

# TRAVOLUTION – Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation

Robert Braun, Fritz Busch, Carsten Kemper, Robert Hildebrandt, Florian Weichenmeier, Cornelius Menig, Ingrid Paulus und Renate Preßlein-Lehle

Der Beitrag stellt die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojekts TRAVOLUTION dar. Ziel des Projekts war die Verbesserung des Verkehrsablaufs in der Stadt Ingolstadt. Dafür wurden zwei Ansätze verfolgt: die Online-Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung mit evolutionären Algorithmen und die LSA-Fahrzeug-Kommunikation zur individuellen Information des Fahrers. Für den ersten Ansatz wurde mit GALOP ein evolutionärer Algorithmus zur Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung entwickelt, der in die adaptive Netzsteuerung BALANCE integriert wurde und dort als Alternative zum bisher vorhandenen Hill-Climbing Algorithmus als Optimierungsmethode zur Verfügung steht. In einem großen Teil des Hauptstraßennetzes der Stadt Ingolstadt wurde die Lichtsignalsteuerung auf die adaptive Netzsteuerung umgestellt. Der zweite Ansatz zeigt die technische Machbarkeit der LSA-Fahrzeug-Kommunikation. An drei Knotenpunkten wurden die Lichtsignalanlagen so ausgestattet, dass die sich nähernden Fahrzeuge Auskunft über die in der nächsten Zukunft zu erwartende Signalisierung erhalten. Es wurden zwei Anwendungsfälle umgesetzt. Zum einen wird einem Fahrer, der sich einer Lichtsignalanlage nähert, die für ihn optimale Geschwindigkeit empfohlen, um die folgende Kreuzung möglichst ohne Halt zu überfahren. Zum anderen wird einem vor einer LSA wartenden Fahrer die verbleibende Dauer der Rotphase angezeigt. Für beide Anwendungsfälle ist es notwendig, die Signalbilder einer LSA in naher Zukunft vorherzusagen.

The paper presents the central results of the research project TRAVOLUTION. The project's objective was to improve the traffic flow in the city of Ingolstadt through two different approaches: online-optimization of network-wide traffic signal control with evolutionary algorithms, and traffic signal to vehicle communication so as to inform the driver individually. For the first approach, the evolutionary algorithm for the optimization of the network-wide traffic signal control (GALOP) was developed. It has been integrated into the adaptive network control system BALANCE. The evolutionary algorithm is now available as an alternate optimization method to the former hill-climbing algorithm. The traffic signal control in a large part of the main street network of Ingolstadt was changed to the adaptive network control system. The second approach demonstrates the technical feasibility of traffic signal to vehicle communication. On three intersections the traffic signals have been equipped in a way that the approaching vehicles receive information about the predicted signalization in the near future. Two applications have been implemented. The first recommends to the approaching driver the optimal speed in order to be able to pass the next traffic signal without stopping. The second approach shows the driver waiting in front of a traffic signal the remaining red-time. For both applications it is necessary to predict the signalization for the near future.

## Verfasseranschriften:

Dr.-Ing. R. Braun,  
 robert.braun@vt.tum.de,  
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Busch,  
 fritz.busch@vt.bv.tum.de,  
 Technische Universität  
 München, Institut für  
 Verkehrswesen,  
 Arcisstraße 21,  
 80333 München;  
 Dr.-Ing. C. Kemper,  
 carsten.kemper@gevas.de,  
 Dr. rer. nat. R. Hildebrandt,  
 robert.hildebrandt@gevas.de,  
 Dipl.-Math. F. Weichenmeier,  
 florian.weichenmeier@  
 gevas.de,  
 GEVAS software, System-  
 entwicklung und Verkehrs-  
 informatik GmbH,  
 Nymphenburger Str. 14,  
 80335 München;  
 Dipl.-Tech. Math. C. Menig,  
 cornelius.menig@audi.de,  
 Dipl.-Phys. I. Paulus,  
 ingrid.paulus@audi.de,  
 Audi AG, I/EB-11,  
 Abt. Umwelt und Verkehr,  
 85045 Ingolstadt;  
 R. Preßlein-Lehle, verkehrs-  
 management@ingolstadt.de,  
 Stadt Ingolstadt,  
 Amt für Verkehrsmanagement  
 und Geoinformation,  
 Spitalstraße 3,  
 85049 Ingolstadt

## 1 Einleitung

Eine der Herausforderungen der heutigen Zeit ist die zunehmende Verkehrsbelastung in den Städten und die erhöhte Sensibilität gegenüber verkehrsbedingten Umweltbelastungen. Gleichzeitig bieten eine in den letzten Jahren leistungsfähiger gewordene Systemtechnik der Verkehrssteuerung und die beginnende Vernetzung von Fahrzeugen einige Chancen, dieser Herausforderung zu begegnen.

Lichtsignalanlagen (LSA) sind das wichtigste Steuerungsinstrument des Verkehrs-

managements in städtischen Verkehrsnetzen. Die LSA-bedingten Wartezeiten und Halte spielen eine wesentliche Rolle für den Verkehrsablauf und sind direkt korreliert zum Schadstoffausstoß der Fahrzeuge. Das Forschungsprojekt TRAVOLUTION verfolgte das Ziel, den Verkehrsablauf mittels zweier Ansätze zu verbessern:

- Online-Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung mit evolutionären Algorithmen (Abschnitt 2)
- LSA-Fahrzeug-Kommunikation zur individuellen Information des Fahrers (Abschnitt 3).

Im ersten Ansatz wurde ein innovatives Verfahren zur Echtzeit-Optimierung entwickelt, das den Evolutionsprozess der Natur nachahmt. Daher stammt auch der Projektname TRAVOLUTION, eine Kombination aus den englischen Wörtern traffic und evolution. Der zweite Ansatz nutzt die LSA-Fahrzeug-Kommunikation zur Weitergabe von Signalprogramm-Informationen an Fahrzeuge. Diese werden im Fahrzeug weiterverarbeitet und dem Fahrer dann z. B. in Form einer Geschwindigkeitsempfehlung weitergegeben, mit dem Ziel, unnötiges Anhalten zu vermeiden.

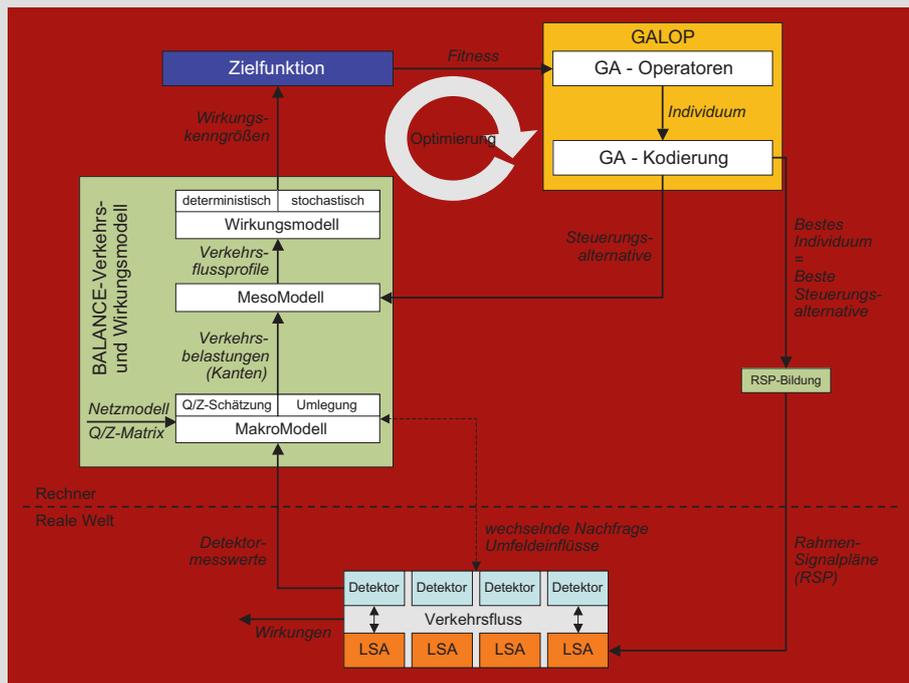


Bild 1: Ablauf der Online-Optimierung

TRAVOLUTION wurde von April 2006 bis Juni 2008 von der Audi AG, der GEVAS software GmbH und der TU München in Zusammenarbeit mit der Stadt Ingolstadt durchgeführt. Es wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie gefördert.

## 2 Online-Optimierung

Im ersten Teil des Forschungsprojektes wurde der Evolutionäre Algorithmus GALOP<sup>1</sup> zur Online-Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung entwickelt, in die Netzsteuerung BALANCE<sup>2</sup> implementiert und in Ingolstadt zum Einsatz gebracht. Im Bild 1 ist der gesamte Optimierungsablauf dargestellt. Er besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Verkehrs- und Wirkungsmodell
- Zielfunktion
- Optimierungsverfahren (GALOP).

