

1813

Koordinierte Lichtsignalanlagen und öffentlicher Nahverkehr¹⁾

1. Problemstellung

Schon bald nach Inbetriebnahme der ersten koordinierten Lichtsignalanlagen setzten Klagen über damit verbundene höhere Beförderungszeiten der öffentlichen Verkehrsmittel ein. Bei dem bisher meist angewandten Verfahren, die Koordinierung für den Kraftfahrzeugverkehr vorzunehmen und dann den öffentlichen Verkehr daran anzupassen, wie das beispielsweise in (4) beschrieben wird, sind solche Einwände völlig berechtigt.

Insbesondere nach dem VIII. Parteitag der SED wurde auf die Folgen dieser Fehlentwicklung hingewiesen (5) (8) und eine Veränderung gefordert (1). Voraussetzung dafür ist eine mögliche Aussage darüber, welche Periodendauer und Wellengeschwindigkeit unter den jeweils gegebenen Verhältnissen die für die öffentlichen Verkehrsmittel optimale ist. Um die hierfür nötigen Berechnungen durchführen zu können, muß Klarheit über alle Elemente der Fahrt eines öffentlichen Verkehrsmittels bestehen. In (3) (5) (6) (8) (9) werden Hinweise dazu gegeben. Deutlich ist daraus zu erkennen, daß in der Regel mit wenigen Messungen oder durch fahrdynamische Berechnungen einfach Aussagen über die Größe der Fahrzeiten einschließlich der Anfahr- und Bremszeitzuschläge getroffen werden können. Wesentlich unübersichtlicher sind dagegen die starken Schwankungen der bei koordinierten Lichtsignalanlagen sehr bedeutsamen Haltestellenaufenthaltszeiten. Der vorliegende Beitrag verfolgt den Zweck, die hier wirkenden Zusammenhänge aufzudecken. Dabei gilt das Gesagte nicht nur für die Straßenbahn, sondern auch für den bisher bei dieser Problematik kaum betrachteten Kraftomnibus.

2. Größe und Verteilung der Haltestellenaufenthaltszeiten

Die Haltestellenaufenthaltszeit kann allgemein nach der Beziehung

$$t_h = \alpha \psi \frac{P}{S} t_F + t_{h \min} \quad \left| \begin{array}{c|c|c|c|c} t & \alpha & \psi & P & S \\ \hline S^2 & -^3 & - & \text{Plätze/Zug} & \text{Zug}^{-1} \end{array} \right| \quad (1)$$

errechnet werden (6). Dabei sind:

- t_h = Haltestellenaufenthaltszeit
- α = Anteil des Fahrgastwechsels an einer Haltestelle am Platzangebot eines Zuges (üblicherweise $\leq 0,4$)
- ψ = Korrekturfaktor zum Berücksichtigen der ungleichen Fahrgastverteilung am Zug (in Abhängigkeit von der Zuglänge in der Regel 1,2...1,7)
- P = Platzangebot eines Zuges
- S = Anzahl der Türspuren am Zug (lichte Weite mindestens 0,65 m)
- t_F = mittlerer Zeitbedarf für das Ein- oder Aussteigen eines Fahrgastes (im allgemeinen 1,7...2,0 s/Pers.)
- $t_{h \min}$ = Mindest-Haltestellenaufenthaltszeit⁴⁾ (üblicherweise 7...10 s)

Das Produkt αP entspricht der Anzahl der Fahrgäste, die an der betrachteten Haltestelle in einen bzw. aus einem Zug ein- und aussteigen. Besonders der Wert von α , in wesentlich schwächerem Ausmaß aber auch die Größen von ψ und t_F unterliegen von Fall zu Fall Schwankungen, die im voraus nicht konkret anzugeben sind. Es hat sich deshalb eine stochastische Betrachtungsweise eingeführt, die erfolgreich versucht, mit Hilfe von Verteilungen der mathematischen Sta-

tistik die Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen einer bestimmten Haltestellenaufenthaltszeit anzugeben. Bereits in (2) wird gezeigt und in (7) bestätigt, daß die Normalverteilung ein brauchbares Modell dafür darstellt. Danach gilt

$$P(t_h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s_{th}} \cdot e^{-\frac{(t_h - \bar{t}_h)^2}{2 s_{th}^2}} \quad \left| \begin{array}{c|c|c|c|c} P & s & e & t \\ \hline -^3 & s & - & s \end{array} \right| \quad (2)$$

Es sind:

