

# Verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung mit Fuzzy-Logik – ein modulares, praxisorientiertes Verfahren

Michael G. H. Bell, Fritz Busch, Thorsten Mieden und Tessa Sayers

## 1. Einleitung

Ein Beitrag zur Lösung der heutigen Verkehrsprobleme kann mit der Erhöhung der „Intelligenz“ und der Adaptivität der Steuerverfahren zur Knotenpunktsteuerung geleistet werden. Durch die Verwendung von Fuzzy-Logik wird es möglich, verschiedene Eingangswerte von konkurrierenden Verkehrsteilnehmern in Beziehung zu setzen und differenziert zu reagieren. Fuzzy-Logik ist eine „unscharfe Logik“, die schon 1965 von L. Zadeh entwickelt und angewendet wurde [Zad 65]. Im Gegensatz zur digitalen, zweiwertigen Logik handelt es sich hier um eine wissensbasierte, mehrwertige Logik, die beliebige Zustände zwischen 0 und 1 annehmen kann (zur Einführung siehe [Gar 91] und [Hel 91]). Die zur LSA-Steuerung verwendete Wissensbasis wird in Form von umgangssprachlichen Regeln implementiert und ist für den Verkehrsingenieur leicht nachvollziehbar.

Die Vorteile der Fuzzy-Logik sind vor allem in folgender Hinsicht zu sehen:

- Keine scharfen Schwellenwerte, sondern stufenlose Übergänge.
- Beschreibung des Steuerverhaltens mit Hilfe von leicht verständlichen, umgangssprachlichen Regeln (kein mathematisches Modell notwendig).
- Gut geeignet zur Beschreibung nichtlinearer Zusammenhänge.
- Schnelle Reglererstellung und -anpassung.
- Leichte Verknüpfung verschiedener Eingangswerte und einfache Einführung neuer Eingangswerte möglich.

- Kleine Änderungen der Eingangsgrößen bewirken (normalerweise) eine kleine Änderung der Ausgangsgröße.
- Hohe Adaptivität, da nicht auf einen Arbeitspunkt optimiert.

Fuzzy-Logik wird in der Straßenverkehrstechnik bei Siemens bereits erfolgreich zur Störfallerkennung auf Autobahnen [Bus 94] verwendet. Die bisher veröffentlichten Ansätze zur Verwendung von Fuzzy-Logik für LSA-Steuerungen sind meist sehr stark vereinfacht und entsprechen häufig nicht den Anforderungen für einen realen Einsatz [Pap 77] [Nak 85]. Es handelt sich meist um Komplettlösungen, die sich nur sehr schwer auf die in Europa verwendeten Hardwareplattformen transferieren lassen. In anderen Ansätzen wird versucht, spezielle Lösungen für Standardkreuzungen zu entwickeln. Diese sind meist stark vereinfacht, bieten wenig Freiheiten und entsprechen daher nicht den Anforderungen der Verkehrsingenieure. Ein möglichst universeller Einsatz ist damit nicht möglich. Vielfach werden vom Verkehrsingenieur auch genauere Kenntnisse der Fuzzy-Logik verlangt, um bei der Projektierung der Steuerung Regeln und Fuzzy-Sets ändern zu können.

Im Gegensatz dazu verfolgt die hier beschriebene Siemens-Lösung folgenden Weg:

- Entwickelt wurde ein hybrides Steuerungsverfahren, in dem nur einzelne Aufgaben mit Hilfe der Fuzzy-Logik bearbeitet werden.
- Es handelt sich nicht um eine Stand-Alone-Lösung, sondern um eine Erweiterung der bestehenden Siemens LSA-Steuerverfahren.
- Es werden Black-Box-Module zur Verfügung gestellt, die anhand einer überschaubaren Parameterzahl konfiguriert werden. Die Regelbasis und die Fuzzy-Sets bleiben dabei unverändert. Es sind daher keine speziellen Kenntnisse der Fuzzy-Logik zur Projektierung notwendig.

Es handelt sich um einen universellen Ansatz, der unabhängig ist von speziellen Kreuzungsgeometrien, speziellen Detektorkonfigurationen und standardisierten Phasenabläufen.