Das Verkehrsmodell bildet aus den an den Messquerschnitten gezählten Verkehrsstärken eine interne räumlich-zeitliche Repräsentation des aktuellen Verkehrszustands. Das auf dem Verkehrsmodell aufbauende Wirkungsmodell dient zur Ermittlung der Wirkungskenngrößen, die wiederum die Eingangsgröße für die Zielfunktion sind. Diese liefert als Ergebnis die Fitness eines Individuums, d.h. einen skalaren Gütewert für eine Steuerungsalternative (= Signalpläne des Netzes). Die

Fitness ist wiederum der Eingangswert für das Optimierungsverfahren (GALOP), das die Signalpläne netzweit optimiert und als Ergebnis die beste Steuerungsalternative (= das beste Individuum) für den aktuellen Verkehrsfluss liefert. Alle Hauptkomponenten bilden zusammen mit der Rahmensignalplanbildung (RSP-Bildung) die verkehrsadaptive Netzsteuerung BALANCE, die alle 5 Minuten einen neuen Rahmensignalplan liefert (taktische Ebene). An den einzelnen Knotenpunkten reagiert darauf aufbauend eine lokale verkehrsabhängige Steuerung in der LSA sekundlich auf kurzfristige Anforderungsveränderungen im Verkehrsablauf (operationale Ebene).

### 2.1 Verkehrs- und Wirkungsmodell

Am Anfang eines Steuerungsschritts steht die Erfassung des aktuellen Verkehrszustands über Verkehrsmessungen im Netz. Für das aktuelle Berechnungsintervall erfassen Detektoren den Verkehr im Steuerungsnetz. Die Detektormesswerte werden einem Plausibilitätstest unterzogen und abschnittsbezogen aggregiert.

Aus den Detektormesswerten wird eine interne räumlich-zeitliche Repräsentation der aktuellen Verkehrsbelastungen mit Hilfe des makroskopischen Verkehrsmodells (MakroModell) erzeugt. Aus den makroskopischen Verkehrskenngrößen werden anschließend mit Hilfe des mesoskopischen Verkehrsflussmodells (MesoModell) für alle Strecken des Steuerungsnetzes zy-

kliche, sekundlich gerasterte Verkehrsflussprofile erzeugt.

Mit Hilfe des Wirkungsmodells werden die Auswirkungen der jeweiligen Steuerungsalternative für den nächsten Zeitschritt prognostiziert. Als relevante Wirkungskenngrößen können Wartezeiten, Zahl der Halte und Rückstaulängen berechnet werden. Die Wirkungskenngrößen werden durch zwei Teilmodelle gebildet: Mit den aus dem MesoModell erzeugten Verkehrsflussprofilen wird unter Berücksichtigung der Einflüsse der Lichtsignalanlagen, der Reisezeit und der Pulkauflösung der deterministische Anteil der Wirkungskenngrößen berechnet. Stochastische Schwankungen und Überlastungen werden mit Hilfe eines Warteschlangenmodells abgebildet. Durch die zeitliche Auflösung im Sekundenraster ist es dabei möglich, die verkehrlichen Wirkungen von Grünzeitdauern der Signalgruppen und der Versatzzeiten zwischen benachbarten Lichtsignalanlagen zu modellieren. Die Summe der Wirkungen aus dem deterministischen und dem stochastischen Modell gehen in die Zielfunktion ein.

### 2.2 Zielfunktion

In der Zielfunktion werden die Optimierungsziele abgebildet. Sie erhält die signalgruppenbezogenen Wirkungskenngrößen aus dem Verkehrs- und Wirkungsmodell und liefert als Resultat die Fitness (= Zielfunktionswert) eines Individuums, d.h. einen skalaren Gütewert für eine Steuerungsalternative.

Innerhalb des Forschungsprojektes wurde als Ziel die Minimierung der Wartezeiten ausgegeben. Entsprechend wurde die Zielfunktion wie folgt definiert:

$$\min! \text{Fitness} = \sum_{sg \in SG} \alpha_{sg} \cdot W_{sg}$$

mit  
 $\alpha$  = Gewicht für die Signalgruppe sg  
 $W$  = Wartezeit vor Signalgruppe sg.

Über die Gewichtung der Wartezeiten vor den einzelnen Signalgruppen ist die Berücksichtigung politischer Vorgaben z. B.

<sup>1</sup> Genetischer ALgorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung. Die Begriffe Genetischer Algorithmus und Evolutionärer Algorithmus werden hier synonym verwendet.

<sup>2</sup> BALANCE (BALancing Adaptive Network Control mEthod) wurde ursprünglich in den EU-Forschungsprojekten Munich Comfort und TABASCO an der TU München entwickelt (Friedrich, 1999). Im Jahr 2002 hat GEVAS software GmbH die Weiterentwicklung von BALANCE übernommen und zur Produktreihe geführt.

im Hinblick auf eine gewünschte Koordinierungsrichtung möglich. Nutzt man zusätzlich die Zahl der Halte, dann können die Gewichte auch so gewählt werden, dass der Zielfunktionswert Kraftstoffverbrauch oder Emissionen widerspiegelt.

2.3 Optimierungsverfahren GALOP

BALANCE benutzte bisher einen Hill-Climbing (HC) Algorithmus als Optimierungsmethode. Im Rahmen von TRAVOLUTION wurde mit GALOP ein neues Optimierungsverfahren entwickelt und in BALANCE implementiert. Wesentlicher Vorteil eines Evolutionären Algorithmus ist, dass alle Steuerungsparameter gleichzeitig optimiert werden können.

Von entscheidender Bedeutung für die Qualität und Funktionsfähigkeit der Optimierung ist die Kodierung der Steuerungsparameter. Unter Kodierung versteht man bei einem Evolutionären Algorithmus die Übersetzung der (in unserem Fall) Signalpläne in ein für einen Evolutionären Algorithmus verarbeitbares Individuum. Für die gegebene Problemstellung sind die folgenden problemspezifischen Randbedingungen für die Kodierung relevant:

- Planerische Vorgaben (erlaubte Umlaufzeiten, erlaubte Phasenfolgen)
- Zwingende Randbedingungen (Zwischenzeiten, Mindestfreigabedauern)
- Randbedingungen der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung.

Die Randbedingungen der in Deutschland weit verbreiteten messwertbasierten Zeitlückensteuerung sind im Bild 2 dargestellt. Der Rahmensignalplan für die lokale messwertbasierte Zeitlückensteuerung wird durch die T-Zeit-Grenzen ( $T_{iA}, T_{iB}$ ) festgelegt.

Netzweit optimiert werden die spätesten Startzeitpunkte der Phasenübergänge  $T_{iB}$  für alle LSA im Steuerungsgebiet. Um die Funktionalität der lokalen Steuerung sicherzustellen, ist für  $T_{iB}$  ein Intervall  $[T_{iA}^{min}; T_{iB}^{min}]$  vorgegeben, innerhalb dessen Grenzen sich  $T_{iB}$  befinden muss.

Im Optimierungsverfahren GALOP werden die Steuerungsalternativen über die sogenannte Kodierung durch die Individuen repräsentiert. Ein Individuum hat folgende Gestalt:

$$\{ \varphi, (\sigma_1, \omega_1, o_1, \theta_{11}, \dots, \theta_{1m_1}), (\sigma_2, \omega_2, o_2, \theta_{21}, \dots, \theta_{2m_2}), \dots, (\sigma_n, \omega_n, o_n, \theta_{n1}, \dots, \theta_{nm_n}) \}$$

Es enthält ein Gen  $\varphi$  für die gemeinsame Umlaufzeit sowie n sogenannte Chromo-

somen für n Knotenpunkte des zu optimierenden Netzes. Jedes Chromosom besteht aus einem Gen  $\sigma$  zur Festlegung der Phasenfolge, einem Gen  $\omega$  für den globalen Versatz, einem Gen  $o$  für den lokalen Versatz, sowie m Genen  $\theta$  für die Phasendauern bzw. Startzeitpunkte der Phasenübergänge. Jedes Gen nimmt einen reellen Wert zwischen 0 und 1 an.

Aufgrund der Versatzzeitbeschränkungen und der Randbedingungen der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung bleiben die Gene für den lokalen und globalen Versatz in der in TRAVOLUTION realisierten Implementierung des Algorithmus inaktiv. Es wurde eine spezielle sequenzielle Kodierung entwickelt, deren Prinzip in Braun und Kemper (2008) und in Braun (2008) beschrieben wird. Sie integriert neben den zwingenden Randbedingungen wie der Einhaltung von Zwischenzeiten auch direkt die Randbedingungen der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung, wodurch nur gültige Individuen entstehen.