$P(t_h)$ = Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen einer bestimmten Haltestellenaufenthaltszeit

s_{th} = Standardabweichung der Haltestellenaufenthaltszeit

\bar{t}_h = mittlere Haltestellenaufenthaltszeit

Für die Standardabweichung wird in (2) die Regressionsgleichung

$$s_{th} = 0,460 \bar{t}_h - 0,688 \quad \left| \begin{array}{c|c|c|c} s & t & 0,688 \\ \hline s & s & s \end{array} \right| \quad (3)$$

genannt, die sich auch bei anderen Beobachtungen aus früheren Jahren (7) bestätigt hat. In (8) wird dagegen im Ergebnis von 1972 ausschließlich bei Tatra-Straßenbahnwagen durchgeführten Messungen umgerechnet die Beziehung

$$s_{th} = 0,379 \bar{t}_h - 2,76 \quad \left| \begin{array}{c|c|c} s & t & 2,76 \\ \hline s & s & s \end{array} \right| \quad (4)$$

angegeben, die natürlich zu niedrigeren Ergebnissen führt. Der Unterschied kann mit den bei den modernen Fahrzeugen fest eingestellten Zeiten für die Abgabe des Abfahrtsignals und das Schließen der Türen begründet werden, wodurch individuelle Unterschiede bei diesen Zeitelementen entfallen.

Bereits bei dem in (2) vorgestellten Beispiel fällt eine leichte Linksschiefe der beobachteten Verteilung auf. Wie in (7) gezeigt wird, führt insbesondere bei schwächer frequentierten Haltestellen die Erlang-Funktion

$$P(t_h) = \frac{(k-1)!}{(k-1)!} \frac{e^{-k t_h} (k t_h)^{k-1}}{(k-1)!} \quad \left| \begin{array}{c|c|c|c|c} P & k & t & e & \alpha \\ \hline -^3 & - & s & - & - \end{array} \right| \quad (5)$$

zu einer wesentlich besseren Übereinstimmung mit den empirischen Werten als die Normalverteilung (6). Dabei ist

$$k = \frac{(t_h - t_{h \min})^2}{s_{th}^2} \quad \left| \begin{array}{c|c|c} k & t & s \\ \hline - & s & s \end{array} \right| \quad (6)$$

und

$$\alpha = \frac{t_h - t_{h \min}}{t_h - t_{h \min}} \quad \left| \begin{array}{c|c} \alpha & t \\ \hline - & s \end{array} \right| \quad (7)$$

Abbildung 1 zeigt die Summenhäufigkeit der Erlang-Funktion für $k = 1, 2, 3, 5$ und 10 .

Zusätzlich ist die Summenhäufigkeit der Normalverteilung für $s_u = \pm 0,3$ eingetragen. Deutlich ist die gute Annäherung an die Erlang-Funktion mit $k = 10$ zu erkennen, ein Hinweis

1) Überarbeitete Fassung eines Vortrages, den der Verfasser am 3. Juli 1974 im Rahmen der 10. Verkehrswissenschaftlichen Tage der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ in Dresden gehalten hat.
 2) bei t_F jedoch „s/Pers.“
 3) streng genommen „Pers./Platz“
 4) in [8] als „Latenzzeit“ bezeichnet.
 5) theoretisch s^{-1}

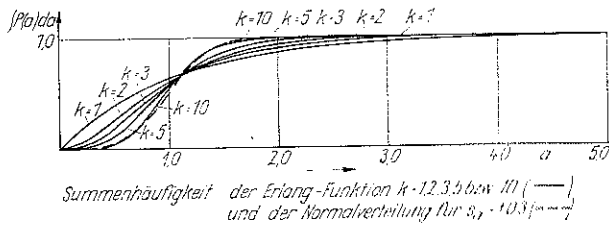


Abbildung 1

auf den Umstand, daß für große k -Werte die Erlang-Funktion in die Normalverteilung übergeht. Da sich bei Beobachtung der Aufenthaltszeiten an einer Haltestelle bisher stets k -Werte von 3 und mehr ergeben haben, beschreiben die in Abbildung 2 dargestellten Kurven der Summenhäufigkeit die Grenzen des Bereiches, in dem alle vorkommenden Fälle liegen.

