

# OPTIMIERUNG DER LICHTSIGNALSTEUERUNG IN STRASSENNETZEN

Prof. Dr.-Ing. HANS-GEORG RETZKO und

Dipl.-Ing. MANFRED BOLTZE

Technische Hochschule Darmstadt, Bundesrepublik Deutschland

## 1. ALLGEMEINES

Das Erreichen der Grenzen der Leistungsfähigkeit von Straßenverkehrsanlagen, zunehmendes Umweltschutzbewußtsein und knapper werdende Finanzmittel haben in den vergangenen Jahren in vielen Ländern eine intensive Auseinandersetzung mit Optimierungsverfahren bewirkt. Moderne Rechnertechnologien haben diese Entwicklung begünstigt.

Für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung in einem Straßennetz gibt es inzwischen zahlreiche Verfahren. Sie unterscheiden sich unter anderem in den Optimierungsvariablen, dem verwendeten Optimierungskriterium und in der Vorgehensweise bei der Optimierung. Daneben wurden Verfahren zur Simulation des Verkehrsablaufes in Lichtsignalgesteuerten Straßennetzen entwickelt, deren Ergebnisse insbesondere bei Entscheidungsproblemen hilfreich sein können.

Auf dem Gebiet der Lichtsignalsteuerung bedeutet die Ermittlung einer optimalen Lösung zum einen die Auswahl der optimalen Gestaltung der Straßenverkehrsanlagen und der Basiselemente der Signalprogramme (Phaseneinteilung und Phasenfolge, sofern keine Signalprogrammabildung durch den Rechner vorgesehen ist) sowie zum anderen die Bestimmung der optimalen Parameter für die Signalsteuerung. Dementsprechend sind zahlreiche Größen in eine Optimierung einzubeziehen. Dies gilt insbesondere bei gleichzeitiger Betrachtung mehrerer Knotenpunkte. Der Optimierungsraum hat also sehr viele Dimensionen. Die meisten Parameter sind entweder direkten Restriktionen unterworfen (z.B. Mindestfreigabezeiten), oder es sind indirekte Restriktionen wirksam (z.B. maximale Wartezeit). Daher wird in vielen Fällen ein nichtkonvexes Optimierungsproblem vorliegen, was bedeutet, daß ein Optimierungsverfahren unter Umständen nur ein lokales Optimum findet. Dann kann es mit einer ganz anderen Konstellation der Parameter (an einer anderen Stelle im Optimierungsraum) vielleicht eine noch bessere Lösung geben. Die Ermittlung des globalen Optimums bei derartigen Problemstellungen ist mit vertretbarem Rechenaufwand oftmals nicht möglich.

Verkehrstechnischen Berechnungen liegt immer ein bestimmtes Modell zugrunde. Ein solches Modell kann kein getreues Abbild der Realität sein. Es enthält vereinfachende Annahmen. Diese Modellunschärfen übertragen sich auch in ein Optimierungsverfahren und bewirken, daß in der Regel nicht das genaue Optimum gefunden wird. Die gleiche Folge hat die Tatsache, daß die zu optimierenden Parameter meist nicht aus einer stetigen Wertemenge zu wählen sind (z.B. Freigabezeit nur in Sekundenschritten; Signalprogrammauswahl). Darüber hinaus kann insbesondere bei festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen der stochastische Charakter des Verkehrsablaufes bewirken, daß eine optimale Einstellung nur für kurze Zeitdauern erreicht werden kann. Schließlich muß noch auf die Bedeutung hingewiesen werden, welche die Auswahl der in ein Optimierungsverfahren einzubeziehenden Zielgrößen und Kriterien für das Optimierungsergebnis hat.