Die Gestaltung der Operatoren des Evolutionären Algorithmus und deren Parametrierung haben einen großen Einfluss auf

die Qualität des Optimierungsablaufs. Da ein Individuum alle Knotenpunkte im Verkehrsnetz repräsentiert, müssen die Operatoren auf die Kodierung abgestimmt werden. Ein Knotenpunkt im Individuum wird als Satz von Genen (Chromosom) dargestellt. Bei der Rekombination werden von zwei Eltern-Individuen standardmäßig einzelne Gene zufällig zur Erzeugung der Nachwuchs-Individuen verwendet. Der Rekombinations-Operator wurde dahingehend erweitert, dass mit einer Wahrscheinlichkeit p die Rekombination auch auf die vollständigen Chromosomen (Knotenpunkte) angewendet wird. Bei der Mutation von Genen ist darauf zu achten, dass die Mutation innerhalb der T-Zeit-Grenzen stattfindet. Daher kann die Schrittweite der Mutation entweder für jedes Gen individuell oder für das gesamte Individuum eingestellt werden und sich bei Bedarf adaptiv anpassen.

Im Gegensatz zum Evolutionären Algorithmus, der alle Steuerungsparameter gleichzeitig optimiert, optimiert der Hill-Climbing Algorithmus die Steuerungsparameter sequenziell. Die entstandene

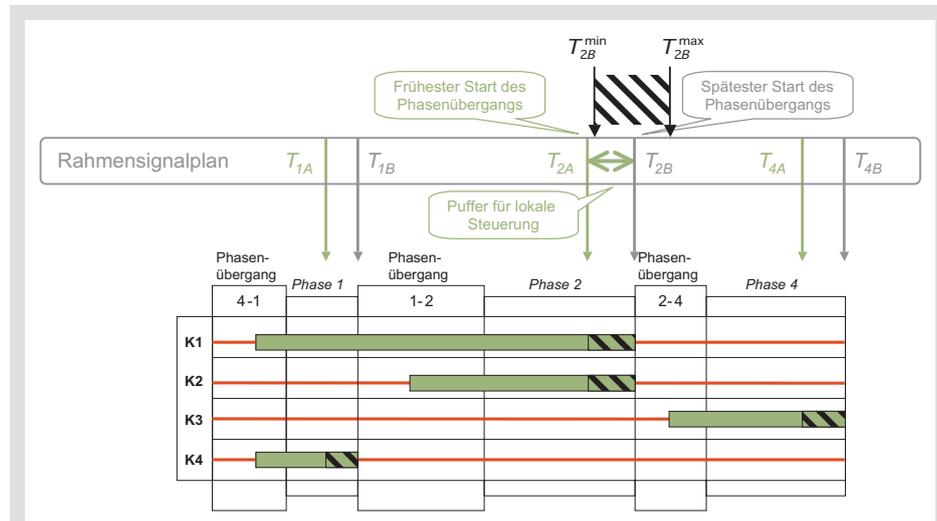


Bild 2: T-Zeit-Grenzen für die lokale Steuerung

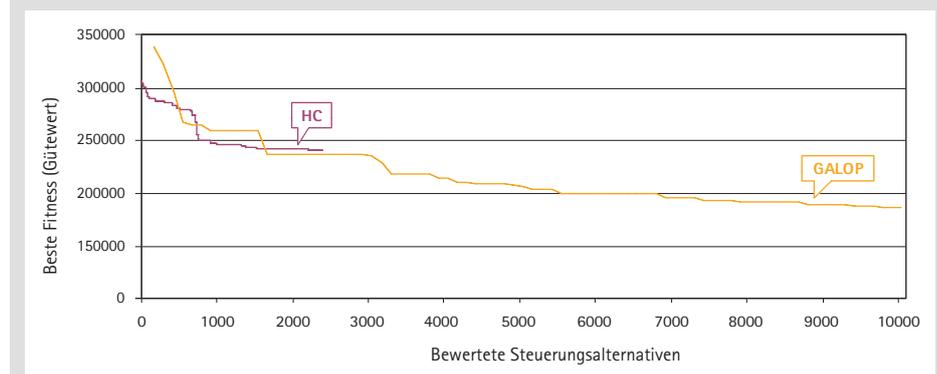


Bild 3: Vergleich der Fitnessentwicklung von GALOP und HC

Steuerungsalternative hängt deshalb von der gewählten Reihenfolge ab. Sobald für einen Steuerungsparameter in die eine Richtung keine bessere Steuerungsalternative mehr gefunden wird, wird die Suche für eine andere Richtung fortgesetzt. Ein Beispiel für das unterschiedliche Verhalten von Hill-Climbing Algorithmus und Evolutionärem Algorithmus für das gleiche Netz und die exakt gleiche Verkehrsnachfrage ist im Bild 3 dargestellt.

Der Hill-Climbing Algorithmus startet mit den Signalplänen der Basissteuerung als Startlösung, die bereits eine relativ gute Güte erreicht. Im Gegensatz dazu startet der Evolutionäre Algorithmus mit einer zufälligen Startpopulation. Das beste Individuum der ersten Generation (nach 175 bewerteten Individuen) erreicht diese Güte noch nicht. Während der Hill-Climbing Algorithmus allerdings nach 2 404 bewerteten Steuerungsalternativen bei einem

Gütwert von 241 742 abbricht, weil er keine bessere Steuerungsalternative mehr findet (er hat sich in einem lokalen Optimum verfangen), ist der Evolutionäre Algorithmus nach 2 300 Individuen in der 18. Generation bereits bei einer Fitness von 236 556 angelangt. Nach 80 Generationen und 10 050 bewerteten Steuerungsalternativen hat GALOP eine Fitness von 186 559 erreicht.

### 2.4 Feldversuch

#### Untersuchungsgebiet

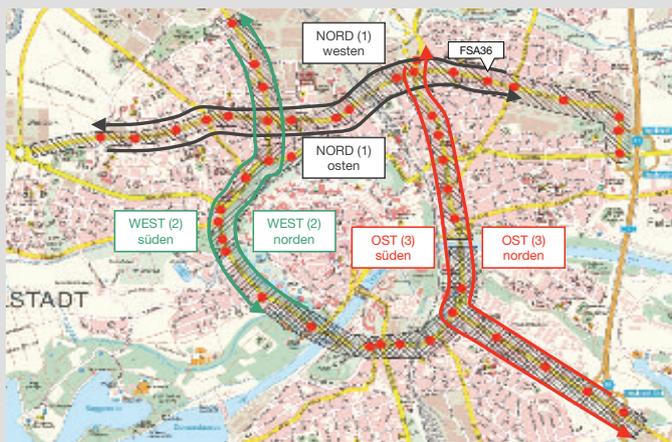
Das im Bild 4 dargestellte Ingolstädter Testgebiet umfasst insgesamt 46 LSA. In unterschiedlichen Schraffierungen sind die drei Teilnetze markiert, deren LSA-Steuerung getrennt optimiert wird. Für die Feldversuche wurden sechs Routen festgelegt (Bild 4). Die Routen WEST und OST erstrecken sich über unterschiedliche

Teilnetze hinweg. Ziel war es, eine möglichst nutzerorientierte Aussage über das gesamte Netz treffen zu können. Es ist zu betonen, dass man durch die Messungen auf den genannten Routen keine Gesamtaussagen für alle Verkehrsteilnehmer im gesamten Netz treffen kann. Alle erzielten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die genannten Routen.

Gemessen wurde an drei mal zwei Tagen, wobei drei Steuerungsvarianten miteinander verglichen wurden (Tabelle 1).

Unter Basis wird der Zustand vor dem Einsatz der adaptiven Netzsteuerung verstanden. In allen drei Fällen bestehen lokale verkehrsabhängige Steuerungen, in die fast überall ÖPNV-Priorisierungsmaßnahmen integriert sind. Außerdem sind einige Fußgängerschutzanlagen im Testgebiet, die nur auf Anforderung per Taster reagieren. Außer den bestehenden Detektoren für die verkehrsabhängige Steuerung wurden keine weiteren Messstellen eingerichtet.

Bild 4: Testgebiet Ingolstadt mit den drei Teilnetzen und den untersuchten Routen



#### Messmethodik

Zur Bewertung wurden zwei unterschiedliche Messmethoden verwendet:

- Befahrungen (Floating Car Data, FCD)
- Fahrzeugwiedererkennung (FWE).