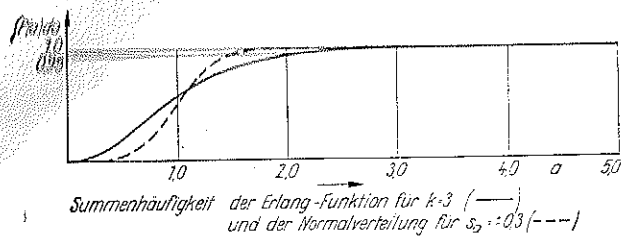


Abbildung 2

3. Optimierungskriterium

Die vom Zeitaufwand für die Fahrgäste her günstigste Lösung ist zweifellos diejenige, bei der die durch die Lichtsignalisierung ausgelösten Wartezeiten innerhalb des Streckenabschnittes mit koordinierter Schaltung minimal werden. Wie hier nicht gezeigt werden kann, ist das nach einer Extremwertberechnung dann der Fall, wenn gilt

$$P(a_{\text{maßg}}) = \frac{1}{\sigma T_p} \quad \left| \begin{array}{c|c} P & a \\ \hline - & - \end{array} \right| \quad (8)$$

$P(a_{\text{maßg}})$ = Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen des a -Wertes, der derjenigen maßgebenden Aufenthaltszeit entspricht, für die keine Wartezeit entsteht und die maßgebend für das Berechnen des Fahrtverlaufs ist

Dabei errechnet sich σT_p nach der in Analogie zu (7) gebildeten Beziehung

$$\sigma T_p = \frac{T_p}{t_h - t_{h \min}} \quad \left| \begin{array}{c|c|c} a & T & t \\ \hline - & s & s \end{array} \right| \quad (9)$$

T_p = Periodendauer der Lichtsignalanlage

Beim Rechnen mit der Gleichung (8) ist zu beachten, daß in den praktisch sinnvollen Fällen für $\sigma_{\text{maßg}}$ eine Doppellösung entsteht. Der jeweils kleinere Wert führt zur maximalen Wartezeitsumme. Zu verwenden ist deshalb stets der andere, größere Wert von $\sigma_{\text{maßg}}$.

Daß die Festlegung nach Gleichung (8) zu einem geringeren Zeitverlust führt als der in (9) unterbreitete Vorschlag, den entsprechenden Berechnungen diejenige Haltestellenaufhaltszeit zugrunde zu legen, die in 95% aller Fälle nicht überschritten wird, ist deutlich in dem in Abbildung 3 gezeigten Beispiel zu erkennen.

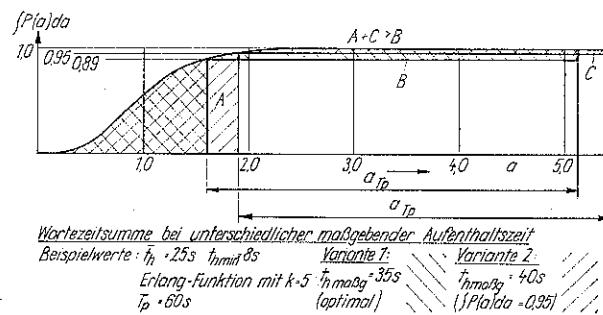


Abbildung 3

Tab. 1: Maßgebende Haltestellenaufhaltszeiten für in koordinierte Lichtsignalanlagen eingeordnete öffentliche Verkehrsmittel

Fahrgastwechsel	max. Fahrgastanzahl pro Tür im Mittel	mittlere Haltestellenaufhaltszeit	Verteilung	Größe	Periodendauer			
					$T_p = 60s$	$T_p = 70s$	$T_p = 80s$	$T_p = 90s$
schwach	4	15 s	Erlang ($k = 3$)	σT_p	8,571	10,000	11,429	12,857
				$P(a_{\text{maßg}})$	0,117	0,100	0,0875	0,0778
				$\sigma_{\text{maßg}}$	2,09	2,18	2,24	2,28
				$t_{h \text{maßg}}$	23 s	23 s	24 s	24 s
				$\sigma_{\text{maßg}}$				
				$\int_0^a P(a) da$	0,95	0,95	0,96	0,96
mittel	10	25 s	Erlang ($k = 5$)	σT_p	3,529	4,118	4,706	5,294
				$P(a_{\text{maßg}})$	0,283	0,243	0,212	0,189
				$\sigma_{\text{maßg}}$	1,60	1,67	1,72	1,76
				$t_{h \text{maßg}}$	35 s	36 s	37 s	38 s
				$\sigma_{\text{maßg}}$				
				$\int_0^a P(a) da$	0,89	0,91	0,93	0,93
stark	16	35 s	normal ($s = \pm 8,1 s$)	σT_p	2,222	2,593	2,963	3,333
				$P(a_{\text{maßg}})$	0,450	0,386	0,337	0,300
				$\sigma_{\text{maßg}}$	1,44	1,47	1,50	1,52
				$t_{h \text{maßg}}$	47 s	48 s	48 s	49 s
				$\sigma_{\text{maßg}}$				
				$\int_0^a P(a) da$	0,93	0,94	0,95	0,96
besonders stark	28	45 s	normal ($s = \pm 11,1 s$)	σT_p	1,638	1,898	2,162	2,432
				$P(a_{\text{maßg}})$	0,617	0,529	0,463	0,411
				$\sigma_{\text{maßg}}$	1,37	1,41	1,44	1,46
				$t_{h \text{maßg}}$	59 s	60 s	61 s	62 s
				$\sigma_{\text{maßg}}$				
				$\int_0^a P(a) da$	0,89	0,91	0,93	0,94