## 2. GRUNDLAGEN UND GRUNDSATZE

Für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung in einem Straßennetz bestehen grundsätzlich zwei verschiedene Strategien. Bei der Strategie "Stadtfahrplan" wird für ein System von Grünen Wellen eine Maximierung der Geschwindigkeit in den fest vorgegebenen Hauptrichtungen angestrebt. Dabei liegen Festzeitprogramme für die Signalsteuerung zugrunde, die für die erwarteten Verkehrsbelastungen off-line optimiert und zeitplanabhängig oder verkehrabhängig gewählt werden. Bei der Strategie "Schachspielmethode" muß sich die Steuerung laufend den Erfordernissen und Änderungen des Verkehrs anpassen und möglichst einige Zeit vorausdenken. Dazu ist eine On-Line-Optimierung erforderlich.

Wesentlicher Nachteil der On-Line-Optimierung ist es, daß zur fortwährenden Anpassung der Lichtsignalsteuerung an das Verkehrsgeschehen der Optimierungsprozeß in möglichst kurzen Abständen wiederholt werden muß. Die erforderlichen kurzen Rechenzeiten zwingen zu vereinfachenden Annahmen im zugrundegelegten Modell, welche die Qualität des Optimierungsprozesses beeinflussen. Die rasche Weiterentwicklung der Rechnertechnologie wird den Verkehrsingenieuren jedoch wesentlich verbesserte

Möglichkeiten bieten.

Bei den Off-Line-Verfahren spielt die erforderliche Rechenzeit eine nicht so große Rolle, wenn man einmal von den mit der Rechenzeit ansteigenden Kosten absieht. Jedoch kann eine off-line optimierte Lichtsignalsteuerung nur dann wirkungsvoll sein, wenn die tatsächlichen Verkehrsstärken den bei der Optimierung zugrundegelegten zumindest in etwa entsprechen. Bei nur ungenau vorherzusagenden Belastungen wird eine On-Line-Optimierung trotz der vereinfachenden Annahmen effektiver sein.

Die heute verbreiteten Optimierungsverfahren für die Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen dienen vor allem dazu, optimale Werte für die Umlaufzeit, die Freigabezeiten und die Versatzzeiten zu finden. Die Gestaltung der Straßenverkehrsanlagen und die Phaseneinteilung sind grundsätzlich vorzugeben. Einige Verfahren unterstützen die Wahl der Phasenfolge.

Zur Optimierung der Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen werden vorwiegend folgende Optimierungskriterien angewendet:

- Minimierung der Wartezeit;
- Minimierung der Anzahl der Halte;
- Minimierung des Kraftstoffverbrauchs;
- Minimierung der vom Straßenverkehr ausgehenden Emissionen (Lärm und Abgase);
- Maximierung der Grünbandbreite auf den Hauptverkehrsstraßen.

Die meisten Verfahren bieten die Möglichkeit, mehrere dieser Kriterien bei der Optimierung zu berücksichtigen. In neueren Ansätzen bei wartezeitorientierten Verfahren soll durch ein neues Kriterium die Bildung 'Grüner Wellen' gefördert werden. Hierbei wird positiv bewertet, wenn ein freigegebener Fahrzeugstrom rechnerisch an der nächsten Lichtsignalanlage ohne Halt durchfahren kann.

Die Optimierung der Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen stellt ein sehr komplexes und schwer lösbares Problem dar. Auf die zahlreichen zu optimierenden Parameter und die Schwierigkeit, ein globales Optimum zu finden, wurde bereits eingegangen. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems wurden Übersichtsverfahren, Probiervorgänge und mathematisch exakte Iterationsverfahren entwickelt. Rechnergestützte Bearbeitung bietet sich hier an. Für die zeitplanabhängige Lichtsignalsteuerung werden heute vielfach Verkehrsflußmodelle benutzt, um durch Simulation die Auswirkungen verschiedener Möglichkeiten zur Lichtsignalsteuerung zu bewerten.