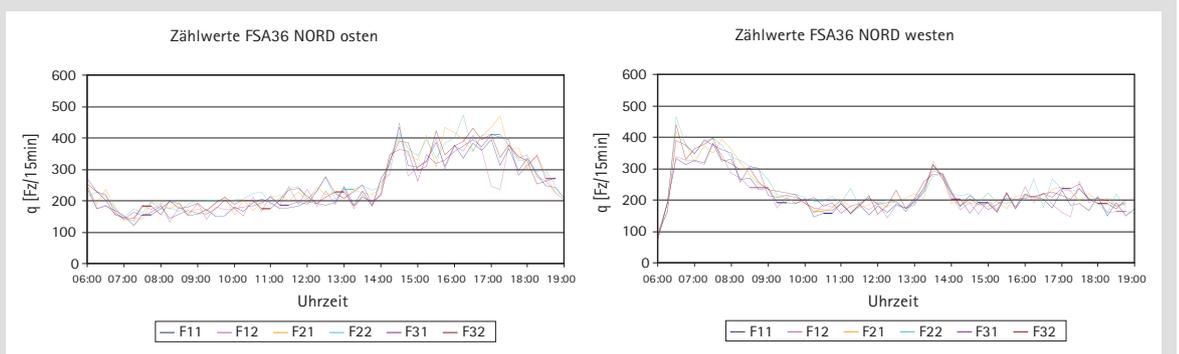
An allen sechs Messtagen wurden mit jeweils drei Fahrzeugen die sechs Routen befahren. Dabei wurden die Fahrten über GPS-Koordinaten aufgezeichnet und parallel weitere fahzeuggenerierte Daten, wie beispielsweise die vom Fahrzeug gemessene Geschwindigkeit, aus dem CAN-Bus ausgelesen.

Zusätzlich zu den Befahrungen wurden auf den Routen NORD zwei Infrarotkameras zur Fahrzeugwiedererkennung mittels automatischer Kennzeichenerfassung eingesetzt. Damit kann die Reisezeit zwischen zwei Punkten direkt gemessen werden. In Richtung Osten wurde jeweils am ersten Messtag (Mittwoch), in Richtung Westen jeweils am zweiten Messtag (Donnerstag) gemessen.

Tabelle 1: Übersicht Messtage und Steuerungsvarianten

Abk.	Datum	Szenario	Beschreibung
F11	Mi. 28.6.2006	Basis	Lokale verkehrsabhängige Steuerung
F12	Do. 29.6.2006		
F21	Mi. 28.5.2008	B-HC	Lokale verkehrsabhängige Steuerung optimiert durch BALANCE mit Hill-Climbing Algorithmus
F22	Do. 29.5.2008		
F31	Mi. 18.6.2008	B-GALOP	Lokale verkehrsabhängige Steuerung optimiert durch BALANCE mit GALOP
F32	Do. 19.6.2008		

Bild 5: Ganglinienvergleich Routen NORD (FSA36)



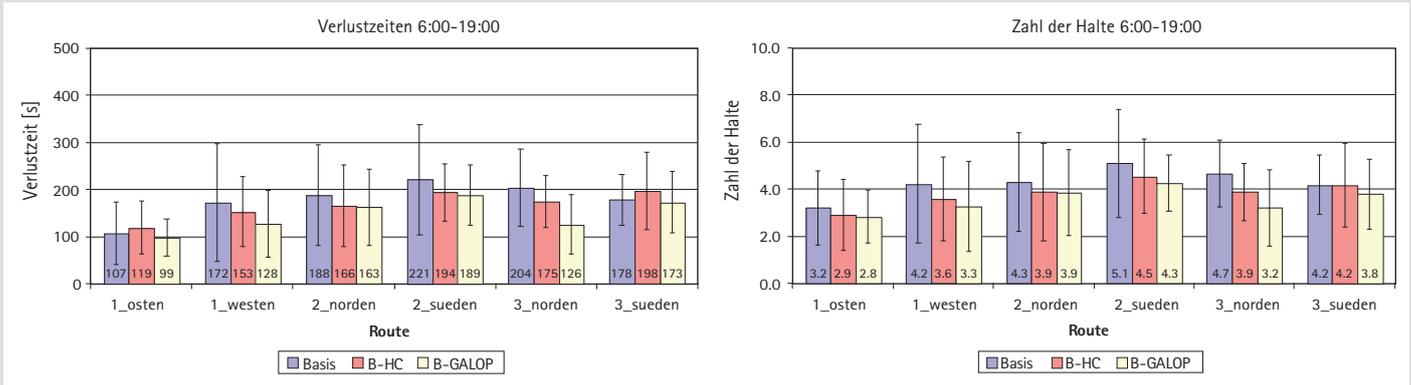


Bild 6: Vergleich der Verlustzeiten und der Zahl der Halte aller Fahrten (6:00-19:00 Uhr)

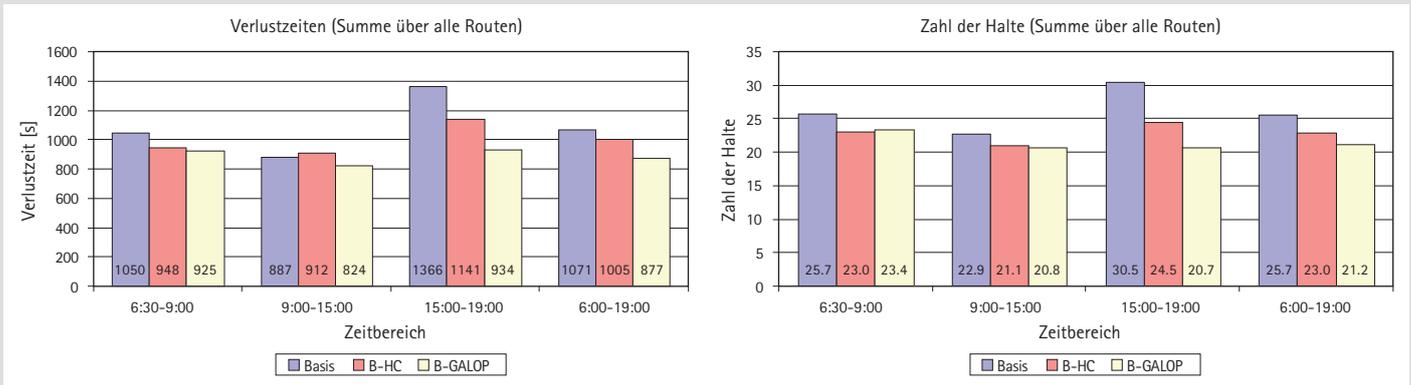


Bild 7: Vergleich der Summen der Verlustzeiten und der Zahl der Halte

Auf Basis der Verkehrsstärkeganglinien (Bild 5) werden neben der tagesdurchschnittlichen Bewertung (6:00-19:00) folgende Zeiträume separat betrachtet:

- Morgens: 6:30-9:00 Uhr
- Tagsüber: 9:00-15:00 Uhr
- Abends: 15:00-19:00 Uhr.

Aufgrund der Stochastizität des Verkehrsablaufs können die Verkehrsstärkeganglinien unterschiedlicher Tage nie exakt übereinstimmen, die Verläufe waren an den Messtagen jedoch vergleichbar (Bild 5). Dargestellt sind exemplarisch für die Routen NORD die Ganglinien an der Fußgängerschutzanlage FSA36. In Richtung Westen, d.h. in Richtung Audi-Werk, gibt es eine ausgeprägte Morgenspitze ab ca. 6:30 Uhr bis 9 Uhr, während die Abendspitze sehr flach verläuft (Bild 5, rechts). Klar erkennbar ist der Audi-Schichtwechsel am frühen Nachmittag, der zu einer deutlichen und kurzfristigen Zunahme der Verkehrsnachfrage in Richtung Audi-Werk zwischen 13 und 14 Uhr führt. Die Ganglinien der einzelnen Messtage an der FSA36 in Richtung Westen sind ziemlich deckungsgleich. In der Morgenspitze war etwas weniger Verkehr an den Feldtesttagen F11 und F12 (Basis), während insbesondere an den Tagen F21, F22 und F32 eine ausgeprägte Spitze um 6:30 Uhr gemessen wurde.

In Richtung Osten zeigt sich an der FSA36 ein anderer Verlauf (Bild 5, links). In den Morgenstunden werden hier keine besonders hohen Verkehrsstärken gemessen. Zwischen 14 und 15 Uhr ist der Audi-Schichtwechsel als kurze Verkehrsnachfragespitze vom Audi-Werk weg erkennbar, ab 15 Uhr beginnt die ausgedehnte Abendspitze. Die Ganglinien der einzelnen Messtage in Richtung Osten sind ebenfalls ziemlich deckungsgleich. In der Abendspitze wurden an den Feldtesttagen F21 und F22 (B-HC) leicht höhere Verkehrsstärken gemessen. Um 17 Uhr bei F12 (Basis) ist ein etwas stärkerer Rückgang der gemessenen Verkehrsstärke zu verzeichnen, die Ursache dafür ist nicht bekannt.