Um einen größeren Überblick zu geben, werden in Tabelle 1 für Haltestellen verschiedener Frequenz bei unterschiedlicher Periodendauer die unter typischen Verhältnissen errechneten Ergebnisse wiedergegeben.

Die maßgebende Haltestellenaufenthaltszeit wird dabei je nach den Verhältnissen in 89 bis 96 % der Fälle nicht überschritten. Es erscheint deshalb für eine Optimierung unzweckmäßig, an dieser Stelle einheitlich 95 % anzusetzen. Andererseits darf nicht übersehen werden, daß das Rechnen vor allem mit der Erlang-Funktion aufwendig ist. Tabelle 1 zeigt aber, daß die aus ihren Ergebnissen abgeleitete einfache Beziehung

$$t_{h \text{ maß}} = 1,2 t_h + 0,08 T_p \quad \left| \begin{array}{c} t \\ s \\ \hline t \\ s \end{array} \right| \quad (10)$$

$t_{h \text{ maß}}$ = Haltestellenaufenthaltszeit, für die keine Wartezeit entsteht und die maßgebend für das Berechnen des Fahrtverlaufs ist

außerordentlich gut den Resultaten der Optimierung entspricht.

4. Anwendungshinweise

Durch Iteration können aus Gleichung (8) oder (10) rasch die Haltestellenaufenthaltszeit und die Periodendauer bestimmt werden, die einen optimalen Ablauf für die öffentlichen Verkehrsmittel gewährleisten. Für den allgemeinen Straßenverkehr führt meist eine andere Periodendauer zur besten Lösung. Hier ist eine Kompromißlösung zu suchen, wobei nach einem in (9) gemachten Vorschlag die Wartezeiten der Fahrzeuge mit der Anzahl der von ihnen beförderten Fahrgäste zu wichten sind.

Beim Anwenden der Gleichungen (8) und (10) darf nicht übersehen werden, daß ein Fahrzeug, das an einer Haltestelle die maßgebende Haltestellenaufenthaltszeit überschreitet und demzufolge eine größere Wartezeit erhält, meist verspätet ist. Damit ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, daß an der nächsten Haltestelle erneut ein Überschreiten der maßgebenden Haltestellenaufenthaltszeit mit allen nachteiligen Folgen eintritt. Ein derartiges lawinenhaftes Anwachsen von Verspätungen ist aber unvermeidbar. Deshalb sollte für jede Linie die sich nach Gleichung (8) oder (10) ergebende maßgebende Haltestellenaufenthaltszeit auf jedem Streckenabschnitt mit koordinierter Lichtsignalanlage nur einmal vorgesehen werden, und zwar mit Vorteil an der am stärksten frequentierten Haltestelle. In allen anderen Fällen ist mit Aufenthaltszeiten zu rechnen, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden. Das Maß von 95 % erscheint hier als noch zu knapp, vorgeschlagen werden mindestens 98 %. Keinesfalls angewandt werden sollten jedoch wegen der damit verbundenen Störung für die Gleichmäßigkeit des Betriebsablaufs maßgebende Haltestellenaufenthaltszeiten, die kleiner als die nach Gleichung (8) oder (10) errechneten Werte sind.

Durch die breite Verteilung der Haltestellenaufenthaltszeiten sind für die öffentlichen Verkehrsmittel beim Anwenden koordinierter Lichtsignalanlagen in bestimmtem Umfang auch bei der Optimierung Wartezeiten nicht vermeidbar. Diese sollten zweckmäßigerweise an die Haltestellen verlagert und so für etwa noch eintreffende Fahrgäste nutzbar gemacht werden. An Haltestellen, die unmittelbar vor Lichtsignalanlagen gelegen sind, verhalten viele Fahrer in Kenntnis des Signalzeitplans schon heute so, daß sie die Türen der Fahrzeuge nicht nach beendetem Fahrgastwechsel, sondern erst unmittelbar vor der Signalfreigabe schließen. Mit dem Übergang zu verkehrszahlungsabhängigen Lichtsignalanlagen wird das nur noch eingeschränkt oder nicht mehr möglich sein. Es wird deshalb erforderlich, öffentliche Verkehrsmittel durch ein in der In-Hausbearbeitung befindlichen BUS-Straßenverkehrsamt vorgeschaltetes Ankündigungssignal auf die bevorstehende Freigabe hinzuweisen. Nur so können die Fahrer

