

# Verlustzeitenbasierte LSA-Steuerung eines Einzelknotens

Robert Oertel, Peter Wagner, Jürgen Krimmling und Matthias Körner

Neue Methoden zur Verkehrsdatenerfassung wie die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, der Floating Car-Ansatz und die Videodetektion eröffnen die Möglichkeit, neue Verfahren zur verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagensteuerung zu realisieren. In dem Beitrag wird ein Verfahren beschrieben, das aus diesen Quellen Daten in Form von Fahrzeugverlustzeiten direkt zur Steuerung eines Einzelknotens verwendet. Die robuste Ausgestaltung des Verfahrens sorgt dabei dafür, dass auch mit einer lückenhaften Datenlage, wie z. B. aufgrund geringer Ausstattungsdaten kommunikativer Fahrzeuge, angemessen umgegangen werden kann. Mit Hilfe einer mikroskopischen Simulationsstudie wird nachgewiesen, dass das neue Verfahren bei der Qualität des Verkehrsablaufs das gleiche Niveau wie eine traditionelle Zeitlückensteuerung erreicht oder dieses unter bestimmten Bedingungen sogar übersteigt. Mit abnehmender Ausstattungsrate ergibt sich dabei allerdings ein Qualitätsverlust, der ebenfalls mit Hilfe der mikroskopischen Simulation quantifiziert wird und wichtige Erkenntnisse für einen möglichen Praxistest liefert.

State-of-the-art traffic data sources like Car-to-Infrastructure communication, Floating Car Data and video detection offer great new prospects for vehicle-actuated traffic signal control. Due to this, the article deals with a recent approach which uses vehicles' delay times for real-time control of traffic signals at an isolated intersection. One of the strengths of the new approach is that it can handle also incomplete data sets, e.g. caused by low penetration rates of vehicles equipped with Car-to-Infrastructure communication technology, in an appropriate manner. Based on a microscopic simulation study the high quality of this innovative approach is demonstrated, which is equal or even outperforms the well-known headway-based control. However, a decreasing penetration rate of equipped vehicles means a reduced quality of signals' control, which is quantified in the microscopic simulation study, too, and provides useful information for tests in the field.

Verfasserschriften:  
Dipl.-Ing. R. Oertel,  
robert.oertel@dlr.de,  
Dr. rer. nat. P. Wagner,  
peter.wagner@dlr.de,  
Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt e.V.,  
Institut für Verkehrssystem-  
technik,  
Rutherfordstraße 2,  
12489 Berlin;  
Prof. Dr.-Ing. J. Krimmling,  
juergen.krimmling@  
tu-dresden.de,  
Dipl.-Ing. M. Körner,  
matthias.koerner@tu-  
dresden.de,  
Technische Universität  
Dresden,  
Professur für Verkehrsleit-  
systeme und -prozessauto-  
matisierung,  
Andreas-Schubert-Straße 23,  
01062 Dresden

## 1 Einleitung

Lichtsignalanlagen (LSA) sollen Warte- und Verlustzeiten durch eine geschickte Freigabezeitverteilung gering halten. Im Fall eines Einzelknotens wird zu diesem Zweck häufig eine verkehrsabhängige Zeitlückensteuerung angewendet. Dabei misst ein typischer Weise 30...50 m stromaufwärts von der LSA platzierter Induktionsschleifendetektor die sogenannte Zeitlücke  $\tau$ , also die Zeit, die seit dem Passieren des letzten Fahrzeuges verstrichen ist. Ist diese Zeitlücke größer als ein kritischer Wert  $\tau_c$ , wird unter Beachtung der bereits verstrichenen Freigabezeit  $g$  und einer minimal zulässigen Freigabezeit  $g_{\min}$  eine laufende Phase beendet. Alternativ bedingt auch die Überschreitung einer maximal zulässigen Freigabezeit  $g_{\max}$  den Phasenwechsel:

$$((\tau > \tau_c) \text{ UND } (g > G_{\min})) \text{ ODER } (g > g_{\max}) \quad (1)$$

Dieses Steuerungsverfahren, das im realen Einsatz noch um Informationen aus zusätzlichen Induktionsschleifendetektoren,

um Angaben zum vorherrschenden Schwerverkehrsanteil oder um den Belegungsgrad erweitert werden kann, hat sich über die Jahrzehnte seines Einsatzes als sehr robust und effizient erwiesen und sich so zu einem De-facto-Standard entwickelt. Bei der Einbindung in eine Koordination mit korrelierten Fahrzeugankünften muss die Steuerungslogik für eine entsprechend effiziente Funktionsweise z.B. unter Nutzung von Rahmenplänen anders angelegt werden, was eine echte Herausforderung darstellt, die derzeit unter verschiedenen Aspekten diskutiert wird (Friedrich 2007; Lämmer et al. 2009).

In den letzten Jahren sind neue Sensoriksysteme entwickelt worden, die bisher nicht erfassbare Verkehrskenngrößen verfügbar machen. Besonders die kontinuierliche Fahrzeugverfolgung und die daraus ableitbaren Größen bieten hier vielfältige Möglichkeiten. Bisher werden diese Systeme dabei überwiegend für das Verkehrsmonitoring und für strategische Entscheidungen auf verschiedenen Ebenen des

Straßenverkehrsmanagements genutzt, nicht aber für die unmittelbare Echtzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen. Diesem Anwendungsfeld kann dabei zukünftig durchaus steigendes Interesse beigemessen werden, schließlich suggerieren viele dieser neu erfassbaren Kenngrößen und Systeme einen Zusatznutzen und werden vermutlich breitenwirksam und kostengünstig verfügbar sein.