### Ergebnisse

Die im Bild 4 dargestellten sechs Routen wurden mit drei Fahrzeugen befahren. Fahrten, die gemäß den Fahrtenprotokollen nicht repräsentativ waren, weil beispielsweise ein Unfall auf der Route war, wurden nicht ausgewertet.

Die durchschnittlichen Verlustzeiten und die durchschnittliche Zahl der Halte für alle Fahrten auf den sechs Routen sind im Bild 6 dargestellt. Zusätzlich sind die Standardabweichungen eingezeichnet. Auf allen sechs Routen hat BALANCE mit

GALOP im Tagesdurchschnitt die geringste Verlustzeit zu verzeichnen. Die Differenz der Mittelwerte der Verlustzeiten ist dabei nach dem t-Test auf einem 10 %-Niveau signifikant auf der Route NORD in Richtung Osten zwischen B-HC (119 s) und B-GALOP (99 s), auf der Route NORD in Richtung Westen zwischen B-GALOP (128 s) und Basis (172 s), sowie auf der Route WEST in Richtung Norden zwischen B-GALOP (163 s) und Basis (188 s) wie auch zwischen GALOP und HC (166 s). Bei den Halten sind die Differenzen zwischen B-GALOP und Basis auf der Route NORD in Richtung Westen, auf der Route WEST in Richtung Süden und auf der Route OST in Richtung Norden signifikant (10 %-Niveau). Auf der Route OST in Richtung Norden sind zudem die Unterschiede zwischen B-HC und Basis, sowie zwischen GALOP und HC signifikant.

Summiert man die Verlustzeiten und die Zahl der Halte aller Routen auf, erhält man für jeden der Zeiträume einen Gesamteindruck (Bild 7).

Die Summe der durchschnittlichen Verlustzeiten aller Fahrten auf allen Routen (Gesamtlänge 22,7 km) liegt für das Basiszenario bei 1 071 s, für BALANCE mit HC bei 1 005 s und für BALANCE mit GALOP bei 877 s. Das entspricht einer Reduktion der Verlustzeit durch B-GALOP um durch-

schnittlich 18 % gegenüber dem Basisszenario und um 13 % gegenüber B-HC. Die durchschnittliche Zahl der Halte aller Fahrten konnte durch B-GALOP gegenüber dem Basisszenario in der Summe um 17 % von 25,7 auf 21,2 reduziert werden. Bei der Interpretation von Befahrungsergebnissen muss immer berücksichtigt werden, dass die aufgezeichneten Fahrten lediglich eine Stichprobe sind. Die Fahrten unterliegen mehr oder weniger zufälligen Ereignissen wie beispielsweise der Anforderung einer Fußgängerphase und der ÖPNV-Priorisierung. Deshalb können die aus der Fahrzeugwiedererkennung gemessenen Reisezeiten grundsätzlich als zuverlässiger angesehen werden (vgl. Braun et al. 2008). Ersetzt man die durch die Befahrung gemessenen Verlustzeiten auf den Routen NORD durch die Verlustzeiten aus der Fahrzeugwiedererkennung, ergeben sich die in der Tabelle 2 dargestellten prozentualen Unterschiede.

Morgens zwischen 6:30 und 9 Uhr konnten demnach die Verlustzeiten durch B-GALOP insgesamt um 19 % im Vergleich zum Basisszenario reduziert werden. Der Unterschied zwischen GALOP und HC beträgt für diesen Zeitbereich im Mittel für alle Routen 8 %.

Tagsüber wurde eine Reduzierung der Verlustzeit durch GALOP gegenüber HC um 4 % gemessen, die Zahl der Halte wurde um 2 % reduziert.

Für den Zeitraum 15 bis 19 Uhr wurden die größten Verbesserungen erreicht. Hier wurde die Verlustzeit im Mittel um 32 % durch BALANCE mit GALOP im Vergleich zum Basisfall reduziert. Gegenüber HC konnte GALOP eine Reduktion um 15 % erreichen. Die Differenz der Zahl der Halte beträgt zwischen dem Basisszenario und BALANCE mit GALOP insgesamt 32 %, gegenüber HC war GALOP demnach um 16 % besser.

Im Tagesdurchschnitt wurden die Verlustzeiten durch GALOP um 10 % gegenüber HC reduziert, die Zahl der Halte konnte um 8 % verringert werden.

Obwohl die Ergebnisse nur eine Stichprobe sein können, sind sie doch dazu geeignet, eine grundsätzliche Aussage über die

Qualität der unterschiedlichen Optimierungsmethoden zu treffen. Sie bestätigen, dass der durch die adaptive Netzsteuerung mit dem Hill-Climbing Algorithmus als Optimierungsverfahren bereits verbesserte Verkehrsablauf durch den Evolutionären Algorithmus weiter optimiert werden konnte.

### 3 LSA-Fahrzeug-Kommunikation

Im zweiten Teil des Forschungsprojekts wurde die Kommunikation von der Lichtsignalanlage zum Fahrzeug erprobt und umgesetzt. Unter LSA-Fahrzeug-Kommunikation versteht man den Datenaustausch zwischen Lichtsignalanlage und Fahrzeug über eine drahtlose Verbindung. Im Forschungsprojekt TRAVOLUTION kam Funkübertragungstechnik zum Einsatz, die dem WLAN Standard (IEEE 802.11) genügt.

#### 3.1 Konzept

Das zugrunde liegende Konzept ist der informierte Fahrer (vgl. Menig und Busch, 2006). Dabei soll eine bestimmte Fahrweise nicht durch gesetzliche Gebote oder durch einen aktiven Eingriff in die Steuerung des Fahrzeugs erzwungen, sondern dem Fahrer die optimale Fahrweise angezeigt werden. Dieses optimierte Verhalten soll die Verkehrseffizienz insgesamt verbessern. Insbesondere sollen Stauungen vermieden oder deren Auflösung beschleunigt werden. In Innenstädten mit ihren zahlreichen signalisierten Kreuzungen soll deren Kapazität erhöht, sowie die Anzahl der Halte und die Wartezeit reduziert werden.

Es wurden zwei Anwendungsfälle der LSA-Fahrzeug-Kommunikation entwickelt, umgesetzt und getestet:

- Restrotanzeige
- Dynamische Grüne Welle.

Die Restrotanzeige gibt dem Fahrer die verbleibende Wartezeit bei Rot an. Bei der Dynamischen Grünen Welle wird dem Fahrer vor Erreichen der Kreuzung ein Geschwindigkeitsbereich angezeigt, innerhalb dessen er - unerwartete Störungen

ausgeschlossen - ohne Halt die Kreuzung passieren kann.

#### Restrotanzeige

Die Anzeige der verbleibenden Wartezeit bei Rot soll neben einem Komfortgewinn dem Fahrer die Entscheidung erleichtern, ob das Abschalten des Motors sinnvoll ist. Außerdem kann er sich auf das Umschalten der Signalgruppe auf Grün vorbereiten und im entsprechenden Moment zeitnah losfahren, wodurch die Kapazität an der Kreuzung erhöht wird.

Sofern man davon ausgeht, dass in Zukunft viele Fahrzeuge mit einer fahrzeugseitigen Anzeige ausgestattet sein werden, spielt es für das Erreichen einer höheren Kapazität zwar keine große Rolle, ob die Information über die verbleibende Rotzeit dem Fahrer über einen separaten (infrastrukturbasierten) Signalgeber oder direkt im eigenen Fahrzeug angezeigt wird. Allerdings hat die Restrotanzeige im Fahrzeug den Vorteil, dass der Fahrer unabhängig von seiner Position die Anzeige sehen kann. Bei einer stationären Restrotanzeige, z.B. an der Peitsche der LSA, ist dagegen das Problem der Sichtbarkeit (Verdecken der Anzeige durch Lkw etc.) gegeben.

#### Dynamische Grüne Welle

Bei der Dynamischen Grünen Welle wird dem Fahrer ein Geschwindigkeitsbereich empfohlen, innerhalb dessen er ohne Halt die nächste Kreuzung passieren kann. Die angezeigte Geschwindigkeit darf dabei die erlaubte Höchstgeschwindigkeit nicht überschreiten. Gleichzeitig darf die empfohlene Geschwindigkeit nicht zu niedrig sein, um einerseits die Akzeptanz des Fahrers zu erhalten und um andererseits für andere, möglicherweise nicht informierte Verkehrsteilnehmer kein Hindernis darzustellen. In der Praxis wird sich die Empfehlung deshalb in der Regel zwischen 30 und 50 km/h bewegen. Folglich wird eine Geschwindigkeitsempfehlung immer dann relevant, wenn durch Beibehalten der aktuellen Geschwindigkeit ein kurzer Halt zu erwarten wäre, d.h. wenn durch eine Reduktion der Geschwindigkeit der folgende Grünbeginn abgewartet werden kann.