rechtzeitig das Abfahrtsignal geben und die Fahrzeurtüren schließen. An den auf Streckenabschnitten mit Koordinierung nicht unmittelbar vor Lichtsignalanlagen gelegenen Haltestellen sollten Vorsignale aufgestellt werden. Sie können durch den Begriff „Am Signal ist Halt zu erwarten“ ein zur Wartezeit am Knotenpunkt führendes zu frühes Abfahren verhindern. Zum richtigen Zeitpunkt müßten dann die Signallampen erlöschen. Der Begriff „Am Signal ist Fahrt frei zu erwarten“ darf hier nicht geseendet werden, weil am Knotenpunktsignal im Störfall der Fahrtbegriff auch ausbleiben kann.

5. Schlußbetrachtung

Anliegen dieses Beitrages war es, die komplizierten Zusammenhänge, die beim Anwenden koordinierter Lichtsignalanlagen für öffentliche Verkehrsmittel insbesondere durch die unterschiedlichen Haltestellenaufenthaltszeiten zu berücksichtigen sind, zu erläutern und Lösungswege zur Diskussion zu stellen. Wenn diese Überlegungen im Sinne der vom VIII. Parteitag der SED beschlossenen Hauptaufgabe zu einer Verbesserung im öffentlichen Personenverkehr unserer Großstädte führen, ist ihr Zweck erfüllt.

LITERATUR

- (1) Arndt, O.: Wie es im Nahverkehr der Städte weitergeht, Neues Deutschland 27 (1972) 106 vom 17. 4. 1972
- (2) Beck, H.: Kriterien zur Kennzeichnung der Betriebsgüte und der praktischen Leistungsfähigkeit von Straßenbahnnetzen, Dissertation, TH Stuttgart 1964
- (3) Bochynek, F. u. a.: Möglichkeiten der Verkehrsorganisation in Städten, Wissenschaft und Technik im Straßenwesen 15, Sonderreihe des Informationsheftes „Das Straßenwesen“, Berlin 1973
- (4) Nündel, W., Wiltzsch, G.: Die Lichtsignalanlagen der Nord-Süd-Verbindung in Dresden, Die Straße 11 (1971) 7, S. 316...317
- (5) Rüger, S.: Aufgaben der Verkehrsorganisation im städtischen Personenverkehr, DDR-Verkehr 6 (1973) 3, S. 100...104; 4, S. 167...170
- (6) Rüger, S.: Betriebstechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr, Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1974
- (7) Schulze, D.: Gesetzmäßigkeiten im Straßenbahn-Betriebsablauf an Knotenpunkten, Diplomarbeit an der Arbeitsgruppe Betriebstechnik der Verkehrsmittel der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden 1971
- (8) Voigt, W., Kühnelt, W.-D., Glass, M.: Zeitmessungen im Straßenbahnbetrieb auf der Nord-Süd-Verbindung in Dresden, Die Straße 13 (1973) 12, S. 493...500
- (9) Voigt, W.: Die Straßenbahn in der Grünen Welle, Die Straße 1 (1974) 1, S. 4...13.

(Fortsetzung von Seite 3)

In Berlin, der Abschluß des Ausbaues der F 111 Ahlbeck-Walgast, die Inbetriebnahme weiterer Abschnitte der Westtangente Magdeburg, der Ausbau der F 2/95 im Stadtgebiet von Leipzig und der Zwischenausbau zahlreicher Straßenabschnitte im Zuge von Fernverkehrsstraßen in den Bezirken Karl-Marx-Stadt, Gera und Erfurt herauszustellen.

Die Verwirklichung der hohen Planziele im Straßenwesen im letzten Jahr des Fünfjahresplanes 1971/75 erfordert von allen beteiligten Arbeitern, Meistern und Ingenieuren, daß sie ihr ganzes fachliches Können, ihre schöpferische Initiative und ihr politisches Wissen in den Dienst dieser großen Aufgabe stellen.

Die Ergebnisse des Jahres 1975 werden maßgeblich das Schrittmäß, den Umfang und die Zielsetzung des kommenden Fünfjahresplanes 1976/80 im Straßenwesen mitbestimmen.