Vor diesem Hintergrund wurde in (Wagner et al. 2009) die Frage gestellt, wie eine verkehrsabhängige Steuerung zu realisieren ist, wenn keine herkömmlichen Detektoren zum Einsatz kommen, sondern die Fahrzeuge selbst die Detektoren darstellen und beispielsweise mit Hilfe einer Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation dem LSA-Steuergerät Informationen über ihre aktuelle Position, ihre aktuelle Geschwindigkeit und ihren Fahrtrichtungswunsch mitteilen können. Die in (Wagner et al. 2009) gefundene Lösung diese Trajektorientierten wieder auf Kenngrößen zu reduzieren, wie sie auch von normalen Induktionsschleifendetektoren erhoben werden,

also praktisch eine Überführung in virtuelle Zählschleifen, ist dabei ein erster Ansatz. Von den sehr detaillierten Informationen, wie sie in den Trajektorien der Fahrzeuge kodiert sind, wird dabei in Folge des Rücktransformationsschrittes allerdings noch kein Gebrauch gemacht.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, mit Hilfe neuer Datenquellen bisher nicht erfassbare Verkehrskenngrößen zu erheben und damit ohne Umwege eine Lichtsignalanlage direkt verkehrsabhängig zu steuern. Konkret sollen die Verlustzeiten der einzelnen Fahrzeuge als Steuerungsgröße dienen, welche sich beispielsweise aus einer Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, aus Floating Car Daten oder aus einer Videodetektion generieren lassen. Interessante Fragestellungen, die in diesem Beitrag nun zur Diskussion gestellt werden, sind dabei folgende:

- Wie ist ein solches verlustzeitenbasiertes Steuerungsverfahren grundsätzlich aufzubauen?
- Wie lässt es sich robust ausgestalten, damit es mit den verschiedenen Verlustzeitdatenquellen optimal zusammenarbeitet?
- Wie gut funktioniert es im Vergleich mit konventionellen Verfahren?

## 2 Verlustzeitenbasierte LSA-Steuerung

### 2.1 Allgemeine Grundlagen

Fahrzeugankünfte an einem isolierten Knoten haben oft einen stochastischen Charakter, der insbesondere aufgrund bestehender Abhängigkeiten in Straßennetzwerken in seinem Grad mehr oder weniger stark variieren kann. Die Aufgabe einer LSA-Steuerung besteht darin, diese stochastischen Schwankungen zu erkennen und durch geeignete Freigabezeitenanpassung darauf zu reagieren. Für eine Festzeitsteuerung bedeutet dies, dass die Freigabezeiten stets etwas größer gewählt werden müssen als im statistischen Mittel notwendig wäre (Lämmer 2007; FGSV 2010). Dies ist notwendig, um die kritische

Situation einer stochastisch bedingten, überdurchschnittlichen Ankunftsfolge ausgleichen zu können. Damit einhergehend bildet sich eine ungenutzte Zeitreserve aus. Verkehrsabhängige Steuerungsverfahren vermeiden dies, da sie stochastische Schwankungen im Ankunftsstrom detektieren und sich daran geeignet adaptieren können.

Die Zeitlücke als Detektionsgröße bildet zu diesem Zweck einen geeigneten Indikator, da sie das Rauschen im Ankunftsstrom widerspiegelt. Deutlich wird das bei der Betrachtung der Auflösung eines Rückstaus infolge einer Sperrzeit: Nach Freigabebeginn passieren die zuvor gestauten Fahrzeuge den Detektor dicht hintereinander. Die gemessenen Zeitlücken sind typischerweise klein und annähernd konstant. Nachdem der Rückstau abgebaut ist, können alle nachfolgenden Fahrzeuge entsprechend ihrer Ankunftsverteilung wieder frei zufließen. Daher verlieren die Zeitlücken den konstanten Charakter und werden wieder stochastisch. Genau dieser Zeitpunkt des kompletten Rückstauabbaus und der damit verbundene Übergang von konstant kleinen zu stochastischen Zeitlücken wird nun direkt in einer Logik nach Gleichung (1) durch Prüfung auf Überschreitung einer kritischen Zeitlücke zur Steuerung genutzt.

Grenzen sind diesem Prinzip allerdings bei hohen Verkehrsstärken gesetzt, da die benötigte Trennschärfe zwischen den Zeitlücken dann naturgemäß abnimmt und die gewöhnliche verkehrsabhängige Steuerung durch definierte Maximalfreigabezeiten im Großteil der Umläufe nur noch als Festzeitsteuerung agieren kann (Friedrich 1997). Damit wird deutlich, dass die Legitimation verkehrsabhängiger Steuerungsverfahren einerseits auf dem Rauschen der Ankunftssituation beruht, andererseits das Rauschen aber genauso Grundlage für die uneingeschränkte Funktionsfähigkeit solcher Verfahren ist.

Von Interesse für den Entwurf einer verlustzeitenbasierten LSA-Steuerung ist nun, dass bei dem beschriebenen Rückstauabbau nicht nur die Zeitlücken zum Ende

hin wieder stochastischen Charakter annehmen, sondern gleichzeitig auch alle nachfolgenden, behinderungsfreien Fahrzeuge in einer Knotenzufahrt eine Verlustzeit nahe null haben. Dieser Umstand lässt sich unmittelbar in ein neuartiges Prinzip zur Steuerung überführen.

### 2.2 Steuerungsprinzip

Der Ansatz besteht darin anstelle der Zeitlücken die Verlustzeiten der einzelnen Fahrzeuge während der Annäherung an den Knoten zu messen und diese direkt zur Steuerung zu verwenden. Die Freigabe einer Knotenzufahrt wird genau dann beendet, wenn dort der Rückstau abgebaut und damit alle Fahrzeuge mit Verlustzeiten abgeflossen sind. Veranschaulicht ist dieses Prinzip im Bild 1, wo die Fahrzeuge, die während der Sperrzeit ( $t_1$ ) Verlustzeiten akkumuliert haben, in der nachfolgenden Freigabezeit ( $t_2$ ) abfließen und den Phasenabbruch ( $t_3$ ) bedingen.

Dieses Prinzip lässt sich nun in Anlehnung an Gleichung (1) in eine simple Steuerungslogik überführen. Die Regel (Wagner 2009) hierbei lautet, dass die Freigabe für eine Knotenzufahrt dann abgebrochen wird, wenn unter Beachtung einer minimal und maximal zulässigen Freigabezeit ( $g_{min}$ ,  $g_{max}$ ), die gemessene Verlustzeit  $d$  eines Fahrzeugs kleiner gleich einer kritischen Verlustzeit  $d_c$  ist:

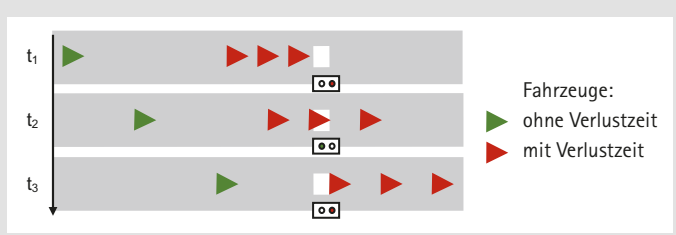
$$((d \leq d_c) \text{ UND } (g > g_{min})) \text{ ODER } (g > g_{max}) \quad (2)$$