### 3. STAND DER ENTWICKLUNG

Die Entwicklung von Optimierungsverfahren für die Lichtsignalsteuerung hat heute bereits einen hohen

Stand erreicht. Seit Beginn der sechziger Jahre wurden in mehreren Ländern Modelle und Programmsysteme entwickelt, die den Verkehrstechnikern heute zur Verfügung stehen.

Als Vorbereitungsmodelle (Off-Line) für die Lichtsignalsteuerung in Straßennetzen sind insbesondere die Modelle TRANSYT und SIGMA zu nennen.

Das Modell TRANSYT (Traffic Network Study Tool) wurde 1967 in Großbritannien am TRRL (Transport and Road Research Laboratory) von ROBERTSON entwickelt und seither sowohl dort als auch in anderen Ländern in zahlreichen Versionen verbessert. Heute ist TRANSYT wohl das international am häufigsten angewendete Verkehrsmodell und Optimierungsverfahren für den Off-Line-Betrieb. TRANSYT besteht aus einem makroskopischen, deterministischen Verkehrsflußmodell, einem Bewertungsteil sowie einem heuristischen Optimierungsteil, in dem ein Hill-Climbing-Algorithmus angewendet wird. Eine Zusammenfassung der Modelleigenschaften ist im Handbuch zur britischen Version TRANSYT 8 von VINCENT, MITCHELL und ROBERTSON (1980) enthalten. Aktuelle Versionen von TRANSYT sind zur Zeit: TRANSYT 8 (Großbritannien, 1980), TRANSYT 7F (U.S.A., 1981) und TRANSYT-ISBAC (Bundesrepublik Deutschland, 1985).

Das Programmsystem SIGMA (Signal Management) wird zur Zeit in der Bundesrepublik Deutschland im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie entwickelt. Die Grundlagen dieses Verfahrens werden von BIELEFELD/MEISSNER/SCHLABBACH (1986) skizziert. Danach ergeben sich für SIGMA folgende konzeptionelle Neuerungen gegenüber bisherigen Programmsystemen dieser Art:

- "1. Zwei benutzerabhängige Strategien, eine zur Netzoptimierung, die andere zur Optimierung bevorzugter Hauptverkehrsstraßen, auf denen Grüne Wellen erzeugt werden ... .
2. Strategie- und benutzerabhängige Bewertungsmöglichkeiten, in die verschiedene Kriterien wie Anzahl der Halte und Zeitverluste, Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen selektiv oder gemeinsam eingehen können.
3. Einen mehrstufigen Optimierungsprozeß, in dem strategie- und stufenabhängig verschiedene Maßnahmen und Algorithmen eingesetzt werden ... .
4. Stufenabhängige Abbildungen des Verkehrs, am Anfang des Optimierungsprozesses so grob wie möglich, am Ende so fein wie nötig."

Darüber hinaus sollen die neuesten Möglichkeiten der Datenverarbeitungstechnik genutzt werden und auch neuere Kenntnisse zur Lösung des Optimierungsproblems eingehen. Besonderer Wert soll auch auf eine für den Verkehrsingenieur komfortable Bedienung gelegt werden. Ebenso wie TRANSYT wird SIGMA aus einem Verkehrsflußmodell, einem Programmteil zur Bewertung sowie einem

Optimierungsteil bestehen. Der Optimierungsteil unterscheidet sich von bisherigen Verfahren wohl am deutlichsten. Er enthält die Stufen Anfangslösung, Konstruktion und Verbesserung.

Für die **Anfangslösung** wird zunächst eine gemeinsame Netzumlaufzeit nach AKCELIK ermittelt. Alternativ ist die Umlaufzeit vom Anwender vorzugeben. Danach werden die Freigabezeiten für die einzelnen Knotenpunkte nach dem Prinzip des Sättigungsausgleichs bestimmt.

