0,8}\frac{G}{C} - 2(C-G)q\right]\delta^k + 2L_{\max} - \delta^{0,8} - 2(C-G)q = 0$$

$$AX^2 + BX + C = 0 \quad [s] \quad (39)$$

mit $A = 2L_{\max}\frac{G}{C}$

$$B = -\left[2L_{\max}\left(\frac{G}{C}+1\right) - \delta^{0,8}\frac{G}{C} - 2(C-G)q\right]$$

$$C = 2L_{\max} - \delta^{0,8} - 2(C-G)q$$

$$X = \delta^k$$

Die Lösung dieser Gleichung lautet

$$X = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad [s] \quad (40)$$

und

$$k = \frac{\ln X}{\ln \delta} \quad [s] \quad (41)$$

4 Zusammenbefassung

Das hier vorgestellte Konzept zur Schätzung für den Verkehrszustand an LSA weisen viele Vorteile auf. Vor allem sind folgende Punkte aufzuzählen:

1. Mehr theoretische Grundlage in Verbindung mit der Warteschlangentheorie
2. Berücksichtigung der Nichtlinearität des Warteschlangensystems
3. vielfältige Möglichkeiten zur Kalibrierung von Parametern
4. Eindetektor-Verfahren möglich
5. Mit Messung von L_{max} ist das Verfahren vollwertig mit Berücksichtigung der Koordinierung, der Ein- und Abbiegebeziehung, der Störung auf Streckenabschnitten
6. Kalibrierung des Referenzparameters dt_0 möglich

Der neue Ansatz weist - im Vergleich zum TRANSVER - Verfahren - folgende Besonderheiten auf:

- Anwendbar sowohl für haltlinienahe Detektoren als auch für Detektoren an der Haltlinie
- Berücksichtigung der Nichtlinearität des Warteschlangensystems
- Berücksichtigung der Einflüsse von Koordinierung, Ein- und Abbiegeströmen und Störung auf Streckenabschnitten
- vielfältige Möglichkeiten zur Kalibrierung von Parametern

Der hier formulierte Ansatz soll mit Messungen geprüft werden. Hierfür ist eine Diplomarbeit sehr geeignet. Dabei kommen sowohl Messungen im Feld als auch Simulationsstudien in Frage.

5 Literaturangabe

AIDA (2000): Verkehrszustandsklassifizierung und Störfallerkennung, Systembeschreibung; SSP-consult Beratende Ingenieure GmbH, München

Akcelik, R. (1980): Time-dependent expressions for delay, stop rate and queue length at traffic signals. Australian Road Research Board, No. 361-1

Bernhard, J., Riedel, T. (1999): Erkennung von Stau mit kurzen Schleifendetektoren, Tagungsband der Heureka 1999, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

Böhm, H. (1968): Anwendung der Mont-Carlo Methode in der Straßenverkehrstechnik. Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 73

FGSV (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 299, FGSV Verlag GmbH, Köln

FGSV (2003): Richtlinien für Lichtsignalanlagen - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr (RiLSA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 321. Köln. Berichtigter Nachdruck 2003

Friedrich, B. (1996): Methoden und Potentiale adaptiver Verfahren für die Lichtsignalsteuerung, Tagungsband der Heureka 1996, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

Friedrich, B. (1999): Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen, Dissertation, Schriftenreihe des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München

Friedrich, B. (2000): Steuerung von Lichtsignalanlagen: BALANCE – ein neuer Ansatz, Straßenverkehrstechnik, Heft 7/2000, Kirschbaum Verlag, Bonn

Henninger, T. (1999): Eine kombinierte Methode zur Schätzung von Kantenbelastungen, Abbiegequoten und Störungen in Stadtstraßennetzen, Tagungsband der Heureka 1999, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

Kimber, R.M.; Hollis, E.M. (1979): Traffic queues and delays at road junctions. TRRL Laboratory Report, LR 909

Miller, A.J. (1978): Signalised intersections - capacity guide. Australian Research Board Bulletin, No. 4, 1968, Reprinted as ARRB Research Report ARR No. 79

Mück, J. (2001): Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. Straßenverkehrstechnik, 11/2001, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn

Papageorgiou, M. (1991): Optimierung: statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung; München, Wien: Oldenbourg

Pöschl, P.; Waglechner (1982): Neue Tafeln für kritische Rückstauzahlen an Signalzufahrten bei Poisson-Zufluß. Straßenverkehrstechnik, Heft 2/1982

RiLSA (1992): Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

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

Webster, F.V. (1958): Traffic Signal Setting. Road Research Technical Paper, No. 39, HNSO, London

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

Wu, N. (1990): Wartezeit und Leistungsfähigkeit von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung von Instationarität und Teilgebundenheit des Verkehrs (Dissertation). Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 8

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

Wu. N. (1996): Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen. Straßenverkehrstechnik, 5/1996. Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn