

## Kraftstoffeinsparungen an Lichtsignalanlagen

FGSV – Arbeitspapier Nr. 17 – Mai 1987

*Der Arbeitskreis „Energieeinsparung an Lichtsignalanlagen“<sup>(1)</sup> hatte im Auftrag des Arbeitsausschusses „Lichtsignalanlagen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen die Aufgabe übernommen, die Möglichkeiten für Kraftstoffeinsparungen durch lichtsignaltechnische Maßnahmen auf der Grundlage bekannter Untersuchungen zu ermitteln. Das hiermit vorgelegte Arbeitspapier orientiert sich am Inhalt der Richtlinien für Lichtsignalanlagen, Ausgabe 1981, und enthält keine Aussagen zu Steuerungsstrategien oder Steuerungskonzeptionen.*

### 1. Allgemeine Kriterien

Die Einsparung an Kraftstoff gewinnt wegen der Verknappung vieler Energieressourcen zunehmend an Bedeutung. Der Zusammenhang zwischen technischen Einflußgrößen und dem Kraftstoffverbrauch ist allerdings sehr komplex und wenig erforscht. Es können deshalb nur grobe Angaben gemacht werden, die helfen können, den Kraftstoffverbrauch niedrig zu halten. Dabei sind mögliche Zielkonflikte, auch zu anderen Auswirkungen der Lichtsignalsteuerung, zu berücksichtigen.

(1) (2)<sup>2)</sup> Lichtsignalanlagen werden nicht aus Gründen der Kraftstoffeinsparung eingerichtet. Wenn allerdings Lichtsignalanlagen eingerichtet oder bestehende Anlagen umgerüstet werden, kann dies auch unter Umweltgesichtspunkten vorgenommen werden, sofern Verbesserungen im Verkehrsablauf erreicht werden, die eine deutliche Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemission bewirken.

Von Einfluß auf den Kraftstoffverbrauch sind

- die Umlaufzeit,
- die Struktur der Signalprogramme,
- das Steuerungsverfahren,
- die Schalt- und Gültigkeitszeiten der Signalprogramme,
- das Umschaltverfahren sowie
- flankierende Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Betrieb der Lichtsignalanlage.

(3) Zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs ist eine größere als die von der Leistungsfähigkeit her mindestens erforderliche Umlaufzeit zu wählen.

(4) Unter dem Gesichtspunkt des Kraftstoffverbrauchs ist eine Zwei-Phasen-Steuerung so lange zu bevorzugen, wie die Anzahl der Halte und die Wartezeiten minimiert werden.

Grundsätzlich sind alle Steuerungsverfahren geeignet, mildernd auf den Kraftstoffverbrauch zu wirken, die den Verkehrsfluß auf

einem gleichmäßigen hohen Geschwindigkeitsniveau ( $\leq v_{zul}$ ) zu halten.

Optimal an die Schwankungen des Verkehrsablaufs angepaßte Schalt- und Gültigkeitszeiten der Signalprogramme tragen ebenfalls zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bei.

(5) Auch durch Einsatz geeigneter Verfahren, die eine möglichst störungsfreie Umschaltung zwischen den Signalprogrammen bewirken, kann der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden.

(6) An flankierenden Maßnahmen ist insbesondere die Anzeige plausibler Geschwindigkeitsempfehlungen zu nennen.

(7) Durch zeitweises Abschalten einzelner Lichtsignalanlagen in verkehrsschwachen Zeiten wird nur geringfügig Kraftstoff eingespart.

### 2. Steuerungskriterien

Die den Kraftstoffverbrauch an Lichtsignalanlagen mitbestimmenden Steuerungskriterien umfassen sowohl die globale Festlegung einzusetzender Steuerungsverfahren als auch die detaillierte Vorgabe geeigneter Zielgrößen. Die Kriterien beziehen sich auf die RiLSA (Ausgabe 1981) Kap. 4 „Steuerungsverfahren“ und auf Kap. 2 „Signalprogrammabrechnung“, hier insbesondere auf die Abschnitte 2.1 und 2.2.

#### 2.1 Wahl des Steuerungsverfahrens

(8) Die Wahl eines geeigneten Steuerungsverfahrens kann insbesondere auch von der Forderung nach Verringerung des Kraftstoffverbrauchs beeinflusst werden.

(9) Das Prinzip der Verkehrsführung dient der Kraftstoffeinsparung, solange durchgehende Verkehrsströme mit hoher Auslastung, aber noch unterhalb der Belastbarkeitsgrenze, bevorzugt abgewickelt werden können.

(10) Das Prinzip der Verkehrsanpassung verringert den Kraftstoffverbrauch bei nicht ausgelasteten Knotenpunkten.

(11) Zur Kraftstoffeinsparung kann auch der alternative oder der kombinierte Einsatz beider Prinzipien sinnvoll sein.

(12) Auch bei gleicher Belastungshöhe, aber unterschiedlicher Verkehrszusammensetzung, kann sich die Schaltung unterschiedlicher Signalprogramme empfehlen, um dadurch Kraftstoff einzusparen.

(13) Eine verkehrsabhängige Steuerung bei der Engstellensignalisierung führt zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs.

(14) In diesem Zusammenhang ist auch der Richtungswechselbetrieb zu nennen, der ebenfalls zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs beitragen kann.

(15) Je mehr die öffentlichen Verkehrsmittel im Straßenraum durch Steuerungsmaßnahmen zu Lasten des individuellen Kraft-

<sup>1)</sup> Bearbeiter: Dipl.-Ing. Boltze, Darmstadt; Prof. Dr.-Ing. Dunker, Karlsruhe; Dipl.-Ing. Everts, Aachen (Leiter); BDir. Dipl.-Ing. Kaemmerer, Düsseldorf; BDir. Dipl.-Ing. Ruhnke, Hamburg

<sup>2)</sup> Die in den Abschnitten 1 bis 4 in Klammern vorangestellten Ziffern stellen den Bezug zu den entsprechenden Absätzen in Abschnitt 5 her.

fahrzeugverkehrs bevorzugt werden, desto größer wird der Kraftstoffverbrauch in der Gesamtrechnung.

## 2.2 Wahl der Zielgröße

(16) Durch Auswahl und Variation der Zielgrößen wird der Kraftstoffverbrauch wesentlich beeinflusst.

(17) Die Größenordnung des Einflusses der Zielgrößen auf den Kraftstoffverbrauch ist unterschiedlich.

Mit der Minimierung der Anzahl der Halte oder der Minimierung der Wartezeit kann Kraftstoff eingespart werden. Ein optimales Ergebnis wird erreicht, wenn es gelingt, eine Kombination aus beiden Zielgrößen zu minimieren.

(18) Mit der Minimierung der Reisezeit kann eine Kraftstoffeinsparung erreicht werden, wenn es gelingt, über längere Strecken eine gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit von 50 bis 60 km/h einzuhalten, und zwar auch unter Inkaufnahme von gelegentlichen Halten.