- Der Ansatz ist modularorientiert und erweiterungsfähig. Dabei wird unterschieden zwischen Modulen für die Beobachtungsebene und für die Steuerungsebene.
- Die Module wurden mit Hilfe eines modernen Simulationstools (SIMULA) getestet und optimiert.
- Die Fuzzy-Module wurden mit einem modernen CAE-Tool (SieFuzzy) entwickelt und vorgetestet.

Mit Hilfe der hier vorgestellten Fuzzy-Module wird eine Dimensionierung der Grünzeiten für den folgenden Umlauf und eine Bemessung der Freigabezeiten im laufenden Umlauf vorgenommen.

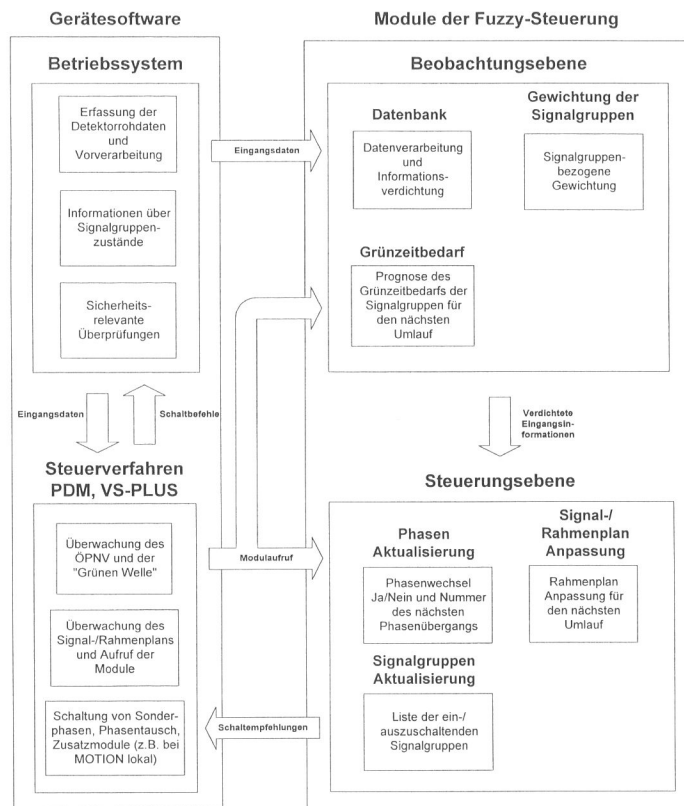
## 2. Das Konzept

Die verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung mit Fuzzy-Logik ist modular aufgebaut und besteht aus zwei Ebenen (vgl. Bild 1). In der *Beobachtungsebene* befinden sich Module zur Datenerfassung, Datenaufbereitung und Informationsverdichtung. Als Eingangswerte werden vom Steuergerät aufbereitete Detektorwerte und Informationen über den Systemzustand verwendet. Daraus werden verdichtete, signalgruppenbezogene Informationen erzeugt. Mit Hilfe dieser Informationen wird in der *Steuerungsebene* eine Anpassung des Signal-/Rahmenplans für den nächsten Umlauf vorgenommen. In einem weiteren Modul wird eine Empfehlung zum Verlängern oder Abschalten der laufenden Phase/Signalgruppen erzeugt und die Nummer des nächsten Phasenübergangs bzw. die einzuschaltenden Signalgruppen an das übergeordnete Steuerverfahren (PDM oder VS-PLUS) ausgegeben. Dieses übernimmt neben der eigentli-

Vortrag bei der Heureka '96 am 13./14. 3. 1996 in Karlsruhe

Verfasseranschriften: Prof. Dr. Bell, MSc. Sayers, University of Newcastle, Transport Operations Research Group, Claremont Tower, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, Großbritannien; Dipl.-Ing. Mieden, Dr. Busch, Siemens AG, Anlagentechnik, Straßenverkehrstechnik, Hofmannstraße 51, 81359 München

# 1: Konzeptüberblick



chen Schaltung der Signale die Überwachung des ÖPNV und der Grünen Wellen. Es überprüft die Bedingungen im Signal-/Rahmenplan und ruft bei Bedarf die Module in der Steuerungsebene der Fuzzy-Steuerung auf. Diese Module aktivieren die benötigten Module in der Beobachtungsebene. Das Modul „Datenbank“ wird automatisch im Sekundentakt aktualisiert. Je nachdem, welches Steuerverfahren verwendet wird, kann entweder das Modul „Phasen Aktualisierung“ oder das Modul „Signalgruppen Aktualisierung“ aufgerufen werden. Die Schaltbefehle der Fuzzy-Module werden vom Steuerverfahren in Schaltbefehle umgesetzt. Das Betriebssystem im Steuergerät übernimmt weiterhin die sicherheitsre-

levanten Überprüfungen. Es empfängt die Detektorrohdaten und verarbeitet diese in Zeitlücken, Belegungs- und Zählwerte.