Um zu gewährleisten, dass der Fahrer bei Einhaltung der ihm vorgeschlagenen Geschwindigkeit die folgende Haltelinie tatsächlich ohne Halt überqueren kann, muss neben der zuverlässigen Prognose der kommenden Schaltbilder auch die Rückstaulänge vor der Haltelinie berücksichtigt

Tabelle 2: Prozentuale Unterschiede der Verlustzeiten (VZ) und Zahl der Halte (ZH)

	B-HC/Basis		B-GALOP/Basis		B-GALOP/B-HC	
	VZ	ZH	VZ	ZH	VZ	ZH
06:30-09:00	-12 %	-10 %	-19 %	-9 %	-8 %	+1 %
09:00-15:00	-5 %	-8 %	-9 %	-9 %	-4 %	-2 %
15:00-19:00	-21 %	-20 %	-32 %	-32 %	-15 %	-16 %
06:00-19:00	-12 %	-11 %	-21 %	-17 %	-10 %	-8 %

werden. Diese Information liegt jedoch meist nicht detailliert vor, so dass die Rückstaulänge nur indirekt (z.B. über eine Schätzung aus den Detektormesswerten) ermittelt werden kann.

Im Gegensatz zur Restrotanzeige macht es einen großen Unterschied, ob die Anzeige eines empfohlenen Geschwindigkeitsbereichs im Fahrzeug oder in einem infrastrukturbasierten Signalgeber stattfindet. Die Anzeige im Fahrzeug ist individuell für den Fahrer und abhängig von der aktuellen Position des Fahrzeugs und dessen Geschwindigkeit.

Beide Anwendungsfälle haben gemeinsam, dass im ersten Schritt die Prognose der Schaltzustände erfolgen muss, die dann an das Fahrzeug kommuniziert werden kann (vgl. Abschnitt 3.3).

Die wichtigste Randbedingung des Konzepts ist die Fahrsicherheit. Diese darf nicht beeinträchtigt werden. Dies führt zum Beispiel dazu, dass im Zweifelsfall keine Information an den Fahrer ausgegeben werden darf, falls zu erwarten ist, dass dies den Fahrer ablenkt oder in ungünstiger Weise beeinflusst.

### 3.2 Schnittstellen und Systemarchitektur

Das Gesamtsystem der LSA-Fahrzeug-Kommunikation erstreckt sich vom Lichtsignalanlagen-Steuergerät (LSA-StG) bis zur Anzeige im Fahrzeug. Das Bild 8 zeigt einen Überblick der Systemkomponenten und Übertragungsstrecken.

Das System lässt sich in vier Systemkomponenten unterteilen:

#### 1. LSA-StG:

Das LSA-StG steuert die Signalabfolge der LSA. Um den Zustand des LSA-StG auszuwerten und darauf aufbauend weitere Prognosen leisten zu können, müssen bestimmte Parameter erfasst und über eine Schnittstelle an das Kommunikationsmodul weitergegeben werden. Das LSA-StG ist im LSA-StG-Kasten montiert.

#### 2. Kommunikationsmodul:

Das Kommunikationsmodul, auch Roadside Unit (RSU) genannt, dekodiert die vom LSA-StG erhaltenen Daten und wertet sie aus, um eine Prognose der kommenden Signalfolge zu erhalten und sendet diese Informationen über WLAN an das Car-2-Car-Modul weiter.

#### 3. Car-2-Car-Modul:

Das Car-2-Car-Modul befindet sich im Fahrzeug. Es handelt sich dabei um einen Rechner, der die Anforderungen des Fahrzeugumfeldes erfüllt. Neben

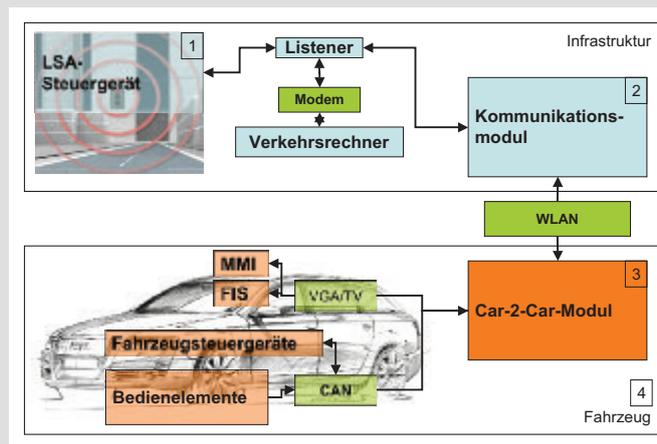


Bild 8: Architektur des Gesamtsystems LSA-Fahrzeug-Kommunikation

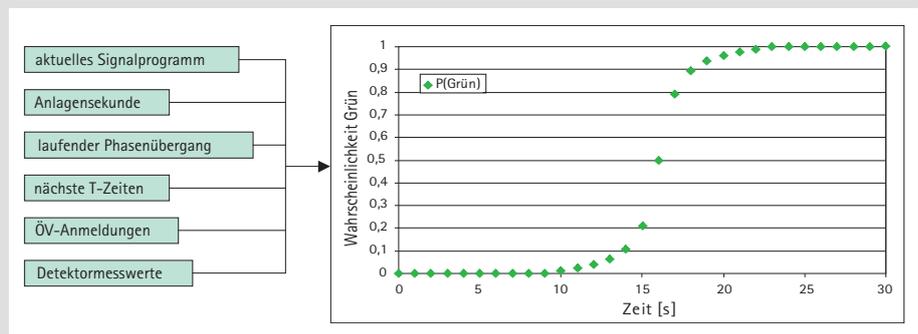


Bild 9: Zustandsprognose einer Signalgruppe für die nächsten 30 Sekunden

der fahrzeuginternen Kommunikation mit den Bedienelementen, den Anzeigesystemen und den Fahrzeugsteuergeräten muss das Car-2-Car-Modul auch die externe Kommunikation über WLAN durchführen. Neben dem positions- und richtungsabhängigen Verbindungsaufbau zum jeweils relevanten Kommunikationsmodul (der nächsten LSA) regelt das Car-2-Car-Modul auch den Nachrichtenaustausch. Die Nachricht wird in einer Analysekomponente abgearbeitet, mit dem Ziel, die relevante Signalgruppe zu ermitteln. Nun kann deren prognostizierte Signalfolge mit der eigenen Position, Geschwindigkeit und Richtung in Relation gesetzt werden, um dem Fahrer eine Empfehlung zu geben.

#### 4. Fahrzeug:

Das Fahrzeug liefert dem Car-2-Car-Modul über den Fahrzeug-internen CAN-Bus (CAN = Controller Area Network) alle nötigen Fahrzeug-Daten (z.B. Geschwindigkeit, eingeleger Gang, aktivierter Blinker, etc.) und regelt die Mensch-Maschine-Interaktion, die aus Anzeige- und Eingabeeinheiten besteht. Diese werden im Bild 8 mit MMI (für Multimediainterface) und FIS (für Fahrerinformationssystem = Anzeige im Kombiinstrument) bezeichnet.

### 3.3 Prognose der Schaltbilder

Um den Fahrer, der sich einer LSA nähert, mit Informationen, z.B. über seine ideale Geschwindigkeit, zu versorgen, ist es notwendig, die Schaltbilder der Lichtsignalanlage in naher Zukunft vorherzusagen. Im Allgemeinen ist dies aufgrund der komplexen verkehrsabhängigen Logik moderner Lichtsignalanlagen nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit möglich. Die Prognose wird anhand von sogenannten Exportvariablen erstellt, die das lokale Steuerungsverfahren der LSA ausgibt.

Das Bild 9 zeigt das prinzipielle Vorgehen in idealisierter Form. Auf der linken Seite sind die in den Exportvariablen kodierten LSA-Informationen aufgelistet, auf der rechten Seite ist das Prognoseergebnis dargestellt, welches sekundlich aktualisiert wird. Nur Signalzustände, für die der Algorithmus eine ausreichend hohe Sicherheit ausgibt, sollen im Fahrzeug berücksichtigt werden. Der Zeithorizont bewegt sich dabei in der Größenordnung von ca. 10 bis 30 Sekunden.