Die Verlustzeit  $d$  bezieht sich auf eine ortsabhängig zu definierende Wegstrecke vor der Haltelinie. Die minimal zulässige Verlustzeit  $d_c$  liegt nahe null, muss aber nicht exakt null sein und ist in realen Situationen ebenfalls an die Gegebenheiten vor Ort anzupassen. Ein mit dieser Logik nach Gleichung (2) gesteuerter Einzelknoten fertigt den Verkehr dabei ähnlich effizient und unter bestimmten Bedingungen partiell sogar besser ab als eine Zeitlückensteuerung, wie jüngste Arbeiten zeigen (Oertel 2009; Wagner 2009; Oertel, Wagner 2011). Im Abschnitt 3 wird dies mit Hilfe der entsprechenden Simulationsergebnisse demonstriert.

### 2.3 Verlustzeiterhebung

Unter der Verlustzeit ist im Allgemeinen die zusätzliche Zeit zu verstehen, die zum Zurücklegen einer Strecke in Folge von Verzögerung gegenüber einem Idealfall entsteht. Bezogen auf eine Lichtsignalanlage treten Verlustzeiten in einer Knotenzufahrt stets dann auf, wenn der Verkehrs-

Bild 1: Prinzip der verlustzeitenbasierten Steuerung





Wieso sehe ich hier  
auf einmal  
jeden Tag Grün?



## Unsere Lösungen für den Stadtverkehr: Weniger Staus, weniger Lärm, weniger Abgase

Die Straßen bleiben gleich, der Verkehr nimmt zu – und trotzdem kommen alle schneller voran! In Münster haben wir 24 Kreuzungen auf einem 6 Kilometer langen Straßenabschnitt mit einer dynamischen Grünen Welle ausgerüstet. Damit sind die extrem häufigen Ampel-Stops auf dieser wichtigen Verkehrsachse vorbei. PKW wie auch Busse kommen nun um 35 % schneller voran, brauchen dabei pro Werktag 2500 Liter weniger Kraftstoff und blasen jährlich über 1000 Tonnen weniger CO<sub>2</sub> in die Luft. Mehr: [www.siemens.com/mobility](http://www.siemens.com/mobility)

Answers for mobility

**SIEMENS**

fluss durch die Signalbilder gegenüber dem Idealfall einer unbehinderten Durchfahrt abgebremst wird. Für das einzelne Fahrzeug  $i$  muss die aktuell gefahrene Geschwindigkeit  $v_i$  demnach unterhalb der dort typisch gefahrenen Geschwindigkeit  $v_{lim}$  liegen. Bei kurz gewählter Zeitintervalllänge  $\Delta t$  zwischen zwei Geschwindigkeitsmessungen lässt sich die Verlustzeit eines Fahrzeugs wie folgt bestimmen:

$$d_i = \Delta t \left( 1 - \frac{v_i}{v_{lim}} \right) \quad (3)$$

Bei längeren Zeitintervallen kann  $v_i$  durch die mittlere Geschwindigkeit über die Zeitintervalllänge entsprechend ersetzt werden.

Unter Berücksichtigung, dass Fahrzeuge im freien Verkehr möglicher Weise schneller fahren als durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung erlaubt, lässt sich die Methode noch etwas robuster gestalten, indem die typisch gefahrene Geschwindigkeit  $v_{lim}$  auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit und gegebenenfalls negativ ermittelte Verlustzeiten auf null gesetzt werden:

$$d_i = \max \left\{ 0, \Delta t \left( 1 - \frac{v_i}{v_{lim}} \right) \right\} \quad (4)$$

Unter Aufsummierung der Verlustzeiten der einzelnen Fahrzeuge lässt sich dementsprechend die angesammelte Verlustzeit in einer Knotenzufahrt ermitteln:

$$d = \sum_{i=1}^{n(t)} d_i \quad (5)$$

Auf dieser Grundlage können aus den Detektionswerten der neuen Datenquellen die zur Steuerung der LSA benötigten Verlustzeiten bestimmt werden. In Abhängigkeit des Systems kann sich die Erfassung dabei im Detail unterscheiden:

- Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation: Die Fahrzeuge senden ihre aktuell gefahrene Geschwindigkeit kontinuierlich und direkt an die LSA.
- Floating Car Datensätze: In regelmäßigen Intervallen werden Zeit-Weg-Koor-

dinaten über eine Zentrale an die LSA übermittelt.

- Videodetektion: Kameras bestimmen fortlaufend die Fahrzeuggeschwindigkeiten in einem Feld, welches den LSA-Zulauf abdeckt.

Zu beachten sind natürlich Latenzzeiten bei der Übertragung der erfassten Daten hin zur LSA. Ergänzend sei anzumerken, dass grundsätzlich jeder Detektor, der die Geschwindigkeiten der zufließenden Fahrzeuge messen kann, für den beschriebenen Ansatz anwendbar ist. Entscheidend ist dabei die räumliche und zeitliche Detektorabdeckung des Zufahrtsbereichs. So ist beispielsweise auch eine Erfassung mit Doppelinduktionsschleifen möglich. Allerdings werden hierbei nur Fahrzeuge als verzögert erkannt, deren Verlustzeiten auch tatsächlich über den punktuell fixierten Induktionsschleifen entstehen.

### 2.4 Robuste Steuerungsausgestaltung

Der Anteil der tatsächlich erfassbaren Fahrzeuge und Verlustzeiten kann je nach Datenquelle stark variieren. Mit Ausnahme der Videodetektion, die bereits heute eine fast vollständige Erkennung erreichen könnte, sind die Erfassungsgrade der anderen Quellen sehr gering, was vermutlich auch noch einige Zeit so bleiben wird. Vor diesem Hintergrund muss eine LSA-Steuerung mit verlustzeitbasiertem Ansatz so robust ausgelegt werden, dass auch bei einer lückenhaften Datenlage eine angemessene Freigabezeitverteilung gewährleistet ist.

Zu diesem Zweck wird die LSA-Steuerung aus insgesamt drei Bausteinen aufgebaut (Oertel 2009; Wagner, Oertel 2010). Wie im Bild 2 dargestellt, kommt jeder Baustein situationsbedingt zum Einsatz, beinhaltet unterschiedliche Datenauswertestrategien und liefert als Ergebnis jeweils eine anwendbare Freigabezeit:

- Verlustzeitenbasierte Logik: Ist die Datenlage ausreichend, wird die verlustzeitenbasierte Logik nach Gleichung (2)

- Rückstaulängenschätzer: Liegen zwar Datensätze vor, sind diese aber zu lückenhaft, um nach der verlustzeitenbasierten Logik zu steuern, so wird der Rückstau geschätzt und in eine passende Freigabezeit überführt. Die Rückstaulängenschätzung kann dabei beispielsweise nach (Priemer, Friedrich 2008) erfolgen.

- Freigabezeitenspeicher: Sollten kurzzeitig gar keine Daten vorliegen, können historische Freigabezeiten aus einem Speicher entnommen werden. Dieser Speicher aktualisiert sich selbstständig wann immer eine Freigabezeit durch die verlustzeitenbasierte Logik beeinflusst wurde.

Die Verknüpfung dieser drei Bausteine erfolgt fließend nach dem Prinzip der Informationsaufwertung: Zu Beginn der Freigabe wird zunächst ein Wert aus dem Speicher als Basisfreigabezeit entnommen. Sobald eine Rückstaulängenschätzung möglich ist, wird der Basiswert durch den Schätzwert ersetzt. Sind anschließend zudem Verlustzeiten bestimmbar, wird der Schätzwert verworfen und die Freigabezeit ausschließlich über die gemessenen Verlustzeiten beeinflusst. Eine starre Definition ab welchem Fahrzeugerfassungsgrad welcher Baustein anzuwenden ist, wird durch diese Art der Verknüpfung vermieden, was die Flexibilität des Verfahrens erhöht.

## 3 Demonstration in einer Simulation

### 3.1 Simulationsumgebung

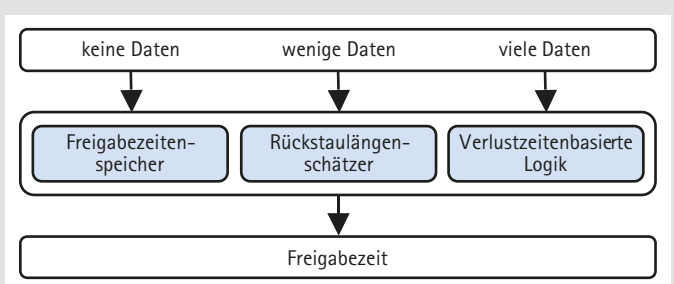
Um die verlustzeitenbasierte LSA-Steuerung auf ihre Funktionsfähigkeit und die Qualität bei der Verkehrsabwicklung zu testen, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. Dafür wurden die mikroskopischen Simulationswerkzeuge VISSIM und das vom DLR entwickelte Open Source Programm SUMO – Simulation of Urban Mobility (SUMO 2011) – verwendet.

Während VISSIM eine sehr komplexe Fahrer-Fahrzeug-Einheit nutzt, ist das in SUMO verwendete Modell (Krauß 1998) kompakt gehalten. Geschwindigkeit und Position eines Fahrzeuges  $i$  ergeben sich dabei wie folgt und sind für alle Fahrzeuge parallel zu aktualisieren:

$$v_i(t + \Delta t) = \min \{ v_{safe}, v_{max}, v_i(t) + a\Delta t + \sigma_a \Delta t \xi(t) \}, v_i(t + \Delta t) \geq 0, \quad (6)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta t v_i(t + \Delta t). \quad (7)$$

Bild 2: Komponenten der verlustzeitenbasierten Steuerung



Dabei ist die sichere, kollisionsfreie Geschwindigkeit gegeben durch:

$$v_{\text{safe}} = -b\tau + \sqrt{(b\tau)^2 + v_{i-1}^2 + 2b(x_{i-1} - x_i - l)}. \quad (8)$$

Die Parameter des Modells sind die maximale Beschleunigung  $a$ , das Beschleunigungsrauschen  $\sigma_a$ , die bevorzugte Bremsverzögerung  $b$ , der bevorzugte minimale zeitliche Abstand  $\tau$  zum vorausfahrenden Fahrzeug und die Fahrzeuglänge  $l$ . Die Zeitschrittweite und die maximale Höchstgeschwindigkeit sind durch  $\Delta t$  und  $v_{\text{max}}$  gegeben;  $\xi$  ist eine Zufallszahl im Intervall  $[-1, 1]$ .

Trotz dieses einfacheren Modells lassen sich nur kleine Differenzen zwischen dem Verhalten von VISSIM und SUMO an Kreuzungen finden, wie eine ausführliche Untersuchung (Oertel 2009) feststellen konnte. Dies gilt zumindest für die zur Steuerung relevanten Größen wie die Verteilung von Zeitlücken und Verlustzeiten. Modelliert wurde im Folgenden ein idealisierter Vierarmknoten, wie er im Bild 3 dargestellt ist. Dieser wurde in vielen Punkten gegenüber der Realität vereinfacht, was die Vorteile einer kurzen Simulationslaufzeit und der einfachen Interpretation der Simulationsergebnisse besitzt. Die im Detail getroffenen Annahmen sind folgende:

- Die emittierten Verkehrsnachfragen  $q_1$  und  $q_2$  sind für einen isolierten Knoten poisson-verteilt und hier für gegenüberliegende Quellen identisch gewählt.
- Die zwei sich dabei kreuzenden Ströme werden in zwei Phasen abgewickelt.
- Die minimale Freigabezeit und die maximale Umlaufzeit sind laut RiLSA (FGSV 2010) auf 5 s bzw. 120 s begrenzt.
- Die Zwischenzeiten beim Wechsel zwischen den beiden Phasen sind einheitlich mit 5 s definiert.
- Es darf nur geradeaus gequert werden und die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50 km/h.
- Der Simulationszeitraum beträgt  $10^5$  s, also mehr als einen gesamten Tag.

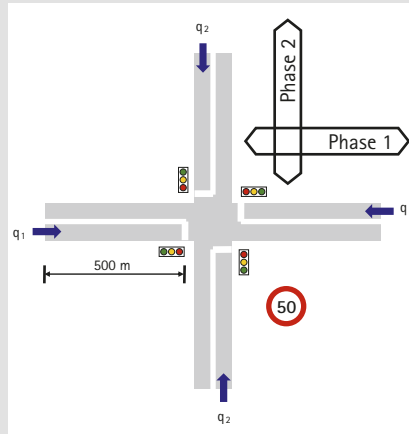


Bild 3: Modellierter Einzelknoten

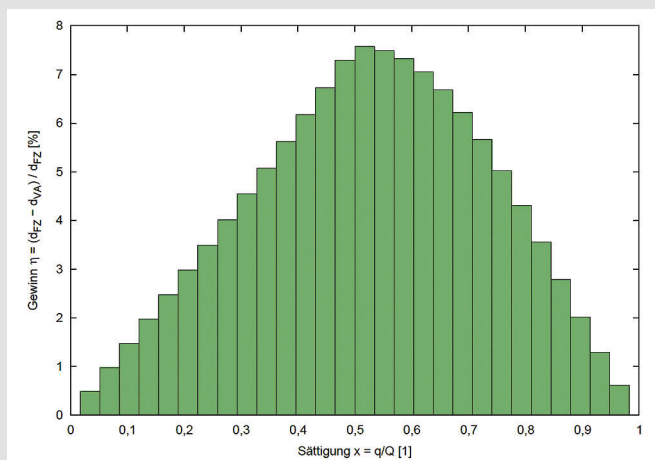


Bild 4: Beispiel für den Verlustzeitgewinn einer verkehrsabhängigen Steuerung gegenüber einer optimierten Festzeitsteuerung nach dem HCM

### 3.2 Referenzsteuerungen

Zur Qualitätsbewertung der verlustzeitenbasierten LSA-Steuerung wurden am Untersuchungsknoten eine optimierte Festzeitsteuerung und eine verkehrsabhängige Zeitlückensteuerung als Vergleich herangezogen, wobei als Bewertungsgröße im Folgenden stets die mittlere Verlustzeit je Fahrzeug betrachtet wird.

Eine erste grobe Abschätzung des Gewinns einer verkehrsabhängigen Steuerung gegenüber einer optimierten Festzeitsteuerung wird in diesem Zusammenhang bereits im amerikanischen Highway Capacity Manual (TRB 2000) gemacht. Im günstigsten Fall sind knapp 10% Verlustzeitgewinn zu realisieren. Das Bild 4 zeigt

für dieses Beispiel den rechnerischen Gewinn  $\eta$  nach Gleichung (9) mit den Verlustzeiten  $d_{VA}$  (verkehrsabhängige Steuerung) und  $d_{FZ}$  (optimierte Festzeitsteuerung) als Funktion der Sättigung  $x = q/Q$ :

$$\eta = \frac{d_{FZ} - d_{VA}}{d_{FZ}} \quad (9)$$

Die in der Simulation als erste Referenz verwendete Festzeitsteuerung wurde dahingehend optimiert, dass die für die Nachfrage in einer Knotenzufahrt  $i$  jeweils optimale Freigabezeit  $G_i$  gemäß (Webster 1958) verwendet wurde, wie sie auch in

den entsprechenden Regelwerken HBS, HCM oder RiLSA (FGSV 2001; TRB 2000; FGSV 2010) zu finden ist:

$$G_i = \frac{(C - L) q_i}{\sum_i q_i} \quad (10)$$

Die optimale Umlaufzeit  $C$  für den Knoten kann ebenfalls aus HBS, HCM oder RiLSA entnommen werden:

$$C = \frac{5 + 1,5 L}{1 - \sum_i \frac{q_i}{Q}} \quad (11)$$

Die Parameter in diesen Gleichungen sind dabei die Verkehrsnachfrage  $q_i$ , die Sättigungsverkehrsstärke  $Q$  und die Summe der Umschaltverluste  $L$  durch die Phasenwechsel.

# Zertifizierung zum Sicherheitsauditor von Straßen

<http://www.adh-sas.de>

Bauhaus-Universität Weimar:  
Bergische Universität Wuppertal:

Außerortsstraßen und Ortsdurchfahrten  
Hauptverkehrsstraßen, Erschließungsstraßen und OD

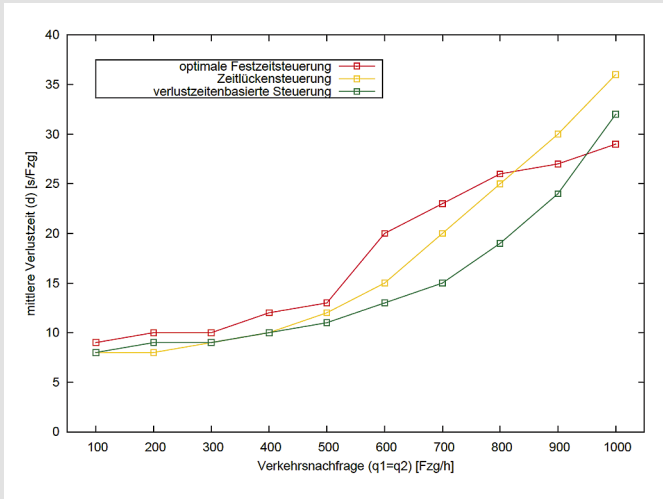


Bild 5: Vergleich der mittleren Verlustzeit im Falle einer symmetrischen Nachfrage und der vollständigen Erfassung aller Fahrzeugverlustzeiten zur Steuerung

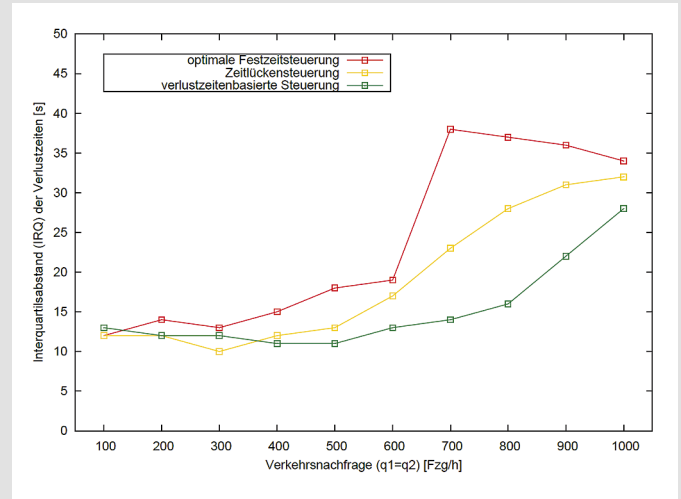


Bild 6: Vergleich des Interquartilsabstands der Verlustzeiten im Falle einer symmetrischen Nachfrage und der vollständigen Erfassung aller Fahrzeugverlustzeiten zur Steuerung

Das Vorgehen für jede Nachfragesituation die optimalen Freigabe- und Umlaufzeiten zu berechnen, ist natürlich eine Abweichung von der Realität, da einer in Festzeit betriebenen Lichtsignalanlage typischerweise nur wenige feste Programme zur Auswahl stehen. Dennoch ist dieses Vorgehen sinnvoll, um einen realistischen Vergleich zwischen Festzeit- und verkehrsabhängiger Steuerung zu ermöglichen. Bei der direkten Gegenüberstellung dieser beiden Steuerungen unterschätzt das hier gewählte Vorgehen allerdings die Gewinne durch die verkehrsabhängige Steuerung, welche in der Praxis für einen typischen Tag noch größer sind. Die in der Simulation als zweite Referenz verwendete Zeitlückensteuerung wurde gemäß der Logik nach Gleichung (1) realisiert. Die benötigten Zeitlücken  $\tau$  wurden dafür 30 m vor den Haltelinien erhoben

und die Abbruchzeitlücke  $\tau_c$  wurde nach RiLSA (FGSV 2010) mit 2 s definiert.

### 3.3 Simulationsergebnisse

Zunächst wurden die verlustzeitenbasierte Steuerung nach Logik (2) mit einer kritischen Verlustzeit  $d_c = 0$  s und die beiden Referenzen für den einfachen Fall verglichen, dass alle Nachfragewerte identisch gewählt sind ( $q_1 = q_2$ ). Die Verlustzeit eines jeden Fahrzeugs war durch die Anlage zur Steuerung erfassbar, wie dies annähernd für die Videodetektion zutrifft. Als Funktion einer steigenden Nachfrage ergibt sich dabei für alle drei Steuerungen eine zunehmende mittlere Verlustzeit je Fahrzeug, wobei die verlustzeitenbasierte Steuerung insgesamt besser abschneidet als die beiden Referenzen (Bild 5). Besonders deutlich wird dieser Unterschied im

Bereich einer mittleren bis hohen Verkehrsnachfrage. Die Zeitlückensteuerung kann hier durch die Fähigkeit zum Ausgleich stochastischer Schwankungen bereits einen Vorteil gegenüber der optimierten Festzeitsteuerung erzielen. Dieser vergrößert sich noch einmal beim Einsatz der verlustzeitenbasierten Steuerung. Grund dafür ist die bereits vorgenannte abnehmende Trennschärfe der Zeitlücken bei zunehmender Verkehrsnachfrage: Fahrzeuge folgen zwar dicht aufeinander mit sehr kleinen Zeitlücken, können aber trotzdem schon verlustfrei den Knoten queren. Die Folge ist ein früherer Phasenabbruch der verlustzeitenbasierten Steuerung im Vergleich zur Zeitlückensteuerung. Insgesamt wird damit in dem betrachteten Fall nicht nur die mittlere Verlustzeit durch den Einsatz der verlustzeitenbasierten Steuerung im Vergleich zu den beiden Referenzen geringer, sondern auch die Streuung der einzelnen Messwerte. Beleg dafür ist ein kleinerer Interquartilsabstand (Bild 6).

Bei weiteren Betrachtungen, bei denen nach wie vor die Verlustzeiten aller Fahrzeuge zur Steuerung erfassbar waren, nun aber die Verkehrsnachfragen ( $q_1$  und  $q_2$ ) variiert wurden, stellen sich im Vergleich zu den beiden Referenzen teilweise große Gewinne bei der mittleren Verlustzeit je Fahrzeug von bis zu 90 % ein. Gegenüber der optimierten Festzeitsteuerung (Bild 7) ist dieser Gewinn naturgemäß größer als gegenüber der Zeitlückensteuerung (Bild 8), da die Zeitlückensteuerung bereits verkehrsabhängig agiert. Dies gilt für Bereiche mittlerer bis großer und stark asymmetrischer Verkehrsnachfragen unterhalb

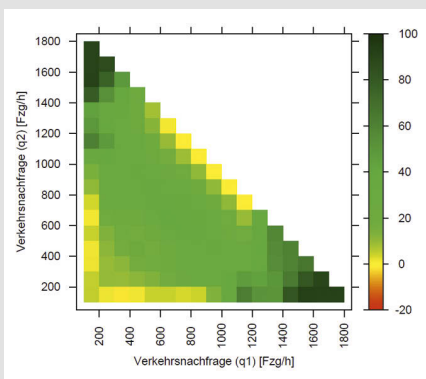


Bild 7: Gewinn in mittlerer Verlustzeit der verlustzeitenbasierten Steuerung gegenüber der optimierten Festzeitsteuerung im Falle einer variablen Nachfrage und der vollständigen Erfassung aller Fahrzeugverlustzeiten zur Steuerung

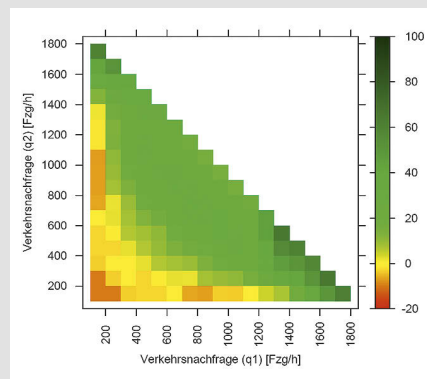


Bild 8: Gewinn in mittlerer Verlustzeit der verlustzeitenbasierten Steuerung gegenüber der Zeitlückensteuerung im Falle einer variablen Nachfrage und der vollständigen Erfassung aller Fahrzeugverlustzeiten zur Steuerung

der Sättigung. Ursache dafür ist, dass die mittleren Freigabezeiten der verlustzeitenbasierten Steuerung im Vergleich zu den beiden Referenzen kleiner sind und damit häufiger die Phase gewechselt wird. Bei einer stark asymmetrischen Verkehrsnachfrage ist diese häufigere Freigabe für die nachfrageschwächeren Knotenzufahrten von besonderem Vorteil und verdeutlicht nochmals den unmittelbaren Einfluss der abnehmenden Trennschärfe der Zeitlücken in den nachfragestärkeren Knotenzufahrten. Für sehr kleine Verkehrsnachfragen und im Bereich der Sättigung lassen sich keine Gewinne erzielen, da die verlustzeitenbasierte Steuerung dann aufgrund der minimal und maximal definierten Freigabezeiten in eine Festzeitsteuerung zurückfällt.