Die Module sind allgemeingültig konzipiert, um die Unabhängigkeit von festgelegten Kreuzungsgeometrien und Detektorkonstellationen zu gewährleisten. Es wird jedoch, wie bei jeder verkehrsabhängigen Steuerung, eine Grundausstattung an Detektoren vorausgesetzt. Die Module werden anhand einer überschaubaren Anzahl von Parametern eingestellt. Standardmäßig sind die Parameter so vorgelegt, daß eine Gleichbehandlung aller Signalgruppen erfolgt. Um einzelne Signalgruppen zu priorisieren, können die zugehörigen Parameter geändert werden. Die verwendeten Eingangswerte sind

abhängig von der Lage der Detektoren. Bei der Verwendung von Phasensteuerungen wird eine Schaltempfehlung in eine Folgephase ausgegeben, wenn die Gewichtung der laufenden Phase kleiner oder gleich der Gewichtung einer Folgephase ist. Analog werden für VS-PLUS die Empfehlungen zum Ein- oder Ausschalten von Verkehrsströmen erzeugt.

## 2.1 Module der Beobachtungsebene

Die Beobachtungsebene besteht im wesentlichen aus drei Modulen. Im Modul „Datenbank“ werden Eingangswerte wie z.B. Belegungsgrad, Zeitlücke, Zählwerte während der Sperrzeit und Zählwerte während der Freigabezeit signalgruppenbezogen aufbereitet und gespeichert. Mit Werten aus dieser Datenbank und Zusatzinformationen über die letzte abgeschlossene Zeitlücke vor Beginn der Sperrzeit und der Zeitdauer bis zum Eintreffen des ersten Fahrzeugs nach Beginn der Sperrzeit werden im Modul „Grünzeitbedarf der Signalgruppen“ (vgl. Bild 2) die benötigten Grünzeiten der Signalgruppen für den nächsten Umlauf prognostiziert. Diese Berechnung wird einmal, am Ende des Umlaufs, vorgenommen. Mit den Informationen über den Grünzeitbedarf der SG für den aktuellen Umlauf, Werten aus der Datenbank, Signalgruppenzuständen und Wartezeiten wird im Modul „Gewichtung der Signalgruppen“ sekundlich eine Bewertung der Dringlichkeit des Freigabewunsches vorgenommen. Dazu wird für jede Signalgruppe eine Gewichtung berechnet. Je höher das Gewicht einer Signalgruppe ist, desto größer ist ihr Wunsch, Freigabezeit zu bekommen. Bei der Erzeugung der Gewichtung wird zwischen Signalgruppen, die freigeschaltet sind, und Signalgruppen, die aktuell gesperrt sind, unterschieden.

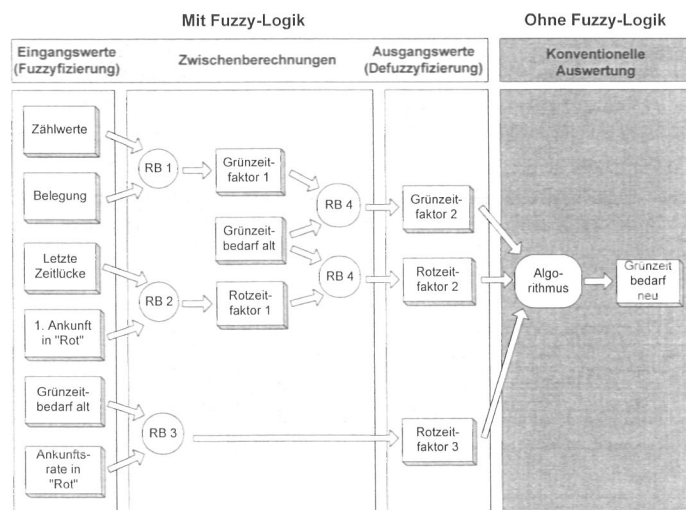
Das Modul „Grünzeitbedarf der Signalgruppen“ besitzt 4 Regelbasen. Die Verknüpfung der Eingangswerte ist abhängig vom Signalzustand und von der Lage der Detektoren.