#### Problematik

Die Qualität, die bei der Erstellung einer derartigen Prognose erzielt werden kann, hängt entscheidend vom Typ der betrachteten Lichtsignalanlage ab. Ist diese fest-

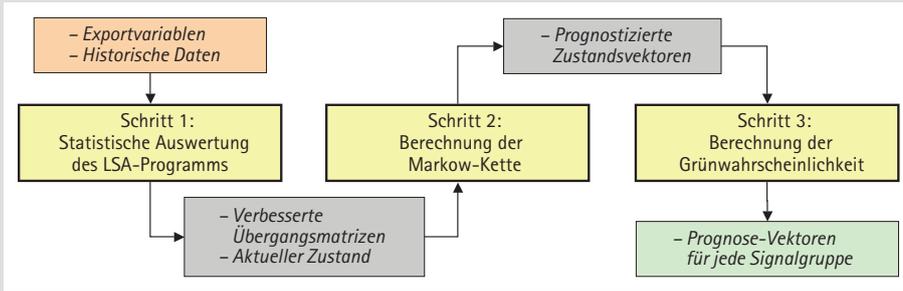


Bild 10: Berechnungsstufen der Algorithmik, ergänzt um Übergabevariablen

Bild 11: Restrotan-  
zeige im Fahrer-  
informationssystem

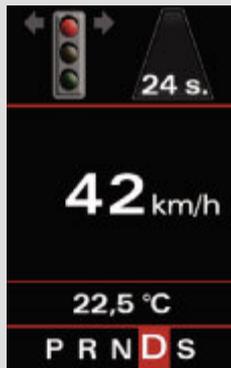
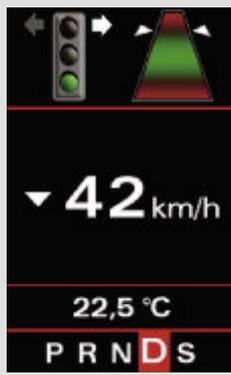


Bild 12: Anzeige  
der Dynamischen  
Grünen Welle im  
Fahrerinformations-  
system



ungebremste Durchfahrt zu gewähren. Aufgrund dieser Komplikationen ist eine 100%-Prognose bei Lichtsignalanlagen ohne Festzeitsteuerung im Allgemeinen nur wenige Sekunden im Voraus möglich.

#### Algorithmik

Die Algorithmik muss anhand begrenzter Eingangsvariablen (das sind im Wesentlichen die Exportvariablen der LSA-Steuerung) für die nächsten 30 Sekunden die kommenden Schaltbilder prognostizieren. Jede Angabe muss zudem die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der Prognose enthalten. Das prinzipielle Vorgehen wurde bereits im Bild 9 erläutert. Der vorliegende Ansatz teilt diese Aufgabe in drei Schritte:

- Schritt 1: Statistische Auswertung der LSA-Steuerung
- Schritt 2: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der Signalbildänderungen
- Schritt 3: Ableiten der Grünwahrscheinlichkeit für die Signalgruppen.

Der Kern des Algorithmus ist der Gedanke, ein LSA-Steuerungsprogramm als Markow-Kette (vgl. z.B. Gnedenko, 1980) zu beschreiben.

Ein stochastischer Prozess heißt Markow-Kette, wenn er der elementaren Markow-Eigenschaft genügt. Diese ist genau dann erfüllt, wenn die Wahrscheinlichkeit, von einem Systemzustand in den nächsten zu wechseln, nur vom letzten Zustand abhängt.

Es ist im Allgemeinen möglich, das LSA-Programm so zu abstrahieren, dass die Markow-Eigenschaft erfüllt wird. Dabei müssen die Variablen und Abhängigkeiten im LSA-Programm in Systemzustände der Markow-Kette übersetzt werden. Ein Zustand kann zum Beispiel ein bestimmtes Signalbild, ein gerade stattfindender Phasenübergang oder Ähnliches sein.

Da sich mit dem Markow-Prozess Zustandsänderungen mit Matrixmultiplikationen darstellen lassen, ist der Weg zum

Algorithmus bereits vorgegeben. Beispielrechnungen und eine genauere Beschreibung des im Bild 10 dargestellten Algorithmus finden sich bei Menig et al., (2008).

#### 3.4 Anzeige im Fahrzeug

Die Daten, die vom LSA-Kommunikationsmodul ausgesendet werden, werden im Fahrzeug verarbeitet. Die zugrunde liegende Algorithmik ordnet das Fahrzeug einer Signalgruppe zu und setzt die eigene Position und Geschwindigkeit in Verhältnis zu den erhaltenen Signalprognosen (Grünwahrscheinlichkeiten).

Der Fahrer erhält Hinweise, die die Fahraufgabe betreffen, über die Anzeige im Fahrerinformationssystem (FIS). Auch die Hinweise der LSA-Fahrzeug-Kommunikation werden im FIS dargestellt. Das zugrundeliegende Anzeigekonzept ist in den Bildern 11 und 12 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.

Den beiden Anwendungsfällen Restrotanzeige und Dynamische Grüne Welle sind folgende Komponenten gemein:

- Die Abbiegepeile oben links zeigen die Abbiegerichtungen an, für die die Signalgruppe gültig ist. Im Bild 11 handelt es sich also um eine Linksabbiegerspur.
- Der Digitaltacho zeigt die aktuelle Geschwindigkeit an. Im Falle der Restrotanzeige im Bild 11 also 0 km/h.
- In den unteren Zeilen werden Außentemperatur und eingelegter Gang angezeigt.

#### Restrotanzeige

Die in der Einleitung beschriebene Restrotanzeige, die den Fahrer darüber informiert, wie lange er warten muss, ist im Fahrerinformationssystem folgendermaßen umgesetzt:

- Der Signalgeber in der oberen Zeile links zeigt die Signalfarbe Rot. Damit wird der Anwendungsfall Restrotanzeige verdeutlicht.
- Der Geschwindigkeitsteppich (Trapez in der oberen Zeile rechts) ist ausgegraut, also inaktiv geschaltet.
- Die Restzeitangabe (obere Zeile rechts) gibt an, wie lange die LSA noch Rot zeigt. Im Bild 11 noch 24 Sekunden.

#### Dynamische Grüne Welle

Die Anzeige für die Dynamische Grüne Welle ist wie folgt umgesetzt:

- Der Signalgeber in der oberen Zeile links zeigt die Signalfarbe Grün. Damit

zeitgesteuert, so ist ihr Verhalten deterministisch und eine Zustandsvorhersage trivial. Moderne Lichtsignalanlagen folgen jedoch im Allgemeinen keinen festen Abläufen, sondern passen ihre Phasen anhand einer zum Teil sehr komplexen verkehrsabhängigen Logik an die jeweilige Verkehrssituation an. Beispielsweise können Phasen abgebrochen werden, wenn für eine bestimmte Zeitdauer (meist etwa drei Sekunden) kein Fahrzeug mehr detektiert wurde (Zeitlückensteuerung). Andererseits ist bei hohem Verkehrsaufkommen in einer Richtung eine Verlängerung der aktuellen Phase im Rahmen der T-Zeitgrenzen möglich. Ferner kann sich bei ÖPNV-priorisierten Anlagen (Bus- oder Trambahnbeschleunigung) das Verhalten der LSA bei Anmeldung eines ÖPNV-Fahrzeugs plötzlich ändern. Die Anlage versucht in diesem Fall, durch Anpassen der Phasenabläufe und -dauern dem Bus oder der Straßenbahn eine nach Möglichkeit

wird angedeutet, dass bei der idealen Geschwindigkeit die Kreuzung bei Grün erreicht wird.

- Der Geschwindigkeitsteppich (Trapez in der oberen Zeile rechts) ist vertikal in drei Bereiche gegliedert. Die Position des Fahrzeugs relativ zu diesen Bereichen wird durch die Dreiecke links und rechts markiert. Alle Anzeigen berücksichtigen die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Der Fahrer wird nicht zum schnellen Fahren animiert.
- Oben, rot: Das Fahrzeug fährt zu schnell und bewegt sich „vor der grünen Welle“. Beim Eintreffen an der Kreuzung ist die LSA noch auf Rot.
- Mitte, grün: Das Fahrzeug befindet sich in der Grünen Welle. Beim Erreichen der Kreuzung ist die LSA bereits auf Grün gesprungen.
- Unten, rot: Das Fahrzeug fährt zu langsam und wird die Kreuzung erst nach dem Umschalten des Signalgebers auf Rot erreichen.
- Ist eine geringere als die aktuell gefahrene Geschwindigkeit von Vorteil, wird dies durch ein nach unten zeigendes Dreieck neben dem Digitaltacho symbolisiert.

### 3.5 Erprobung

Die LSA-Fahrzeug-Kommunikation wurde im Forschungsprojekt TRAVOLUTION erprobt. Zu diesem Zweck wurden die verschiedenen Komponenten des Systems prototypisch realisiert. Dazu wurden drei LSA-Steuergeräte an der Westlichen Ringstraße in Ingolstadt mit Kommunikationsmodulen ausgerüstet. Über eine einseitige Schnittstelle kann das Steuergerät Daten über das Kommunikationsmodul in der direkten Umgebung verbreiten. Zusätzlich wurden zwei Fahrzeuge für die LSA-Fahrzeug-Kommunikation ausgerüstet und als Versuchsträger im Projekt verwendet. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und LSA-Kommunikationsmodul erfolgt über WLAN-Technologie, die auch für Heim- und Büronetzwerke verwendet wird.