Die Koordinierung wird zunächst überschlägig in der Stufe **Konstruktion** durchgeführt. In einer vorzugebenden Reihenfolge werden in einem Bearbeitungsschritt jeweils zwei oder mehrere Knotenpunkte betrachtet und hierzu die Versatzzeiten bestimmt. Dabei können verschiedene Vorgehensweisen vom Anwender gewählt werden, jenachdem ob insbesondere Grüne Wellen auf den Hauptverkehrsstraßen angestrebt oder ob eine Netzoptimierung ohne besondere Rücksicht auf durchgehende Verkehrsströme der Hauptverkehrsstraßen durchgeführt werden soll. Im zuerst genannten Fall wird die Grünbandbreite maximiert. Bei der Strategie Netzoptimierung werden mit heuristischen Algorithmen die Verlustzeiten minimiert, wobei auch die Phasenfolge variiert werden kann.

In der Stufe **Verbesserung** werden automatisch Schwachstellen der überschläglichen Lösung aus der vorangegangenen Stufe ermittelt und analysiert. Abhängig von der gewählten Strategie werden im Programm Verbesserungsversuche gemacht. Daneben soll dem Benutzer hier die Möglichkeit gegeben werden, interaktiv einzugreifen und so seine Erfahrungen und besonderen Anforderungen einfließen zu lassen. Dabei soll er durch aussagekräftige grafische Darstellungen unterstützt werden.

Der Abschluß der Entwicklungsarbeiten am Programmsystem SIGMA ist bis zum Ende des Jahres 1987 vorgesehen. Bis dahin soll SIGMA auch in einem Testnetz in Darmstadt erprobt werden.

Neben Vorbereitungsmodellen, in denen das gesamte Straßennetz betrachtet wird, werden oftmals auch Verfahren eingesetzt, die die Lichtsignalsteuerung in einem Straßenzug optimieren. Der Netzzusammenhang ist dann vom Anwender herzustellen. Für solche Verfahren, die in der Regel eine Optimierung der Grünbandbreite als oberstes Kriterium verwenden, sind stellvertretend PASSER II (CHANG u.a., 1984) und MAXBAND (KELSON, 1980) zu nennen. Eine Berechnungsmethodik für Linien- und Flächenkoordinierungen auf der Basis einer Optimierung von Grünbandbreiten wird von SCHNABEL (1984) beschrieben.

Für die Steuerungsmodelle (On-Line) können als Beispiel für den heutigen Stand der Technik die Modelle PBIN (siehe BOESEFELDT u.a., 1973) und SCOOT (siehe HUNT

u.a., 1981) genannt werden.

Das Steuerungsmodell PBIN basiert auf einem bereits 1963 von MILLER entwickelten Real-Time-Algorithmus. Auf der Grundlage von Detektormessungen wird in Intervallen von üblicherweise 2 Sekunden überprüft, ob eine Verlängerung der gerade signalisierten Phase oder ein sofortiger Phasenwechsel die insgesamt geringeren Zeitverluste zur Folge hat. Es ergeben sich ständig wechselnde Freigabezeiten, Umlaufzeiten und Phasenfolgen, wobei bestimmte Grenzwerte vorgegeben werden können.

Das Modell SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimisation Technique) befindet sich seit 1973 in Großbritannien beim TRRL in der Entwicklung. Voraussetzung für die Anwendung von SCOOT ist die Anbringung von Detektoren (Induktionsschleifen) in allen Zufahrten. Sie sind nicht unmittelbar an der Haltlinie, sondern so weit wie möglich stromaufwärts anzuordnen. Über diese Detektoren werden zeitliche Ganglinien für den Verkehrsfluß ermittelt, die sich - von geringen Änderungen abgesehen - zyklisch in jedem Umlauf wiederholen. Auf der Grundlage dieser Ganglinie ist unter Vorgabe einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit die Vorhersage des Zuflusses am folgenden Knotenpunkt mit LSA möglich und unter Vorgabe einer Sättigungsverkehrsstärke auch die Berechnung der Staulänge und der Lage des Stauendes. Mit diesen Daten können die drei Elemente Umlaufzeit, Freigabezeitanteile und Versatzzeiten optimiert werden.