Während der Grünzeit der Signalgruppen werden Zähl- und Belegungswerte ermittelt. Diese Werte werden normiert, fuzzyfiziert und mit Hilfe der Regelbasis 1 zu einem Grünzeitfaktor 1 verarbeitet (vgl. Bild 3 und Bild 4).

Die Regeln in der in Bild 3 dargestellten Regelbasis 1 sind in der folgenden Form zu lesen:

Regel 1: WENN die Belegung klein ist UND der Zählwert klein ist DANN ist der Grünzeitfaktor sehr klein.

## 2: Aufbau des Moduls „Grünzeitbedarf der Signalgruppen“

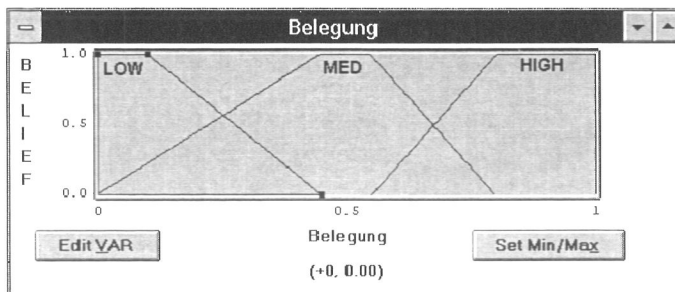


Regel 2: WENN die Belegung mittel ist UND der Zählwert klein ist DANN ist der Grünzeitfaktor mittel.

Regel 3: WENN die Belegung klein ist UND der Zählwert mittel ist DANN ist der Grünzeitfaktor klein.

Die Terme „sehr klein (VL)“, „klein (LOW)“, „mittel (MED)“ und „groß (HIGH)“ werden als linguistische Beschreibungen der Eingangs-/Ausgangsgrößen bezeichnet und durch Fuzzy-Sets repräsentiert. In dieser Form läßt sich das Expertenwissen relativ leicht und nachvollziehbar in einer Wissensbasis (Regelbasis) abbilden. Mit Hilfe der Fuzzy-Sets (LOW, MED, HIGH) (vgl. Bild 4) wird der normierte, „scharfe“ Belegungswert für die weitere Verarbeitung im Fuzzy-Controller in eine unscharfe Beschreibungsform

4: Fuzzy-Sets der Eingangsgröße Belegung



| RB_1     |      | ZAEHLWERT |          |      |
|----------|------|-----------|----------|------|
| GR_FA_1  |      | LOW       | MED      | HIGH |
|          |      |           |          |      |
| BELEGUNG | LOW  | VL<br>1   | LOW<br>3 |      |
|          | MED  | MED<br>2  | MED      |      |
|          | HIGH |           |          |      |

3: Ausschnitt aus der Regelbasis 1

umgewandelt. Er wird dabei durch seinen Zugehörigkeitsgrad (Belief) zu den Fuzzy-Sets beschrieben. Dieser Vorgang wird als Fuzzifizierung bezeichnet. Die Umwandlung des „unscharfen“ Werts am Ausgang des Fuzzy-Controllers in einen scharfen Wert wird dementsprechend als Defuzzifizierung bezeichnet.

Der so ermittelte Grünzeitfaktor wird in einer 2. Stufe über die Regelbasis 4 mit dem Grünzeitbedarf für den aktuellen Umlauf verknüpft. Die resultierende Ausgangsgröße wird Grünzeitfaktor 2 genannt.