Von Interesse war nun noch der Fall, dass nicht mehr alle Fahrzeugverlustzeiten, sondern nur noch ein bestimmter Anteil bekannt war und zur verlustzeitenbasierten Steuerung verwendet werden konnte. Dies entspricht beispielsweise der Situation einer Verlustzeiterfassung mittels Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation oder

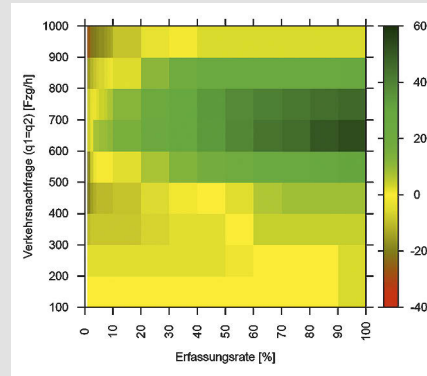


Bild 9: Gewinn in mittlerer Verlustzeit der verlustzeitenbasierten Steuerung gegenüber der optimierten Festzeitsteuerung im Falle einer symmetrischen Nachfrage und einer sinkenden Erfassungsrate zur Steuerung verfügbarer Verlustzeiten

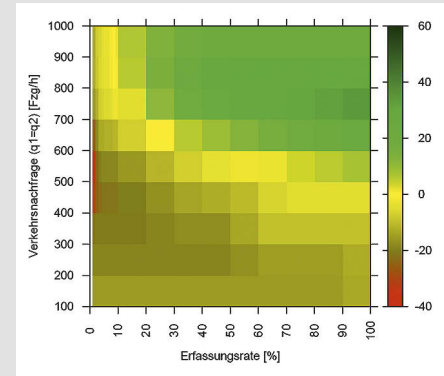
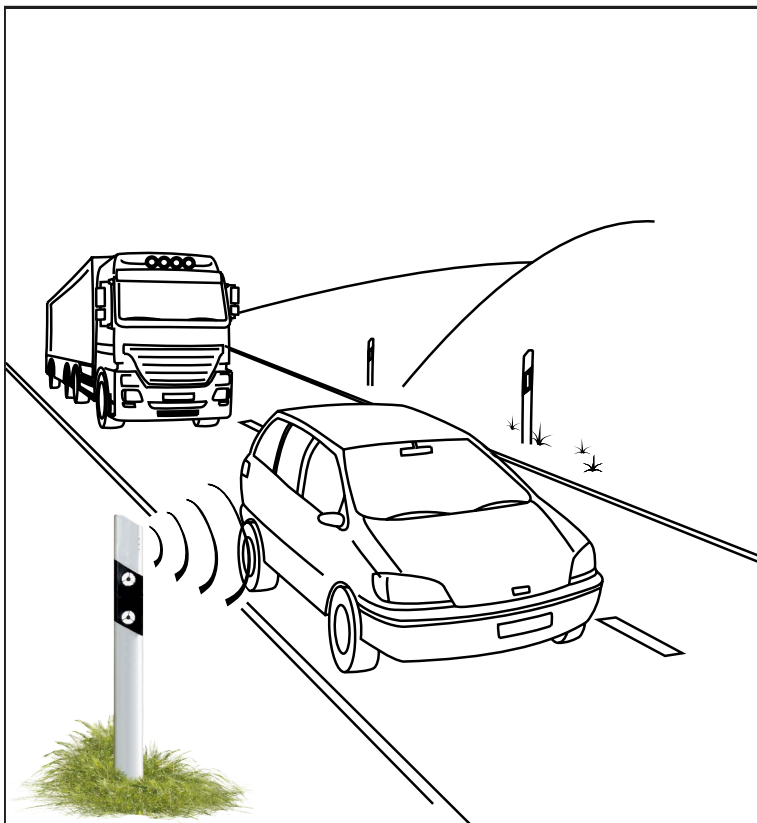


Bild 10: Gewinn in mittlerer Verlustzeit der verlustzeitenbasierten Steuerung gegenüber der Zeitlückensteuerung im Falle einer symmetrischen Nachfrage und einer sinkenden Erfassungsrate zur Steuerung verfügbarer Verlustzeiten

Floating Car Daten. Bei schrittweiser Absenkung der Erfassungsrate wird dabei deutlich, dass am Modellknoten im symmetrischen Nachfragefall ( $q_1 = q_2$ ) nur ca. 10 % aller Fahrzeugverlustzeiten messbar sein müssen und die Nachfrage nicht unter 500 Fzg/h fallen sollte, damit eine vergleichbare oder bessere Qualität bei der Verkehrsabwicklung gegenüber der opti-

mierten Festzeitsteuerung (Bild 9) und der Zeitlückensteuerung (Bild 10) möglich wird. Dies demonstriert die bereits erwähnte Robustheit der verlustzeitenbasierten Steuerung, schließlich würde eine Zeitlückensteuerung bei störungsbedingter Erfassung nur jedes 10. Fahrzeuges den Verkehr nicht mehr annehmbar abwickeln können.



Geschätzte

**7.492.687**

**Fahrzeuge klassifizieren wir täglich.**

**TOPO+**

Die Verkehrsdatenerfassung TOPO+ prägt seit 2009 den Markt. Das Erfolgsrezept ist die Detektion von Länge, Akustik und Achsabstand. Optional integriert im eigenen Gehäuse oder im Standardleitpfosten.