## 3. Kriterien bei Grünen Wellen

Grüne Wellen entsprechen dem Prinzip der Verkehrsführung, sie beeinflussen den Grad der Kraftstoffeinsparung erheblich. Im einzelnen sind dabei folgende Gesichtspunkte maßgebend:

(19) (20) (21) Bei einer koordinierten Lichtsignalsteuerung wird die Kraftstoffeinsparung im Verlauf der Grünen Wellen in hohem Maße gefördert. Dabei ist der Kraftstoffverbrauch entscheidend von der Optimierung der Freigabezeitversätze abhängig. Besonders günstig wird der Kraftstoffverbrauch, wenn sich durch eine stetige Grünzeitführung ein gleichmäßiger Verkehrsfluß erreichen läßt.

(22) Die beste Progressionsgeschwindigkeit einer Grünen Welle bezüglich des Kraftstoffverbrauchs liegt zwischen 50 und 60 km/h.

(23) Durch Berücksichtigung bedeutender Abbiegeströme und durch Einrichtung Grüner Wellen für querende Straßenzüge ist eine günstige Beeinflussung des Kraftstoffverbrauchs auch im Netz zu erreichen.

(24) Die Begünstigung querender Fußgänger führt zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs, insbesondere wenn bei einem Versatz gegenläufiger Fahrzeuggrünbänder Wartezeiten auf einer Mittelinsel vermieden werden sollen.

## 4. Aufforderung zum Motorabstellen

Weitere Möglichkeiten zur Kraftstoffeinsparung und Schadstoffreduzierung an Lichtsignalanlagen liegen im Fahrverhalten der Kraftfahrer selbst. Hierzu gehören z. B. eine verhaltene Fahrweise und das Abstellen des Motors bei länger dauerndem Rot. Zur Förderung des Motorabstellens sind Zusatzeinrichtungen entwickelt worden, die z. B. in Form von Kurztexten oder Piktogrammen die Zeitbereiche für das Motorabstellen/Motoreinschalten in Abhängigkeit vom Signalprogramm und der sogenannten Restrotzeit anzeigen.

(25) Das zeitweise Abstellen des Motors vor einer Lichtsignalanlage kann zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und des Schadstoffausstoßes führen, wenn der Motor seine volle Betriebswärme bereits erreicht hat und die Stillstandszeit wenigstens 15 bis 20 s beträgt.

## 5. Kommentar und Literaturhinweise

### 5.1 Allgemeines

(1)<sup>3)</sup> Die Kraftstoffeinsparung z. B. in hochbelasteten Nebenrich-

<sup>3)</sup> Die im Abschnitt 5 in Klammern vorangestellten Ziffern stellen den Bezug zu den entsprechenden Absätzen in den Abschnitten 1 bis 4 her. Die eingerückten Passagen entstammen einer gezielten Literaturlauswertung.

tungen wird immer nur ein zusätzliches Argument für den Einsatz einer Lichtsignalanlage sein.

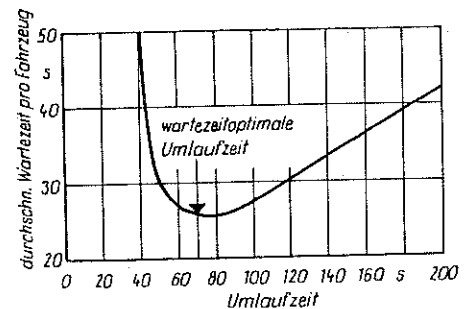
Hoffmann (1982) stellte bereits fest, daß „bei uns in der Vergangenheit sicherlich keine Lichtsignalanlagen ... unmittelbar im Hinblick auf die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs eingerichtet und entsprechend geschaltet“ wurden.

(2) Wirtschaftlichkeitsaspekte des Betreibers von Lichtsignalanlagen treten nicht nur dann in den Hintergrund, wenn es um die Sicherheit der betroffenen Verkehrsteilnehmer geht. Auch wenn die Energieressourcen in Gefahr sind und neuere Techniken eine deutliche Verminderung des Kraftstoffverbrauchs ermöglichen würden, sollten die Signalanlagen in geeigneter Weise umgerüstet werden.

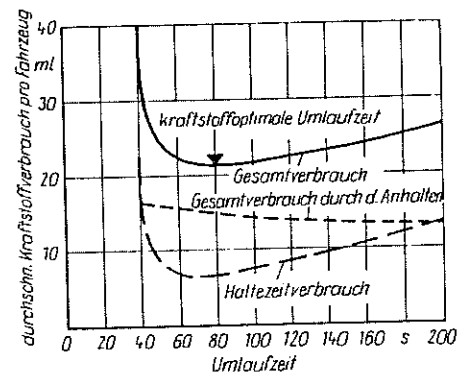
Nach dem Arbeitspapier der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen vom 17. 3. 1981 sollten wegen der politischen Bedeutung der Einsparung von Kraftstoff auch solche Maßnahmen ergriffen werden, die unter Berücksichtigung eines sekundären zusätzlichen Energieverbrauchs insgesamt einen geringfügig höheren Energieverbrauch ergeben.

(3) Bei der Wahl der bezüglich der Leistungsfähigkeit mindestens erforderlichen Umlaufzeit ergibt sich eine sehr hohe Rückstauwahrscheinlichkeit und es entsteht theoretisch unendlicher Rückstau. Damit ist auch der Kraftstoffverbrauch sehr groß.

Nach Lätzsch/Schnabel (1983) ergibt die wartezeitoptimale Berechnung der Umlaufzeit auf der Grundlage von Webster bezüglich des Kraftstoffverbrauchs kaum verbesserungsfähige Werte (Bilder 1 und 2).



1: Wartezeit in Abhängigkeit von der Umlaufzeit (entnommen: Lätzsch/Schnabel, 1983)



2: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Umlaufzeit (entnommen: Lätzsch/Schnabel, 1983)

Bauer (1975) stellt fest, daß das Optimum der Umlaufzeit bezüglich des Kraftstoffverbrauchs bei wesentlich höheren Werten zu finden ist als das wartezeitbezogene Optimum (Bilder 3 und 4). Dies widerspricht nicht unbedingt den Ergebnissen von Lätzsch/Schnabel, wenn der Kurvenverlauf zwischen dem wartezeitbezogenen und dem kraftstoffverbrauchsbezogenen Optimum relativ flach ist. Untersuchungen von Courage/Parapar (1975) ergaben für ein anderes Beispiel eine wartezeitoptimale Umlaufzeit von 90 s und bei gleichen Bedingungen eine kraftstoffoptimale Umlaufzeit von 140 s.

Hoffmann (1982) ist folgende Passage zu entnehmen:

„Sofern ein Kraftfahrzeug sich bereits innerhalb eines Straßenzuges mit „Grüner Welle“ befindet, ist eine möglichst große Umlaufzeit erwünscht, da dadurch am ehesten Halte bei Abweichungen der Fahrgeschwindigkeit von der vorgesehenen Progressionsgeschwindigkeit vermieden werden können. Auch aus der Sicht des Verkehrsingenieurs läßt sich bei einer größeren Umlaufzeit mit meistens aufgeweiteten Freigabezeiten in vielen Fällen ein günstigerer Kompromiß bei der Einpassung beider Fahrtrichtungen in die „Grüne Welle“ erzielen. Für ein Gesamtsystem muß eine erhöhte Umlaufzeit nicht notwendigerweise insgesamt zu einer Kraftstoffersparnis führen, da an den Anfangsknotenpunkten für die beiden Hauptrichtungen und erst recht aber für die Fahrzeuge an den Zufahrten der querenden Straßen die Wahrscheinlichkeit für einen Halt und auch für eine längere Haltezeit größer wird.“

Aus der Sicht von Fußgängern und Radfahrern ist eine möglichst kurze Umlaufzeit erwünscht, um mit der Wartezeit möglichst nicht an die ohnehin niedrige Geduldsschwelle dieser Verkehrsteilnehmergruppen heranzukommen.

Aus der Sicht des ÖPNV wird auch meistens eine kleinere Umlaufzeit gewünscht, da, insbesondere bei stärker schwankenden Haltestellenaufenthaltszeiten, dann eine kürzere Wartezeit an der Lichtsignalanlage auftritt.“

Cohen/Euler (1978) zeigen, daß eine wartezeitoptimale Umlaufzeit gleichzeitig auch minimalen Kraftstoffverbrauch bewirkt.

(4) Eine geringe Phasenanzahl ist eher geeignet, den Verkehrsablauf flüssig zu halten und damit auch den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Natürlich sind gerade in dieser Hinsicht dann auch die Nachbarknoten und die Grünen Wellen von und zu ihnen zu beachten bzw. zu planen.

Hoffmann (1982) stellt zur Anzahl der Phasen fest:

„Bei vorgegebener Umlaufzeit stellen die überwiegend von der Knotenpunktgeometrie abhängigen Zwischenzeiten den nichtproduktiven Teil der Lichtsignalsteuerung dar. Je mehr Phasen eingerichtet werden, desto geringer wird im allgemeinen Fall der produktive Zeitanteil an der Umlaufzeit. Desto größer wird dann auch die Wahrscheinlichkeit für die Zunahme der Anzahl der Halte und somit auch für eine Zunahme des Kraftstoffverbrauchs. Andererseits besteht hier aus Gründen der Erhöhung der Verkehrssicherheit häufig die Forderung nach gesonderten Phasen für Linksabbieger und neuerdings in verstärktem Maße auch nach einer zeitlichen Trennung des rechtsabbiegenden Kraftfahrzeugs vom geradeausfahrenden Radfahrer bzw. vom geradeauslaufenden Fußgänger. Folgt man diesen Wünschen mit der Lichtsignalsteuerung, so stehen diese Maßnahmen im Zielkonflikt zu Maßnahmen zugunsten der Kraftstoffeinsparung“.

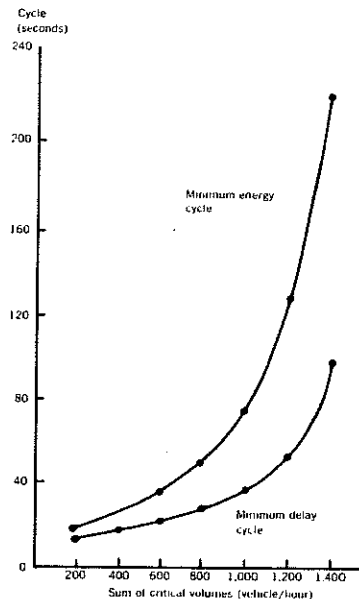
(5) Die Wahl geeigneter Umschaltverfahren dient der Vermeidung von Verkehrsstörungen und damit einer Verringerung von Wartezeiten und Halten. Dies führt auch zu einer Kraftstoffverbrauchssenkung.

(6) Geschwindigkeitsanzeigen sollen die Streuung der Geschwindigkeiten minimieren. Voraussetzung ist, daß die Angabe plausibel ist und die Empfehlung eingehalten wird.

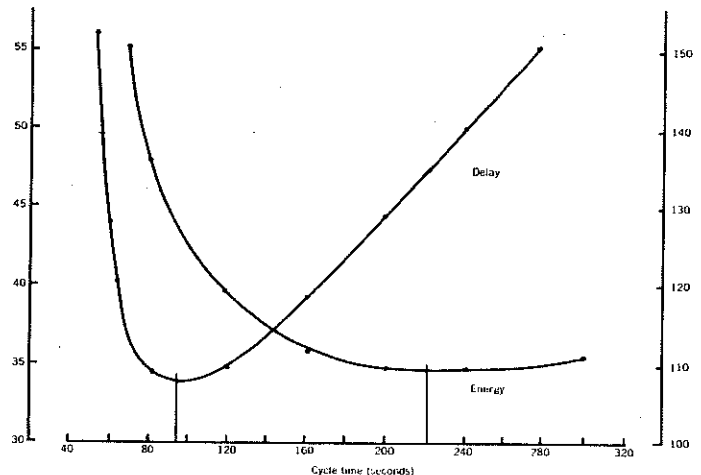
Gemäß Hoffmann (1982) gilt:

„Zur Unterstützung des richtigen individuellen Fahrverhaltens im Hinblick auf die Geschwindigkeitswahl bei der Annäherung an eine Lichtsignalanlage wurden in früheren Zeiten an zahlreichen Stellen und in jüngster Zeit nur in geringerem Maße sogenannte Geschwindigkeitsrichter eingesetzt, die von außen ortsfest dem Kraftfahrer Zusatzinformationen für die Anpassung seines Fahrverhaltens an das Angebot der Lichtsignalsteuerung liefern. Im innerstädtischen Bereich wurden sie insbesondere eingesetzt

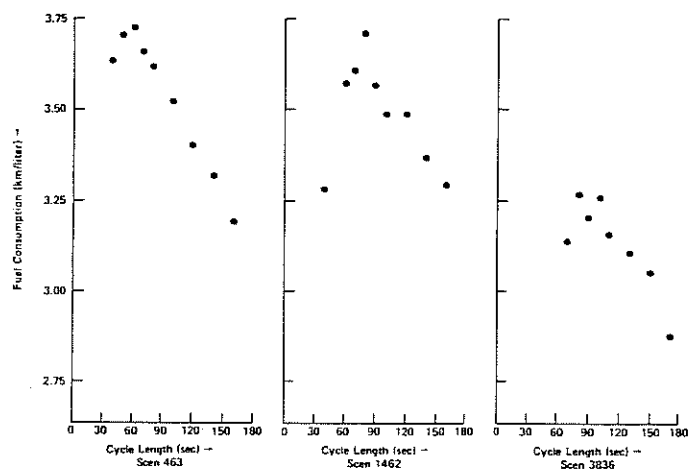
– zur Überbrückung von Umlaufsprüngen zwischen aufeinanderfolgenden Knotenpunkten,



3: Umlaufzeit mit minimaler Wartezeit und minimalem Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der kritischen Belastungssumme (entnommen: Bauer, 1975)



4: Wartezeit und Kraftstoffverbrauch als Funktion der Umlaufzeit für einen Knotenpunkt mit einer kritischen Belastungssumme von 1400 Fahrzeugen pro Stunde (entnommen: Bauer, 1975)



5: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für drei Szenarien (entnommen: Cohen/Euler, 1978)

- zur Verhinderung der Pulkauflösung zwischen großen Abständen der aufeinanderfolgenden Lichtsignalanlagen,
- zur Hinführung auf einen ungünstigen Freigabezeitbeginn im Zuge einer sonst guten Koordinierung.

Da die Anzeige einer höheren Annäherungsgeschwindigkeit

als die gesetzlich zugelassene Höchstgeschwindigkeit nicht statthaft ist, müssen zwangsläufig zur gedachten Vermeidung eines Halts auch besonders niedrige Geschwindigkeitsempfehlungen (z. B. 30 km/h) gegeben werden. Solange jedoch die Kraftfahrer in überwiegender Zahl nicht gewillt sind, auch vorübergehend solche niedrigen Geschwindigkeiten zu akzeptieren, werden die Geschwindigkeitssignale nicht den von ihnen prinzipiell leistbaren Beitrag zur Kraftstoffeinsparung an Lichtsignalanlagen erbringen können.

Auch neuere technische Entwicklungen aus der Automobilindustrie, die im Zusammenspiel mit ortsfesten Sendern dem Kraftfahrer die Information über seine richtige Geschwindigkeitswahl bis zur nächsten Lichtsignalanlage in das Fahrzeug übertragen wollen und dort an einem Soll-/Ist-Vergleich ablesbar machen, werden dann keine wesentlichen Kraftstoffeinsparungen bringen, sofern die Kraftfahrer nicht vom Konkurrenzdenken, das zur Behauptung eines „guten Platzes“ im vorderen Teil des Fahrzeugpulkus führt, abrücken.“

(7) Beim zweitweisen Abschalten von Lichtsignalanlagen in verkehrsschwachen Zeiten werden die die Höhe des Kraftstoffverbrauchs mit beeinflussenden Komponenten Abbremsen und Beschleunigen in der Hauptrichtung ganz und in der Querrichtung je nach Sichtverhältnissen teilweise bis ganz abgebaut.

Bielefeldt/Schmitz (1981) zeigen in einer Modellrechnung Reduzierungen im Kraftstoffverbrauch beim Abschalten gegenüber Dauerbetrieb zwischen 0 und etwa 50 %. Da sich diese Werte aber ausschließlich auf den engeren Knotenpunktbereich, d. h. auf den Abschnitt zwischen Beginn des Bremsvorgangs und Ende der Beschleunigung beziehen, liegen die absoluten Einsparungen relativ niedrig. So werden beispielsweise für eine Stadt, in der 60 Anlagen abgeschaltet werden, Einsparungen von etwa 100 t Kraftstoff pro Jahr errechnet, deren Größenordnung aber sehr empfindlich auf Änderungen der Eingangsparameter reagiert.

## 5.2 Steuerung

*Hinweis: Die Steuerungskriterien wurden – wie die übrigen Kriterien – in Form von Hypothesen in Anlehnung an Aussagen der RiL SA (Ausgabe 1981) aufgestellt, und zwar insbesondere zu bestimmten Abschnitten der Kap. 2 und 4. Die nachstehend angeführten Begründungen wurden so konkret formuliert, wie es der gegenwärtige Wissensstand zuläßt.*

### Begründungen zur Wahl des Steuerungsverfahrens

Die Zielvorstellungen lassen sich durch Anwendung „verkehrstechnischer“ Kriterien realisieren. Sie stehen hier im Gegensatz zu „gerätetechnischen“ oder „elektrotechnischen“ Kriterien. Diese haben keinen Bezug zum Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge, während die verkehrstechnischen Kriterien das Fahrverhalten und damit auch den Kraftstoffverbrauch beeinflussen bzw. bewerten.

(8) Der Kraftstoffverbrauch wird zwar meist über die Anzahl der Halte oder die Wartezeiten minimiert. Dennoch kann alleine die Forderung nach Verbrauchsminimierung schon die Auswahlkriterien möglicher Steuerungsarten entscheidend priorisieren.

(9) (11) Da Grüne Wellen dem Prinzip der Verkehrsführung entsprechen, wird bei einer Koordinierung nur dann und insoweit Kraftstoff eingespart, wie nicht das Prinzip der Verkehrsanpassung bessere Werte liefert. Dies ist im Grenzbereich unter Umständen durch Einzeluntersuchungen nachzuprüfen. Allgemein gilt jedoch: Je stärker der Anteil der durchgehenden Verkehrsströme ist, desto größer ist die Kraftstoffeinsparung im Zuge der Grünen Welle.

Polanis (1984) stellte bei einem Versuch in Winston-Salem (USA) fest, daß bei höherer Belastung (keine Überlastung) eine koordinierte Steuerung Vorteile gegenüber einer verkehrsabhängigen Steuerung einzelner Knotenpunkte mit sich

bringt. Nachts (schwache Belastung) erwies sich die verkehrsabhängige Steuerung als besser.

Für sehr hoch ausgelastete bzw. überlastete Straßenzüge ermittelten Christopherson/Olafson (1978) Vorteile einer verkehrsabhängigen Steuerung gegenüber der koordinierten Festzeitsteuerung. Die Verfasser gehen dabei jedoch nicht auf die möglichen Auswirkungen einer Pflörtneranlage ein.

(10) Bei nicht ausgelasteten Knotenpunkten ist es möglich, durch das Prinzip der Verkehrsanpassung die Anzahl der Halte und die Wartezeiten zu minimieren. Dadurch verringert sich der Kraftstoffverbrauch.

(12) Die Höhe des Kraftstoffverbrauchs wird auch durch die Art der Verkehrszusammensetzung bestimmt. So wird bei sonst gleicher Verkehrsstärke ein größerer LKW-Anteil einen erheblich höheren Verbrauch bewirken, der dann durch spezifische Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen gesenkt werden kann.

(13) Durch Anpassung der Engstellensignalisierung an Belastungsschwankungen können Anzahl der Halte und Wartezeiten wesentlich verringert werden.

Staad (1979) unternahm Simulationsversuche, deren „Ergebnisse die Vermutung ... bestätigen, daß die Anwendung verkehrsabhängiger Steuerungsverfahren an Engstellen mit Lichtsignalanlage zu einer Verbesserung des Verkehrsablaufs führen kann“.

(14) Durch variable Spurzuteilungen können einzelne Spuren entlastet und Verkehrsstörungen reduziert werden. Dadurch werden Halte vermieden und der Kraftstoffverbrauch gesenkt.

Bielefeldt/Boesefeldt (1980) zitieren Untersuchungen (Anwendungsfälle Dearborn, USA, und Berlin, Heerstraße), nach denen günstige Auswirkungen des Richtungswechselbetriebes auf die Reisezeiten festzustellen waren. Dies läßt auch auf eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs schließen.

Zackor (1980) weist ebenfalls auf deutliche Energieeinsparungsmöglichkeiten durch Richtungswechselbetrieb von Fahrstreifen oder Fahrbahnen hin.

(15) Die wegen einer ÖPNV-Bevorzugung wartenden Kraftfahrzeuge des IV haben in der Regel einen größeren Kraftstoffverbrauch als das im anderen Fall benachteiligte Fahrzeug des ÖPNV. Eine Verschlechterung für nur einen Lkw bedeutet bereits einen Ausgleich der Energiebilanz und jeder weitere Pkw bewirkt eine Verschlechterung der Gesamtrechnung.

Richardson (1980) belegt bei Versuchen in Heidelberg (Australien), daß durch Bevorzugungsmaßnahmen für den ÖPNV erhebliche Nachteile für den IV entstehen können. Für einen ungünstigen Fall (Einzelknoten, hoch ausgelastet, geringer Busverkehr) berechnet er sogar einen negativen Gesamtnutzen für eine ÖPNV-Bevorzugung. Erst für zusammenhängende Maßnahmen an mehreren Knotenpunkten ergeben sich nach Richardson Nutzenüberschüsse.

Bei ihren Untersuchungen stellen Christopherson/Olafson (1978) fest, daß separate Busspuren starke negative Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch des Individualverkehrs haben. Nur bei extrem hohem Busverkehrsaufkommen ist dies zu vermeiden.

### Begründungen zur Wahl der Zielgröße

(16) Der geringste Kraftstoffverbrauch entsteht bei konstanter Fahrt mit einer definierten Geschwindigkeit. Alle Zielgrößen wirken auf das Fahrverhalten, insbesondere auf die Geschwindigkeit und die Anhaltenotwendigkeit und -dauer der Fahrzeuge.

(17) Die Minima der Zielgrößen und der Verbräuche sind nicht identisch. Quantitative Aussagen fehlen weitgehend.

Minimierung des Kraftstoffverbrauchs bedeutet die Anwendung einer Linearkombination aus Wartezeit und Anzahl der Halte als Zielgröße (Courage/Parapar, 1975, u. a.).

Die bezüglich des Kraftstoffverbrauchs einem Halt gleichzusetzende Wartezeit wird durch einen Parameter  $K$  (s/Stop) be-

schrieben. In diesem ist der durch den Halt zwangsläufig entstehende Zeitverlust noch nicht enthalten. Für K stellt Akcelik (1981) aus der Literatur folgende Werte zusammen:

Claffey, 1971	K = 60 s/Stop
Bauer, 1975	K = 228 s/Stop
Courage u. a., 1975	K = 48 s/Stop
Robertson, 1980	K = 34 s/Stop

Weitere Angaben in der Literatur:

Lätzsch/Schnabel, 1983	K = 44,4 s/Stop (Pkw)
	K = 104,2 s/Stop (Lkw)

Courage/Parapar (1975) stellten für ein Versuchsnetz fest, daß der absoluten Minimierung des Benzinverbrauchs ein sehr hoher Zuwachs an Wartezeiten gegenübersteht (im Beispiel: Einsparung von 44 Gallonen/Stunde im Netz gegenüber 42 Fahrzeugstunden/Stunde).

Robertson u. a. (1980) ermittelten bei Untersuchungen im Straßennetz von Glasgow Kraftstoffeinsparungen von 2–3%, wenn anstatt der Wartezeit die Anzahl der Halte als alleiniges Optimierungskriterium verwendet wird. Im Gegensatz dazu stehen Aussagen von Lätzsch/Schnabel (1983) für den Einzelknotenpunkt, nach denen die wartezeitoptimale Berechnung der Umlaufzeit bezüglich des Kraftstoffverbrauchs kaum verbesserungsfähige Werte ergibt.

Cohen/Euler (1978) behaupten, daß eine Umlaufzeit, die die Wartezeiten minimiert, gleichzeitig auch den Kraftstoffverbrauch minimiert. Halte würden demnach keine Rolle spielen, weil sie vermutlich sehr eng mit den Wartezeiten korrelieren.

(18) Bei einer Geschwindigkeit um 50 km/h entsteht der geringste Kraftstoffverbrauch. Die Geschwindigkeit darf nicht zu sehr schwanken, so daß die Durchschnittsgeschwindigkeit allein als Kriterium nicht ausreicht. Ein gelegentlicher Halt ist besser als eine konstante niedrige Geschwindigkeit von z. B. 30 km/h ohne Halt.

Zur Eingrenzung des Begriffs „gelegentlicher Halt“: Nach einer in der Literatur an zahlreichen Stellen gegebenen Berechnungsformel und unterschiedlichen Parameter-Vorgaben ist es möglich, eine konstante Fahrt ohne Halt rechnerisch mit einer Fahrt bei kraftstoffoptimaler Geschwindigkeit mit Halt zu vergleichen. Man bekommt so einen Anhaltspunkt dafür, wie oft bei optimaler Geschwindigkeit ein Halt vorkommen darf, um noch günstigere Verbrauchswerte gegenüber einer langsameren Fahrt ohne Halt zu bekommen.

Berechnung des Grenzwertes für  $L_1$  nach Claffey (1971):

$$\begin{aligned} V_{opt} &= 53 \text{ km/h} & f &= 0,104 \text{ l/km} \\ V &= 30 \text{ km/h} & f &= 0,124 \text{ l/km} \\ 1 \text{ Stop} &= 0,048 \text{ l} \\ 0,124 \cdot L_1 &= 0,104 \cdot L_1 + 0,048 \\ L_1 &= 2,4 \text{ km} \end{aligned}$$

Berechnung des Grenzwertes für  $L_1$  nach Akcelik (1983):

$$\begin{aligned} V_{opt} &= 54,2 \text{ km/h} & f &= 0,0856 \text{ l/km} \\ V &= 30,0 \text{ km/h} & f &= 0,1080 \text{ l/km} \\ 1 \text{ Stop (bei } V &= 54,2 \text{ km/h)} &= & 0,025 \text{ l} \\ 0,108 \cdot L_1 &= 0,0856 \cdot L_1 + 0,025 \\ L_1 &= 1,1 \text{ km} \end{aligned}$$

Gegenüber konstanter Fahrt mit  $V = 30 \text{ km/h}$  ist eine Fahrt mit kraftstoffoptimaler Geschwindigkeit also nur dann besser, wenn ein Halt seltener als alle 2,4 km bzw. 1,1 km auftritt.

Christopherson/Olafson (1978) konnten in zahlreichen Simulationsversuchen einen statistisch gut abgesicherten linearen Zusammenhang zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit im Netz und dem Kraftstoffverbrauch nachweisen. Da hier die Anzahl der Halte nicht mit betrachtet wurde und weil es sich um durchschnittliche Geschwindigkeiten im Netz und nicht um die Geschwindigkeiten von Einzelfahrzeugen handelt, wurde kein Minimum des Kraftstoffverbrauchs bei 50 bis 60 km/h festgestellt.