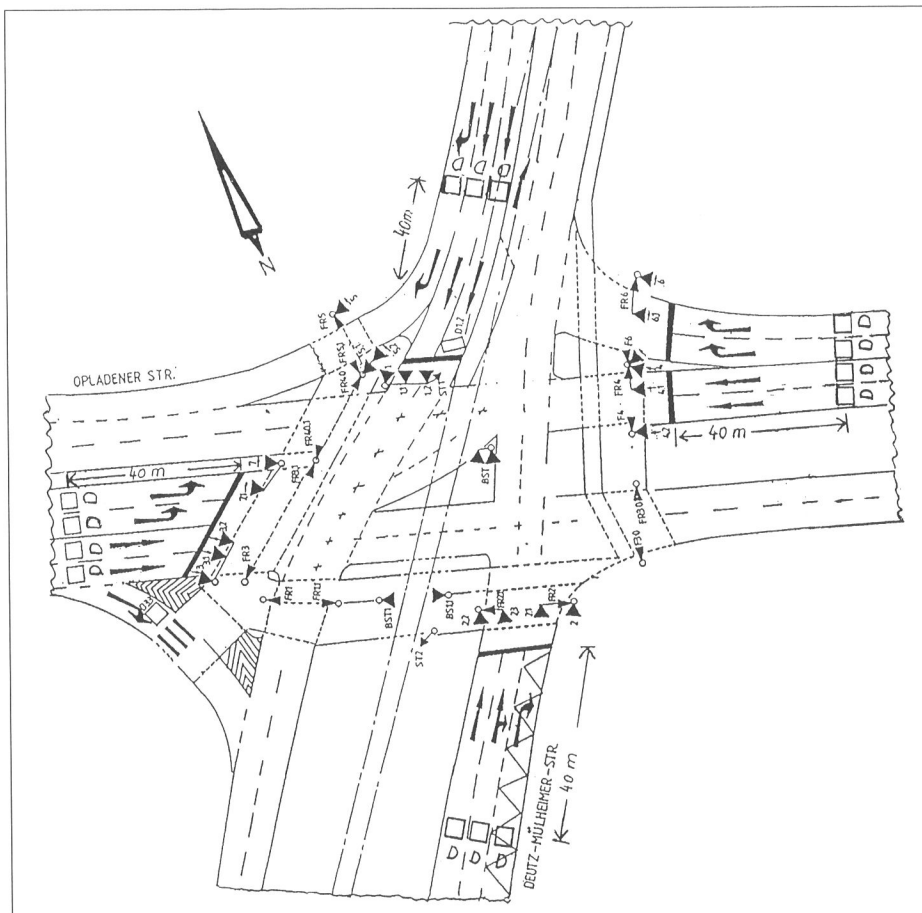
Während der Rotzeit der Signalgruppen werden die verwendeten Eingangsgrößen in Abhängigkeit von der Detektorlage ermittelt. Falls nur Detektoren an der Haltelinie vorhanden sind, wird die letzte Zeittücke vor dem Grünzeitabbruch über die Regelbasis 2 mit der Zeitdauer bis zum ersten Eintreffen eines Fahrzeugs in „Rot“ verknüpft. Dieser Rotzeitfaktor 1 wird ebenfalls in einer 2. Stufe über die Regelbasis 4 mit dem Grünzeitbedarf für den aktuellen Umlauf verknüpft. Die resultierende Ausgangsgröße wird Rotzeitfaktor 2 genannt. Falls Detektoren zur Bemessung (ab ca. 35 m vor der Haltelinie) vorhanden sind, wird die Kfz-Ankunftsrate in „Rot“ mit dem Grünzeitbedarf für den aktuellen Umlauf verknüpft. Der resultierende Faktor wird Rotzeitfaktor 3 genannt. Bei mehrspurigen Fahrbahnen wird jeweils der max. Grünzeit- bzw. Rotzeitfaktor verwendet.

## 2.2 Module der Steuerungsebene

Die Steuerungsebene umfaßt drei Module. Im Modul „Signal-/Rahmenplan Anpassung“ wird anhand des Grünzeitbedarfs der Signalgruppen für den nächsten Umlauf eine Anpassung des Signal-/Rahmenplans für den nächsten Umlauf vorgenommen. Dies geschieht einmal am Ende eines Umlaufs unter Berücksichtigung von Koordinierungspunkten und Einschränkungen durch den Planer, das übergeordnete Steuerungsverfahren und unter Beibehaltung der Struktur des vorgegebenen Signal-/Rahmenplans. Dabei ist es klar, daß das Verbesserungspotential dieses Moduls für den Verkehrsablauf mit der Zunahme von Randbedingungen und Einschränkungen sinkt. Im Modul „Signalgruppen Aktualisierung“ wird anhand des Signal-/Rahmenplans und der Signalgruppengewichtungen eine Liste der aus- bzw. einzuschaltenden Signalgruppen generiert. Im Modul „Phasen Aktualisierung“ werden die Gewichtungen der Signalgruppen zu Phasengewichtungen verarbeitet und die Nummer des nächsten Phasenübergangs ausgegeben. Bei mehreren möglichen Folgephasen wird die für den Verkehrsablauf optimale Folgephase ermittelt.