#### 4. PROBLEME UND DEREN LÖSUNGSMÖGLICHKEITEN

Hier sind zunächst die **Anwendungshemmnisse** zu nennen. Gemeint sind damit der große Aufwand für die Datenerfassung und Dateneingabe, die ungewohnte, nicht immer praxiserrechte Ausgabeform der Ergebnisse, das vielerorts anzutreffende Fehlen geeigneter Rechner sowie der ungewohnte Umgang mit Rechnern generell. Zu großem Aufwand für die Bereitstellung der erforderlichen Daten kann durch sinnvolle Modellvereinfachung und Vorgabe von Standardwerten, durch dialogorientierte Dateneingabe und durch unterstützende Datenverwaltungssysteme reduziert werden. Gleichzeitig sollte den Nutzern die wesentliche Verringerung des Aufwandes bei mehrfachen Anwendungen verdeutlicht werden. Zur Verbesserung der Ausgabeform der Ergebnisse können flexible Programmteile für die Ausgabe (aufbauend auf einem standardisierten Graphiksystem) entwickelt werden. Dem Fehlen geeigneter Rechner ist dadurch zu begegnen, daß man die Programme auf standardisierten und leistungsfähigen Kleinrechnern implementiert. Und die Probleme beim Anwenden schließlich können durch entsprechende Schulung und durch benutzerfreundlicheres und dialogorientiertes Arbeiten gemildert werden.

Ein zweiter Problembereich ist die **Störung Grüner Wellen bei Flächenkoordinierung nach dem Prinzip der War-**

**zeitminimierung.** Lösungsmöglichkeiten für diesen Problembereich werden in der Modifizierung vorhandener Modelle, in der Kopplung vorhandener Modelle (zum Beispiel PASSER II-84 und TRANSYT) sowie in der Neuentwicklung von Modellen (zum Beispiel SIGMA) gesehen.

Ein Nachteil der verfügbaren Modelle ist die weitgehende **Vernachlässigung von Fußgängern und Radfahrern.** Dies ist angesichts der heutigen prinzipiellen Verkehrspolitik nicht mehr zu vertreten. Die vorhandenen Modelle müssen also dementsprechend erweitert werden.

Weitere Schwierigkeiten treten dadurch auf, daß eine **einheitliche Umlaufzeit oftmals nicht optimal ist.** Unterschiedliche Umlaufzeiten können in Optimierungsverfahren jedoch in der Regel nicht berücksichtigt werden. Eine Ausnahme ist das Modell SCOOT. Hier besteht jedoch der Nachteil, daß die Einteilung in Teilbereiche mit unterschiedlichen Umlaufzeiten vom Benutzer vorzugeben ist, und daß die Umlaufzeiten für jeden Teilbereich ohne Berücksichtigung anderer Teilbereiche gewählt werden. Neue Forschungen sind also erforderlich. Am Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Hochschule Darmstadt wurden entsprechende Untersuchungen eingeleitet.

Nach wie vor besteht bei den Modellen das Problem, daß **übersättigte Verkehrszustände nicht zufriedenstellend abgebildet werden können.** Auch hier muß die Forschung tätig werden und neue Modelle entwickeln.

Ein weiterer Problembereich sind die **Modelle zur Pulkauflösung.** Hier stellt sich vor allem die Frage der Wahl von "richtigen" Parametern für die Intensität der Pulkauflösung. Diese sind sehr stark von spezifischen örtlichen Gegebenheiten abhängig, und ihre falsche Wahl läßt es manchmal fraglich erscheinen, ob Pulkauflösungen in Modellen überhaupt berücksichtigt werden sollten. Auch hier könnten Forschungen angesetzt und insbesondere dabei auch empirische Erhebungen durchgeführt werden.