**Danke, dass Sie uns wertschätzen.**

**RTB**

RTB GmbH & Co. KG | Tel. 05252 9706-0 | [www.rtb-bl.de](http://www.rtb-bl.de)

#### 4 Zusammenfassung

Mit Hilfe neuer Verkehrsdatenquellen wie Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, Floating Car Daten und Videodetektion lässt sich als bisher nicht unmittelbar erfassbare Verkehrskenngröße die Verlustzeit von Fahrzeugen bestimmen. Um diese Verlustzeit zur direkten Steuerung einer Lichtsignalanlage an einem Einzelknoten zu verwenden, wird diese in einem einfachen Verfahren ähnlich einer konventionellen Zeitlückensteuerung verarbeitet. Das Verfahren ist so konstruiert, dass Fahrzeuge, die in einer Knotenzufahrt während der Sperrzeit Verlustzeiten angesammelt haben, während der nachfolgenden Freigabezeit zunächst komplett abfließen können. Damit ist diese Knotenzufahrt dann frei von Verlustzeiten und es folgt unmittelbar der Phasenwechsel. Abbruchkriterium ist dabei also keine indirekt zur Verlustzeitminimierung erhobene Größe wie die Zeitlücke, sondern die aktuell gemessene Verlustzeit der Fahrzeuge selbst. Da nicht jede der neuen Datenquellen die Verlustzeiten aller Fahrzeuge in den Knotenzufahrten vollständig erfassen kann, wird das Verfahren so robust ausgestaltet, dass es mit diesen Schwankungen in der Erfassungsrate umgehen kann. Dafür werden neben dem grundsätzlich verlustzeitenbasierten Ansatz ein Rückstaulängenschätzer und ein Freigabezeiten-speicher eingesetzt. Diese Kombination stellt sicher, dass auch bei schlechter Datenlage jederzeit eine an die Verkehrssituation bestmöglich angepasste Freigabezeit bereitsteht. Im Vergleich mit einer optimierten Festzeitsteuerung und einer herkömmlichen

Zeitlückensteuerung funktioniert das so ausgeführte verlustzeitenbasierte Verfahren bei der Qualität der Verkehrsabwicklung ähnlich effizient oder besser. Dies gilt zumindest für die videobasierte Datenerfassung, wo eine Implementierung in der Realität in Reichweite scheint und damit weitere wertvolle Erfahrungen zur Funktionsweise des Verfahrens gewonnen werden können. Hingegen wird eine alltags-taugliche Umsetzung mittels Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation und Floating Car Daten in größerem Umfang noch auf sich warten lassen, da erforderliche Mindestausstattungsdaten von ca. 10 % mit entsprechender Fahrzeugtechnik in naher Zukunft nicht zu erwarten sind. Unabhängig von der Verkehrsdatenquelle besteht dabei weiterer Forschungsbedarf in den Bereichen Datenübertragung, -auswertung und -verarbeitung im Steuergerät, bei der Erweiterbarkeit auf eine Koordinierung, sowie bei den Auswirkungen der neuen LSA-Steuerung auf andere Parameter wie z.B. Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emission, wobei diese nach ersten Betrachtungen zumindest nicht ansteigen. Diese weiterführenden Untersuchungen sind beispielsweise im Rahmen der neuen Großforschungsanlage AIM – Anwendungsplattform Intelligente Mobilität – (AIM 2011), im Land Niedersachsen vorstellbar. Hier wird die Stadt Braunschweig als Testfeld für Verfahren, Anwendungen und Dienste im Mobilitätsbereich nutzbar gemacht und bietet mit der bestehenden Infrastruktur gute Voraussetzungen für eine Simulationsstudie mit einem komplexeren Knoten und einen ersten Praxisversuch der neuen verlustzeitenbasierten LSA-Steuerung.

#### Literaturverzeichnis

AIM – Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (2011): <http://www.dlr.de/ts/aim>.

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

FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA). FGSV Verlag, Köln.

Friedrich, B. (1997): Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen (Dissertation). Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, TU München.

Friedrich, B. (2007): Großer Plan versus Dschungelprinzip. Straßenverkehrstechnik, 9, Kirschbaum Verlag, Bonn, 449.

Krauß, S. (1998): Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. Report # 98-08, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Köln.

Lämmer, S. (2007): Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken (Dissertation). Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, TU Dresden.

Lämmer, S.; Krimmling, J.; Hoppe, A. (2009): Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken – Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. Straßenverkehrstechnik, 11, Kirschbaum Verlag, Bonn, 714–721.

Oertel, R. (2009): Optimierung einer auf Grundlage von Floating-Car-Datensätzen basierenden Lichtsignalanlagensteuerung (Diplomarbeit). Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, TU Dresden.

Oertel, R.; Wagner, P. (2011): Delay-Time Actuated Traffic Signal Control for Isolated Intersections. In: Proceedings TRB (Transportation Research Board) Annual Meeting 2011, Washington, D.C.

Priemer, Ch.; Friedrich, B. (2008): Optimierung von modellierten Warteprozessen im Rahmen adaptiver Netzsteuerungen durch C2I-Daten. In: Tagungsband HEUREKA '08, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

SUMO – Simulation of Urban Mobility (2011): <http://sumo.sf.net>.

TRB – Transportation Research Board (2000): Highway Capacity Manual (HCM). Washington, D.C.

Wagner, P. (2009): Wartezeitbasierte Steuerung einer einzelnen Lichtsignalanlage (LSA). Patentanmeldeschrift beim Deutschen Patentamt. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin.

Wagner, P.; Amme, F.; Ernst, H.; Forsblad, C.; Michael, M.; Poppe, H.; Ring, D. (2009): Wirksamkeit einer kooperativen Verkehrssteuerung. Straßenverkehrstechnik, 7, Kirschbaum Verlag, Bonn, 434–441.

Wagner, P.; Oertel, R. (2010): Wartezeitbasierte Steuerung einer einzelnen Lichtsignalanlage (LSA) bei lückenhafter Fahrzeugdetektion. Patentanmeldeschrift beim Deutschen Patentamt. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin.

Webster, F.V. (1958): Traffic Signal Settings. In: Road Research Technical Paper No. 39, Her Majesty's Stationery Office, London.

**WEMAS**  
ABSPERRETECHNIK

**TL Leitkegel aus Weich-PVC**

- BAST-geprüft
- Vollretroreflektierend
- einteilig
- extrem formstabil
- Kopf mit Griffmulde
- 750mm, 4,2 kg Gewichtsklasse II
- 750mm, 5,0 kg Gewichtsklasse III

Rücknahme kostenlos, daher keine Entsorgungskosten

WEMAS Absperrentechnik GmbH Edisonstrasse 20  
D-33334 Gütersloh Tel. +49 (0) 5241 - 9370-0  
Fax +49 (0) 5241 - 9370-90  
[www.wemas.de](http://www.wemas.de) - [info@wemas.de](mailto:info@wemas.de)

- Made in Germany -