## 3. Simulationsergebnisse

Bei dem gewählten Versuchsknoten handelt es sich um einen kritischen,



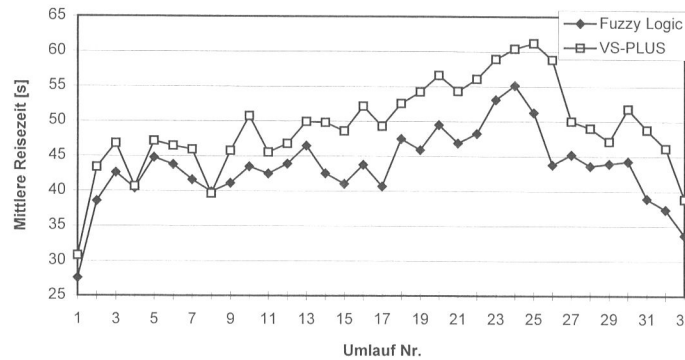
5: Lageplan der Versuchskreuzung

koordinierten Knotenpunkt (vgl. Bild 5). Für die Simulation wurde eine verkehrsabhängige VS-PLUS-Versorgung erstellt. Die Umlaufzeit während der Morgenspitze beträgt 110 sec. Zur Bemessung der Verkehrsströme wird das Zeitlückenverfahren verwendet. Für die Definition der Verkehrsstärken in den Zuflüssen wurden aktuelle Meßwerte verwendet, um eine möglichst realistische Simulation zu gewährleisten. Die Module der Lichtsignalsteuerung mit Hilfe der Fuzzy-Logik wurden als Stand-Alone-Steuerung unter den gleichen Voraussetzungen getestet. Zum Vergleich der Qualität der Steuerungen wurden die mittleren Reisezeiten aller Kfz zum Überqueren des Knotenpunktes aufgezeichnet (110-Sekunden-Intervalle).

Der Vergleich in Bild 6 zeigt, daß die Reisezeiten bei Verwendung der Fuzzy-Module im Schnitt um ca. 10 % kürzer sind im Vergleich zur verwendeten VS-PLUS-Steuerung. Besonders deutlich treten diese Gewinne bei höheren Knotenpunktauslastungen auf. Ähnliche Vorteile lassen sich auch in Hinblick auf die Rückstaulängen und die Anzahl der Halte zeigen. Dies liegt an der höheren Adaptivität der Steuerung und an der Verwendung von mehr Eingangsinformationen. In der praktischen Anwendung ist das Verbesserungspotential abhängig von den Freiheiten, die der Planer erlaubt. Je größer die Einschränkungen durch Koordinierungspunkte, feste Umlaufzeiten und starre Signal-/Rahmenpläne, desto geringer ist die Adaptionfähigkeit und somit das Verbesserungspotential. Bei einer freien Definition des Signal-/Rahmenplans und variabler Umlaufzeit sucht die Fuzzy-Steuerung selbständig die günstigsten Steuerparameter und paßt sich ständig an die aktuelle Verkehrssituation an. Dies geschieht unter Beachtung der vorgegebenen Richtlinien in den RiLSA. Somit ist es möglich, bei Planungen mit genügend Entscheidungsspielraum, einen einheitlichen Signal-/Rahmenplan für den gesamten Tagesablauf zu verwenden.