In der Praxis tritt häufig das Problem auf, daß die der Berechnung zugrundeliegenden Daten nicht dem später **tatsächlich eintretenden Verkehrszustand entsprechen.** Lösungsmöglichkeiten bieten hier die On-Line-Steuerung sowie verbesserte Erhebungs- und Prognoseverfahren.

Schließlich und nicht zuletzt soll ein Problembereich angesprochen werden, der dadurch gekennzeichnet ist, daß die **vorhandene Hardware nicht ausreicht, um eine On-Line-Steuerung zu ermöglichen.** Eine (rasch wirksam werdende, aber teure) Lösungsmöglichkeit ist die finanzielle Investition. Mittel- bis langfristig muß die Forschung versuchen, Verfahren zu entwickeln, die mit geringerem Aufwand zweckgerecht eingesetzt werden können.

Insgesamt ist festzustellen, daß auch auf diesem Spezialgebiet der Straßenverkehrstechnik zahlreiche Fragen offen sind. Einige davon wurden vorstehend kurz skizziert. Weitere Fragen werden sich ständig auftun. Die Lichtsignaltechnische Forschung wird also auch langfristig nicht arbeitslos werden. Und der Aufwand lohnt sich, denn es geht prinzipiell darum, den vorhandenen Straßenraum, ohne ihn mit großem finanziellen Aufwand und mit den sich sonst ergebenden Nachteilen für die Umwelt stark vermehren müssen, besser als bisher zu nutzen. Diese prinzipielle Zielrichtung ist weltweit unumstritten. Allerdings sollten die Forschungsstellen immer beherzigen, daß auch bei der weiteren Verbesserung der Modelle Aufwand und Nutzen in einem sinnvollen Verhältnis stehen. Bei zu spezialisierter Forschungstätigkeit wird dieser Aspekt oftmals nicht gebührend beachtet.

#### LITERATUR

BIELEFELDT, C.; MEISSNER, J.; SCHLABBACH, K.  
Entwicklung und Einsatz eines Optimierungsverfahrens für die Lichtsignalsteuerung.  
Bad Ems, 1986

BOESEFELDT, J.; EVERTS, K.; PHILIPPS, P.  
Untersuchungen zur verkehrsabhängigen Signalsteuerung - Teil B: Steuerungsmodelle für Straßenzüge.  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 131, 1972  
Teil C: Steuerungsmodelle für Teilnetze.  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 149, 1973  
Teil D: Integriertes Betriebssystem für Netze.  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 188, 1975

CHANG, E.C.; MESSER, C.J.; MARSDEN, B.G.  
Analysis of Reduced-Delay Optimization and other Enhancements to PASSER II-80 - PASSER II-84 - Final Report.  
Texas Transportation Institute, Research Report 375-1F, 1984

HUNT, P.B.; ROBERTSON, D.I.; BRETHERTON, R.D.; WINTON, R.I.  
SCOOT - A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals.  
Transport and Road Research Laboratory, LR 1014, Crowthorne, 1981

KELSON, M.D.  
Optimal Signal Timing for Arterial Signal Systems.  
Volume 2: MAXBAND User's Manual.  
Federal Highway Administration, Report No. FHWA/RD-80/083, Washington, D.C., 1980

MILLER, A.J.  
A Computer Control System for Traffic Networks.  
Proc. 2nd International Symposium on Theory of Road Traffic Flow, London, 1963

ROBERTSON, D.I.  
TRANSYT - A Traffic Network Study Tool.  
Road Research Laboratory, LR 253, Crowthorne, 1969

SCHNABEL, W.  
Die verkehrstechnische Berechnung von Linien- und Flächenkoordinierungen.  
Straße 24 (1984) Nr. 10, S. 289-292

VINCENT, R.A.; MITCHELL, A.I.; ROBERTSON, D.I.  
User Guide to TRANSYT Version 8.  
Transport and Road Research Laboratory, LR 888, Crowthorne, 1980