„Auch die Devise, daß man eher einmal einen einzigen, aber längeren Halt für alle Fahrzeuge in einem Straßenzug mit Koordinierung in Kauf nimmt als eine Freigabezeitfestlegung, die die Pulkspitze jeweils zu einem Anhalten für nur wenige Sekunden an mehreren aufeinanderfolgenden Signalanlagen zwingt, kann zu Kraftstoffeinsparungen führen.“ (Hoffmann, 1982)

### 5.3 Grüne Wellen

(19) Da die Verkehrsabwicklung in einer koordinierten Steuerung das Fahrverhalten der Mehrzahl der Fahrzeuge beeinflusst, ändert sich der Kraftstoffverbrauch durch Einrichtung einer Grünen Welle relativ stark.

(20) Je mehr Fahrzeuge der Grünen Welle folgen können, desto geringer sind Geschwindigkeitsstreuung, unnötige Halte und Wartezeiten.

Polanis (1984) stellt in Winston-Salem (USA) durch eine Koordinierung gegenüber unkoordinierter verkehrabhängiger Steuerung eine Kraftstoffeinsparung von etwa 3% fest.

Weitere Zahlenangaben zur Kraftstoffeinsparung werden von Hoffmann (1982) aus der Literatur zusammengefaßt: In einem Versuch in Glasgow ergab sich unter dem Einsatz des Modells TRANSYT eine Kraftstoffersparnis von 13% bei günstiger Koordinierung im Straßennetz gegenüber dem nicht koordinierten Zustand (Robertson u. a., 1980). Der gleiche Prozentsatz ergibt sich nach einer Modellrechnung von Akcelik (1981) bei einem Straßenzug mit nur drei Lichtsignalanlagen, wenn nur ein Knotenpunkt mit dem Querverkehr in die Zwänge des umliegenden Netzes eingebunden betrachtet wird. Sofern jedoch zwei der Knotenpunkte in die Bindungen des restlichen Netzes einbezogen werden, sinkt die Kraftstoffeinsparung auf 8% und bei allen drei Knotenpunkten auf 7% ab. Robertson u. a. (1980) stellen bei ihren Untersuchungen in Glasgow durch Verbesserung der Qualität von Grünen Wellen in einem Straßennetz rechnerische Kraftstoff-Einsparungsmöglichkeiten von 2–3% fest, wenn anstatt der Zielgröße Wartezeit die Zielgröße Anzahl der Halte der Optimierung zugrunde gelegt wird.

Akcelik (1981) stellt beispielhaft dar, wie sehr ein günstiger Kraftstoffverbrauch (ebenso wie die Anzahl der Halte und die Wartezeit) von der Versatzzeit abhängig ist, also von einer guten Koordinierung (Bild 6).

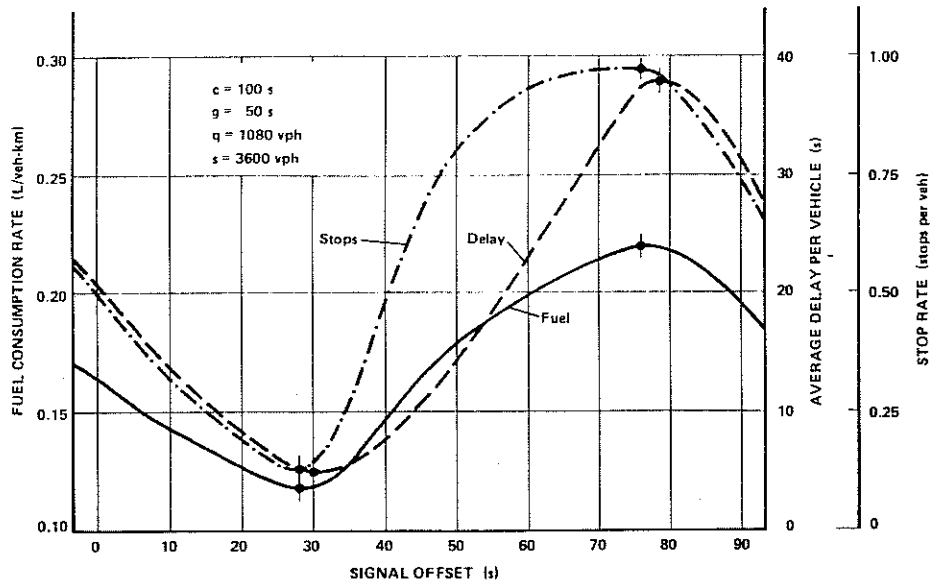
(21) Durch eine stetige Grünzeitführung ist eine genaue Geschwindigkeitsvorgabe für einen Fahrzeugpulk möglich. Dadurch ist eine Kraftstoffeinsparung zu erzielen.

„Für die verkehrabhängige Freigabezeitmodifikation kann eine Minimierung des Kraftstoffverbrauchs bedeuten, daß ein Hauptaugenmerk auf die gesicherte und rechtzeitige automatische Erfassung der Spitze eines sich nähernden Fahrzeugpuls zu legen ist, damit der Freigabezeitbeginn richtig geschaltet wird. Im Falle eines starken Einbiegerstroms vom zurückliegenden Knotenpunkt her müßte dann eine aus der Verkehrssituation heraus bestimmte Vorgabezeit gegeben werden, damit die ersten Fahrzeuge des Pulks nicht zum Halten kommen müssen und sich diese Störung dann im restlichen Pulk fortsetzt. Um hier einen Spielraum für variable Freigabezeituteilung zu erhalten, ist gleichzeitig die laufende Überwachung der auslaufenden Freigabezeit von Bedeutung, damit eine Anzeige ungenutzter Grünzeit möglichst vermieden wird.“ (Hoffmann, 1982)

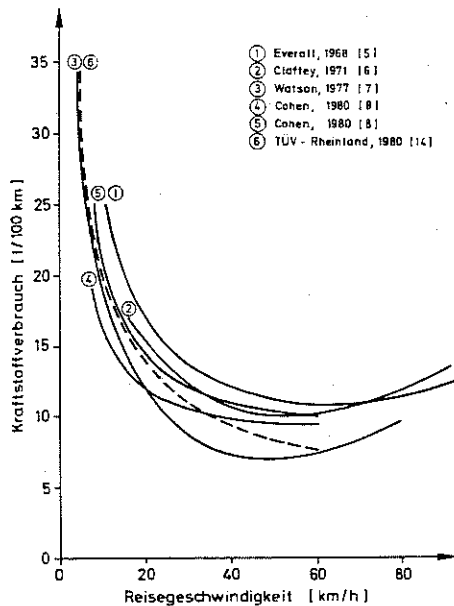
(22) Nach „Energie und Verkehr“ (FGSV, 1984) und neueren Forschungsergebnissen wird der niedrigste Kraftstoffverbrauch bei einer Geschwindigkeit von etwa 55 km/h erzielt.