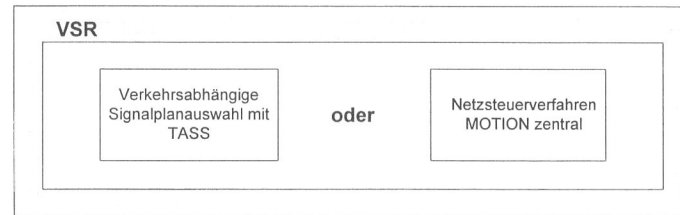
#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Ansatz zur verkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerung mit Hilfe der Fuzzy-Logik wird ein neuer, praxisorientierter Weg aufgezeigt, aktuelle Methoden der wissensbasierten Regelungstechnik anwendungsorientiert und nutzbringend für die Verbesserung konventioneller Techniken einzusetzen. Eine wesentliche Leitlinie bei der Entwicklung war (und ist) die nahtlose Einbindung der Mo-



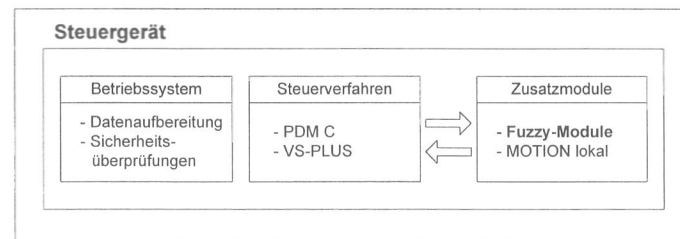
6: Vergleich der mittleren Reisezeiten aller Verkehrsströme während der Morgenspitze

#### Netzebene



7: Steuerverfahren auf zentraler und lokaler Ebene

#### Lokale Ebene



dule in die übrige Welt der Siemens Lichtsignalsteuerung (vgl. Bild 7). Das heißt konkret zunächst auf der lokalen Ebene die Einbindung in die Steuerverfahren PDM-C und VS-PLUS. Bei der Projektierung werden keine grundsätzlichen neuen Anforderungen an den Verkehrsingenieur gestellt, da die Module auf den Planungen des Verkehrsingenieurs aufbauen. Sie werden ähnlich wie sonstige Zusatzmodule (z.B. die Bausteine der MOTION lokal Steuerung) über die Siemens Traffic Language versorgt. Damit ergibt sich zugleich die Überprüfung mit den zugehörigen Hilfsmitteln des Verkehrsingenieur Arbeitsplatzes (z.B. Simulation und Wirkungsanalyse).

Nachdem das Verfahren inzwischen in umfangreichen Labortests mit Hilfe von simulierten und realen Verkehrsdaten seine Tauglichkeit bewiesen hat, werden 1996 erste Praxistests an ausgewählten Kreuzungen durchgeführt.

#### Verwendete Abkürzungen

[Name Jahr] – Literaturhinweise (siehe Schrifttum)  
 MOTION® – Method for the Optimization of Traffic Signals in Online Controlled Networks (MOTION ist registrierte Marke der Siemens AG)  
 PDM – Phasenorientiertes Steuerverfahren mit dezentraler Modifikation  
 RiLSA – Richtlinien für Lichtsignalanlagen

SieFuzzy – Siemens Fuzzy CAE Tool für Windows  
 SIMULA – Simulationsprogramm zur Nachbildung des innerstädtischen Verkehrsgeschehens  
 TASS – Traffic Actuated Signalplan Selection  
 VS-PLUS – Verkehrsabhängige Steuerung, parametrierbare Logik, unabhängig und standardisiert

#### Schrifttum

- Bus 93 Busch, F.; Kruse, G.: MOTION, Ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung. HEUREKA, 1993
- Bus 94 Busch, F.; Ghio, A.: Automatische Störfallerkennung auf Autobahnen mit Hilfe von Fuzzy-Logik. Sonderdruck, Siemens AG Straßenverkehrstechnik, 1994
- Gar 91 Gariglio, D.: Fuzzy in der Praxis. Sonderdruck aus Elektronik Heft 20/1991, Franzis-Verlag, München
- Hel 91 Palm, R.; Hellendoorn, H.: Fuzzy-Control, Grundlagen und Entwicklungsmethoden. KI 4/1991
- Nak 85 Nakatsujama, M.; Nagahashi, H.; Nishizuka, N.: Fuzzy Logic Phase Controller for Traffic Junctions in the One-Way Arterial Road. IFAC Proceeding Series, 1985
- Pap 77 Pappis, C. P.; Mamdani, E. H.: A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 7, No. 10, 1977
- Say 95 Sayers, T. M.; Bell, M. G. H.; Mieden, Th.; Busch, F.: Improving the traffic responsiveness of signal controllers using Fuzzy-Logic. IEE, kolloquium on urban traffic management, 11/95
- Zad 65 Zadeh, L. A.: Fuzzy-Sets. Information and Control, 1965