Die Qualität der Vorhersage der nächsten Schaltzeiten entspricht den Erwartungen. Es können die meisten, wenn auch nicht alle Situationen bei einem Vorlauf von 10 bis 60 Sekunden mit einer Genauigkeit von einer Sekunde vorhergesagt werden. Trotz dieser sporadischen Ungenauigkeiten ist es möglich, das System sicher zu gestalten, also fehlerhafte Aussagen rechtzeitig zu korrigieren. Die in den Fahrzeugen eingebaute Technik erlaubt das Auswerten der empfangenen Daten und die Anzeige der Ergebnisse auf den Anzeigegeräten des Fahrzeugs.

In zahlreichen Messfahrten konnte die prinzipielle Funktionalität der Kommunikation nachgewiesen werden. Das Erproben verschiedener Antennentypen sowohl auf Fahrzeug-, als auch auf Infrastrukturseite hat den erheblichen Einfluss dieser Komponente auf Reichweite und Zuverlässigkeit der Kommunikation gezeigt. Gleichzeitig erwies sich die Anbindung der LSA-Steuergeräte an die infrastruktureitigen Kommunikationsmodule als zuverlässig und beeinflusst in keiner Weise die Funktion der LSA. Die Anzeige insbesondere im Fahrerinformationssystem ist verständlich und für den Fahrer geeignet.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt TRAVOLUTION verfolgte zwei Ansätze um den Verkehrsablauf in der Stadt Ingolstadt nachhaltig zu verbessern: die Online-Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung

## PTV – Nachhaltige Verkehrslösungen



### Felix hat gut lachen – auch in Zukunft!

Optimieren Sie Ihr Verkehrsnetz mit PTV Vision – und setzen Sie damit einen Maßstab für intelligente und nachhaltige Verkehrslösungen. Nur mit zukunftsorientierten Konzepten können wir langfristig unsere Ressourcen schonen und gleichzeitig unsere Mobilität bewahren.



#### VISUM

GIS-basierte Planungs- und Informationssysteme für IV und ÖV.

#### VISSIM

Mikroskopische Verkehrsflusssimulation, Optimierung der Leistungsfähigkeit.

#### Treffen Sie uns:

- 08.-10.07.2009, AGIT, Salzburg, Österreich
- 21.-25.09.2009, ITS World Congress, Stockholm, Schweden

#### PTV AG

Stumpfstr. 1  
76131 Karlsruhe

info.vision@ptv.de  
Tel. 0721 96 51-300  
www.ptv-vision.de



mit Evolutionären Algorithmen und die LSA-Fahrzeug-Kommunikation zur individuellen Information des Fahrers.

Für den ersten Ansatz wurde mit GALOP ein Evolutionärer Algorithmus zur Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung entwickelt, der in BALANCE integriert wurde und dort als Alternative zum bisher vorhandenen Hill-Climbing Algorithmus als Optimierungsmethode zur Verfügung steht.

Die Lichtsignalsteuerung in großen Teilen des Hauptstraßennetzes der Stadt Ingolstadt wurde auf die adaptive Netzsteuerung umgestellt. Das bisherige BALANCE mit Hill-Climbing Optimierung war um 12 % besser als die Basis-Steuerung. Durch BALANCE mit GALOP haben sich die Wartezeiten um weitere 10 % verringert. Die Verlustzeiten an den Lichtsignalanlagen konnten in der Nachmittagsspitze zwischen 15 Uhr und 19 Uhr um 32 % reduziert werden. Die Anzahl der Halte hat sich über den Tag um 17 % verringert.

Der zweite in TRAVOLUTION verfolgte Ansatz zeigt die technische Machbarkeit der LSA-Fahrzeug-Kommunikation. An drei hoch belasteten Knotenpunkten wurden die Lichtsignalsteuergeräte so ausgestattet, dass sie den sich nähernden Fahrzeugen Auskunft über die in der nächsten Zukunft zu erwartende Signalisierung geben.

Die zwei umgesetzten Anwendungsfälle, die Restrotanzeige und die Dynamische Grüne Welle, erfordern als wesentliche Voraussetzung die zuverlässige Prognose der LSA-Schalbilder. Bei nicht festzeitge-

steuerten Anlagen ist diese Prognose nicht trivial. Die Grünwahrscheinlichkeiten werden sekundlich aktualisiert vom LSA-Kommunikationsmodul ausgesendet und im Fahrzeug verarbeitet. Die Information für den Fahrer wird über das Fahrerinformationssystem angezeigt. Die genannte Problematik der Berücksichtigung von Rückstaus bzw. Vorderfahrzeugen bei der Berechnung einer Geschwindigkeitsempfehlung bedarf noch weiterer Forschung.

Ob die Einführung eines solchen Systems sinnvoll ist, hängt neben den verkehrlichen und technischen Fragestellungen auch von volks- und betriebswirtschaftlichen Überlegungen ab. Mögliche Einführungsszenarien der Infrastruktur-Fahrzeug-Kommunikation (vgl. Menig et al., 2008) liegen vor, müssen jedoch speziell auf die LSA-Fahrzeug-Kommunikation übertragen werden.

Aufgrund der Erfolge des Forschungsprojekts werden die LSA-Fahrzeug-Kommunikation und die adaptive Netzsteuerung in Ingolstadt auf weitere LSA ausgeweitet. Außerdem werden die entwickelten Technologien unter anderem im bereits begonnenen Forschungsprojekt SIM-TD (Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland) auf Steuerungssysteme weiterer Hersteller übertragen und weiterentwickelt.

#### Literaturverzeichnis

Braun, R. (2008): Ein echtzeitfähiger Evolutionärer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung (Dissertation). Veröffentlichung des Lehrstuhls für Verkehrstechnik, TU München.

Braun, R.; Kemper, C. (2008): GALOP-Online – ein Genetischer Algorithmus zur netzweiten Online-Optimierung der Lichtsignalsteuerung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), HEUREKA '08, Optimierung in Verkehr und Transport – Tagungsband, FGSV Verlag, Köln, ISBN 978-3-939715-48-1.

Braun, R.; Kemper, C.; Weichenmeier, F.; Menig, C., Wegmann, J. (2008): Comparing Different Adaptive Traffic Signal Control Optimization Methods – Field Test Results. 15<sup>th</sup> World Congress on ITS, New York City, 16.-20. Nov. 2008.

Friedrich, B. (1999): Ein verkehrsabhängiges Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen (Dissertation). Veröffentlichung des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, TU München.

Gnedenko, B. W. (1980): Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. S. 102 ff. Verlag Harri Deutsch, Thun.

Menig, C.; Busch, F. (2006): Innerstädtische Verkehrsoptimierung durch Car-2-X Communication, 7. Symposium zum Thema Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 21.-23. Februar 2006, Braunschweig.

Menig, C.; Hildebrandt, R.; Braun, R. (2008): Der informierte Fahrer – Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), HEUREKA '08, Optimierung in Verkehr und Transport – Tagungsband, FGSV Verlag, Köln, ISBN 978-3-939715-48-1.

Menig, C.; Wischhof, L.; Ebner, A.; Gansen, T.; Seemann, V.; Hildebrandt, R.; Braun, R. (2008): Increasing Mobility by Car-to-X Communication: Applications for Market Introduction. FISITA 2008, World Automotive Congress, München.

**Handbuch ZTVE** Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau 3. Auflage

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss  
**Handbuch ZTVE**  
 3. Auflage, 660 Seiten,  
 DIN B5, Hardcover  
 zahlreiche Abbildungen,  
 Tabellen und Diagramme  
 64,- €  
 ISBN 978-3-7812-1620-4

Die 3. Auflage dieses Standard-Kommentars zu den ZTVE trägt zur sachverständigen Anwendung des Regelwerkes bei. Ausführlich erläutert werden die neuesten technischen Weiterentwicklungen im Erd- und Felsbau sowie die grundlegenden Änderungen in administrativen und baurechtlichen Bereichen. Beispielhaft erwähnt seien

- die Änderungen und europäischen Anpassungen in der Gesetzgebung sowie in den technischen Regelwerken für das Auftragswesen, den Umweltschutz und die Sicherheitsnachweise bei geotechnischen Bauweisen,
- die Nutzung neuer Baustoffe, wie Geokunststoffe, Recycling-Baustoffe, Leichtbaustoffe und viele mehr, für Regel- und Sonderbauweisen im Erd- und Felsbau.

Die Neuauflage dient als Entscheidungshilfe bei der Bauplanung und Bauausführung und wird somit zu einem unverzichtbaren Helfer in der täglichen Praxis.