Für eine bezüglich des Kraftstoffverbrauchs optimale Geschwindigkeit finden sich darüber hinaus in der Literatur folgende Angaben:

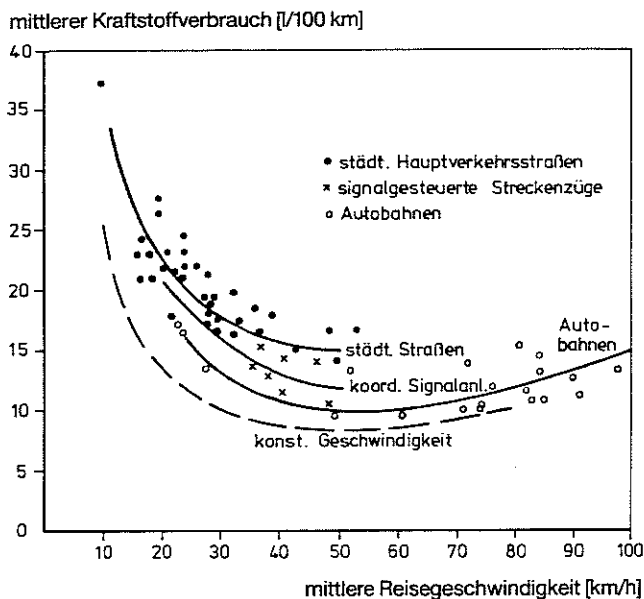
Claffey (1971)	$V_{opt} = 53 \text{ km/h}$
Akcelik (1983)	$V_{opt} = 54,2 \text{ km/h}$
Evans/Herman (1978)	$V_{opt} = 35 \text{ mph} = 56,3 \text{ km/h}$



6: Wartezeit, Anzahl der Halte und Kraftstoffverbrauch als Funktion der Versatzzeit (entnommen: Akcelik, 1981)



7: Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs im Stadtverkehr von der erzielbaren Reisegeschwindigkeit (entnommen: Hoffmann, 1982)



8: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von den Verkehrsbedingungen (entnommen: FGSV, 1984; nach Watson/Milkins/Marshall, 1979)

(23) Je größer die Anzahl und je höher die Güte der Grünen Wellen im Netz ist, desto größer ist auch die Kraftstoffeinsparung.  
 (24) Ein Versatz gegenläufiger Fahrzeuggrünbänder im Bereich einer Querungsstelle für Fußgänger führt in der Regel zu einem Halt der Fußgänger auf der Mittelinsel. Dies läßt sich nur vermeiden, indem anstatt der Fußgänger die Fahrzeuge angehalten werden, und zwar eventuell sogar mehrfach. Zusätzliche Halte führen aber zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs.

Bereits im Arbeitspapier der FGSV vom 17. 3. 1981 wurde ein Ziel und Gegenrichtung gegeben, indem es für die Grünzeiten der Grünzeiten für Fußgänger bei Straßen mit geteilter Fahrbahn führen können. Bei nichtgeteilter Fahrbahn kann es zu sehr kurzen Grünzeiten für Fußgänger oder sogar dazu kommen, daß Fußgängerströme ohne Störung der Grünen Wellen gar nicht mehr freigegeben werden können.

#### 5.4 Motorabstellen

(25) Die signalprogrammabhängige Aufforderung zum Motorabstellen kann über eine drei-begriffige Zusatzinformation (verbal „Motor aus“, dunkel, „Motor ein“), über eine zwei-begriffige Zusatzinformation (verbal oder Piktogramm: „Motor aus“, dunkel) oder über einen Zeiger im Fahrzeug-Rot-Signal oder über eine digitale Anzeige der restlichen Rotsekunden erfolgen. Das Abstellen wird empfohlen ab Rotbeginn bis etwa 20 s vor Grünbeginn. Zum Motoranlassen wird – wenn überhaupt angezeigt – etwa 5 s vor Grünbeginn aufgefordert. Es sollen etwa 3 – 10 % Kraftstoff bei jedem die Empfehlung befolgenden Fahrzeug eingespart und 2 – 6 % an Schadstoffausstoß vermieden werden.

Hermann und Voigt (1986) ermittelten in einer 1985 in Velbert bei mittlerer Verkehrsbelastung durchgeführten Untersuchung mit einem zwei-begriffigen Zusatzsignal unter Berücksichtigung eines Befolgungsgrades von 34 – 42 % und durchschnittlicher Einzelwartezeiten von 31 – 41 s pro Jahr und Zufahrt folgende Reduzierungswerte:

- 3000 kg Kraftstoff
- 359 kg Kohlenmonoxyd CO
- 31 kg Kohlenwasserstoff CH
- 1,1 kg Stickoxyde NO<sub>x</sub>

Der subjektiv empfundene Lärmpegel habe sich nicht verändert, allerdings sei die erhöhte Anzahl von Startvorgängen in einer Befragung als Belästigung angegeben worden.

Mey und Maritz (1985) geben für Bern, wo an einem schwachbelasteten Knotenpunkt die Signalgeber aller vier Zufahrten zusätzlich mit einem ein blaues Piktogramm zeigen

den Signalgeber ausgerüstet wurden, bei einer mittleren Einzelwartezeit von 15 s folgende Reduzierungswerte pro Jahr an:

- 9 400 kg Kraftstoff
- 3 960 kg Kohlenmonoxyd CO
- 338 kg Kohlenwasserstoff CH
- 12,3 kg Stickoxyde NO<sub>x</sub>

Über die Veränderung der Lärmsituation finden sich keine Aussagen.

Kampelmühler (1980) stellt fest, daß der Kraftstoffverbrauch ebenso wie die Emission von Kohlenmonoxyd sich bereits bei relativ kurzen Abschaltzeiten reduzieren läßt. Bezüglich der Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe ist ein Abstellen des Motors jedoch nur für Dauern von mindestens 12 bis 18 s sinnvoll. Bei kürzeren Abschaltungen wird sich die Gesamt-HC-Emission durch den Startvorgang erhöhen. Bezüglich der Stickoxyd-Emission konnte keine eindeutige Aussage gemacht werden, weil diese zu sehr von den Kennwerten des einzelnen Fahrzeugs abhängig ist. Es wurden durch Motorabstellen sowohl Erhöhungen als auch Reduzierungen der Stickoxyd-Emission beobachtet.

Den zu erwartenden positiven Auswirkungen stehen jedoch einige - je nach System unterschiedlich ins Gewicht fallende - verkehrs- und anlagentechnische Nachteile gegenüber:

- Bei großräumigen Knotenpunkten mit gesondert signalisierten Abbiegern stellen sich Probleme bei der Anordnung und richtigen Zuordnung der Zusatzeinrichtungen und ihrer Verständlichkeit für den Kraftfahrer.
- Die Aufforderung zum Motoranlassen oder die Anzeige der „Restzeit“ können zu unerwünschten und sicherheitsbedenklichen Frühstarts führen (Verkürzung der Zwischenzeiten!).
- Bei Knotenpunkten im Zuge einer Grünen Welle verbietet sich die Aufforderung zum Motorabstellen von selbst, da nicht rechtzeitig betriebsbereite Fahrzeuge immer zu Behinderungen im Verkehrsablauf führen werden.
- Bei Knotenpunkten, die nach dem Prinzip der Verkehrsanpassung gesteuert werden, ist in der Regel die Dauer der Rotzeit nicht bekannt.
- Es müssen freie Kabelverbindungen und Signalgruppen vorhanden sein oder geschaffen werden.
- Es entstehen nicht unerhebliche Installations- und Wartungskosten, die bei begrenztem Budget möglicherweise den Bau einer anderen, aus Gründen der Verkehrssicherheit erwünschten Lichtsignalanlage zeitlich verzögern oder ganz verhindern können.

Aus diesen Gründen ist vor der Installation von Zusatzeinrichtungen zur Förderung des Motorabstellens im Einzelfall genau zu untersuchen, welche Auswirkungen sich für den Betreiber der Lichtsignalanlage sowie für den Verkehrsablauf ergeben werden.

## 6. Zusammenfassung

Der Betrieb von Lichtsignalanlagen beeinflusst die Höhe des Kraftstoffverbrauchs. Günstige Werte können an Einzelanlagen erzielt werden, indem die Anzahl der Halte und die Summe der Wartezeiten minimiert werden, z. B. über verkehrsabhängig arbeitende Optimierungsverfahren. Dabei weisen aber verschiedene Quellen (Lätzsch/Schnabel, 1983; Bauer, 1975) darauf hin, daß die für den Kraftstoffverbrauch optimale Umlaufzeit geringfügig (10 s) bis erheblich (bis 100 s) höher als die in Bezug auf Anzahl der Halte und Wartezeit optimale Umlaufzeit liegt. Die erzielbare Kraftstoffeinsparung wird - bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr - gemäß FGSV (1981) auf etwa 0,1 % geschätzt.

Höhere Einsparungen können durch geeignete „Grüne Wellen“ erreicht werden, indem die Versatzeiten optimiert und stetige Grünzeitführungen angestrebt werden. Ziel ist es auch hier, die o. g. Kenngrößen des Verkehrsablaufs zu optimieren. Darüber

hinaus werden gleichmäßige Fahrgeschwindigkeiten empfohlen, die nach verschiedenen Quellen (z. B. FGSV, 1984) bei konstant 50 bis 60 km/h einen minimalen Kraftstoffverbrauch bewirken, und zwar sogar dann, wenn gelegentliche Halte auftreten. Bezogen wiederum auf den gesamten Verbrauch im Straßenverkehr können durch optimale Koordinierungen 1,0 bis 1,8 % an Kraftstoff eingespart werden.

Einige flankierende Maßnahmen im Zusammenhang mit der Lichtsignalsteuerung sind ebenfalls geeignet, zu einer Verbrauchsreduzierung beizutragen. Dazu zählt z. B. die Empfehlung plausibler Fahrgeschwindigkeiten, sofern ihre Akzeptanz wahrscheinlich ist. Außerdem gehört dazu die Empfehlung zum Abstellen des Motors bei längerem Rot, sofern bei der Einrichtung der entsprechenden signaltechnischen Maßnahmen eine ganze Reihe von Randbedingungen und von möglichen Nachteilen beachtet wird und der Motor mindestens etwa 20 Sekunden abgestellt bleibt.

Ungünstige Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch können dagegen Maßnahmen zur ÖV-Bevorzugung sowie die koordinierte Signalisierung von querenden und über Mittelinseln zu führenden Fußgängerströmen auslösen, wenn dadurch die Zeit-Weg-Abläufe des Kraftfahrzeugverkehrs beeinträchtigt werden. Derartige Maßnahmen bewirken meist eine Verkürzung der für Fahrzeugpuls benötigten Freigabezeiten und erzeugen damit vermehrt verbrauchssteigernde Halte und Wartezeiten.

Schließlich sei noch einmal darauf hingewiesen, daß Planung und Einrichtung von Lichtsignalanlagen nicht unter Verbrauchsüberlegungen vorgenommen werden. Wenn jedoch der Einsatz einer Lichtsignalanlage in Angriff genommen wird, sollte im Hinblick auf einen niedrigen Kraftstoffverbrauch eine möglichst geringe Phasenzahl angestrebt werden. Außerdem ist die Störung vorhandener Koordinierungen zu vermeiden.

Aus den bisher zugänglichen Unterlagen ergibt sich, daß mit Hilfe geschickt eingesetzter Lichtsignalsteuerungen Kraftstoffeinsparungen im Straßenverkehr von bis zu etwa 2 % erreicht werden können. Bezogen auf den gesamten Mineralölbedarf in der Bundesrepublik macht dies Einsparungen von rund 0,3 % aus.

## Schrifttum

- Akcelik, R.: Fuel efficiency and other objectives in traffic system management. In: Traffic Engineering & Control, Nr. 2, 1981, S. 54-65
- Akcelik, R.: Formulae for predicting fuel consumption of cars. In: Traffic Engineering & Control, Nr. 3, 1983
- Bauer, Ch. S.: Some energy consideration in traffic signal timing. In: Traffic Engineering, Febr. 1975, S. 19-25
- Bielefeldt, C.; Boesefeldt, J.: Untersuchung über Möglichkeiten der Energieeinsparung durch Verbesserung des Verkehrsflusses in städtischen Verkehrsnetzen. Studie i. A. des Ministers für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr in NRW. Ing.-Büro Heusch/Boesefeldt Aachen, April 1980
- Bielefeldt, C.; Schmitz, H.: Untersuchung und Entwicklung von Kriterien für die zeitweise Abschaltung von Lichtsignalanlagen in städtischen Straßennetzen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 325, 1981
- Christopherson, P. D.; Olafson, G. G.: Effects of urban traffic control strategies on fuel consumption. In: ITE-Journal, Nov. 1978, S. 40-44
- Claffey, P. J.: Running costs of motor vehicles as affected by road design and traffic. In: Highway Research Report (NCHRP Report 111), Washington D.C., 1971
- Cohen, S. G.; Euler, G.: Signal cycle length and fuel consumption and emissions. In: Transportation Research Record 667, Washington D.C., 1978
- Courage, K. G.; Parapar, S.-M.: Delay and fuel consumption at traffic signals. In: Traffic Engineering, Nov. 1975, S. 23-27
- Evans, L.; Herman, R.: Automobile fuel economy on fixed urban driving schedules. In: Transportation Science, Vol. 12, Nr. 2, May 1978
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Kraftstoffeinsparung an Lichtsignalanlagen (Arbeitspapier vom 17. März 1981). Arbeitsgruppe „Verkehrsführung und Verkehrssicherheit“, Arbeitsausschuß „Lichtsignalanlagen“. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 3, 1981
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Energie und Verkehr, Bericht 1984
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA, Ausgabe 1981.
- Hermann, R.; Voigt, C.: Lärm- und Schadstoffreduzierung an Lichtsignalanlagen durch Motorabstellen? - Ergebnisse eines Versuchs in Velbert. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 4, 1986
- Hoffmann, G.: Möglichkeiten der Kraftstoffeinsparung bei der Lichtsignalsteuerung. In: Straße und Autobahn, Heft 7, 1982
- Kampelmühler, F.: Motorabschaltung im Stand oder niedrigere Leerlaufdrehzahl? Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 6, Nr. 81, 1980