

Zuflussregelungsanlagen

Jochen Boesefeldt, Markos Papageorgiou

11. September 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Problemstellung	2
1.2	Modellierung	3
1.3	Verfahren	4
2	Lokale Zuflussregelung	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Methoden	7
2.3	Experiment	8
2.3.1	Nebenpfad: Modellierungsgleichungen	9
2.4	Fuzzy	12
3	Koordinierte Zuflussregelung	15
3.1	Einleitung	15
3.2	Methoden	18
3.3	Methoden (2)	20
3.4	Beispiel	22
4	Literatur	24
4.1	Literaturverzeichnis	24

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Problemstellung Zuflussregelungsanlagen werden zunehmend in **Zufahrtsrampen** zu zeitweise hochbelasteten Autobahnabschnitten in Ballungsgebieten eingerichtet, um

- den **Verkehrsfluss** auf Autobahnen stabil zu halten,
- die **Leistungsfähigkeit** und die Fahrgeschwindigkeit zu erhöhen und
- das Unfallrisiko auf den Hauptfahrbahnen und in den **Rampenbereichen** zu senken.



Aufgaben Grundsätzlich lassen sich zwei Aufgabenstellungen bei der Zuflussregelung unterscheiden:

- lokale **Zuflussregelung** (eine Zufahrtsrampe)
- koordinierte Zuflussregelung (mehrere Zufahrtsrampen entlang einer Schnellstraße oder in einem Schnellstraßennetz)

Die Kombination beider Aufgabenstellungen im Rahmen einer hierarchischen Steuerungsstruktur wurde ebenso vorgeschlagen. Hierbei liefert die koordinierte Steuerungsschicht optimale Verkehrszustände, die bei den dezentralen (lokalen) Zuflussregelungen als Sollwert genutzt werden.

1.2 Modellierung

Optimierungsaufgabe	<ul style="list-style-type: none">• Reduzierung bzw. Vermeidung von Staus auf den Hauptfahrbahnen• Vermeidung von blockierten Zufahrts- und Knotenpunktsrampen• Harmonisierung des Verkehrsablaufs in den Verflechtungsbereichen der Zufahrten
Optimierungskriterien	<ul style="list-style-type: none">• Gesamtreisezeiten auf den betroffenen Hauptfahrbahnen• Gesamtwarezeiten auf den Rampen• Gesamtreisezeiten im Untersuchungsbereich• Gesamtstaudauer
Entscheidungsvariablen	<ul style="list-style-type: none">• Verkehrsstärken der Zufussrampen
Eingangsgrößen	<ul style="list-style-type: none">• Verkehrsnachfrage auf den Rampen• U-Z-Anteile
Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Kapazität der Rampen• kein Rückstau im nachgeordneten Straßennetz• Flusskapazität Hauptfahrbahn

1.3 Verfahren

Geeignete
Entscheidungs-
und
Optimierungs-
methoden

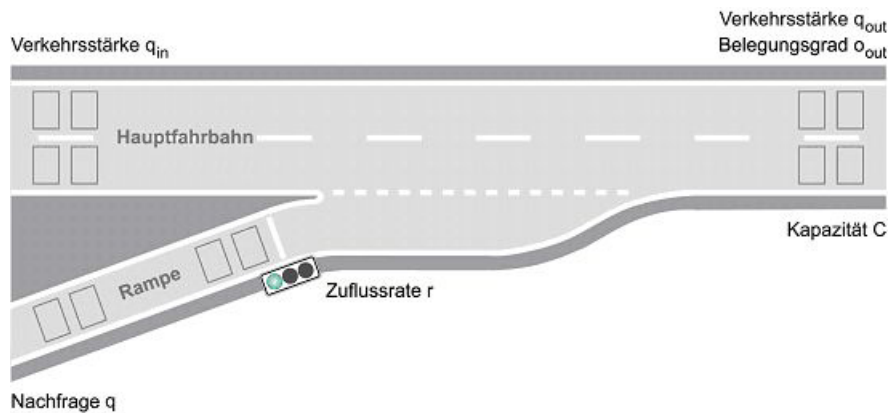
Auf der Grundlage internationaler und nationaler Erfahrungen erscheint die auf klassischen **Regelungsverfahren** (I-Regler) basierte ALINEA-Methode einfach anzuwenden und als **Regler** robust genug für eine effiziente Steuerung kritischer Autobahn- und Schnellstrassenabschnitte. Als ebenfalls für diese Anwendung geeignet wird die regelorientierte Entscheidungslogik eines in Süddeutschland erprobten Fuzzy-Reglers angesehen.

2 Lokale Zuflussregelung

2.1 Einleitung

Lokale Zuflussregelung

Lokale Zuflussregelungssysteme basieren auf Echtzeitmessungen (meist **Verkehrsstärke** und **Belegungsgrad**) aus der unmittelbaren Nähe der entsprechenden Zuflussrampe mit dem Ziel, den Schnellstraßenfluss stromabwärts der Rampe zu maximieren. Im Falle einer hierarchischen Steuerung kann allerdings auch ein anderer Sollwert angestrebt werden.



Die lokale Regelung erfolgt nach erprobten regelungstechnischen Verfahren, in Europa weitestgehend nach der ALINEA-Methode.

ALINEA

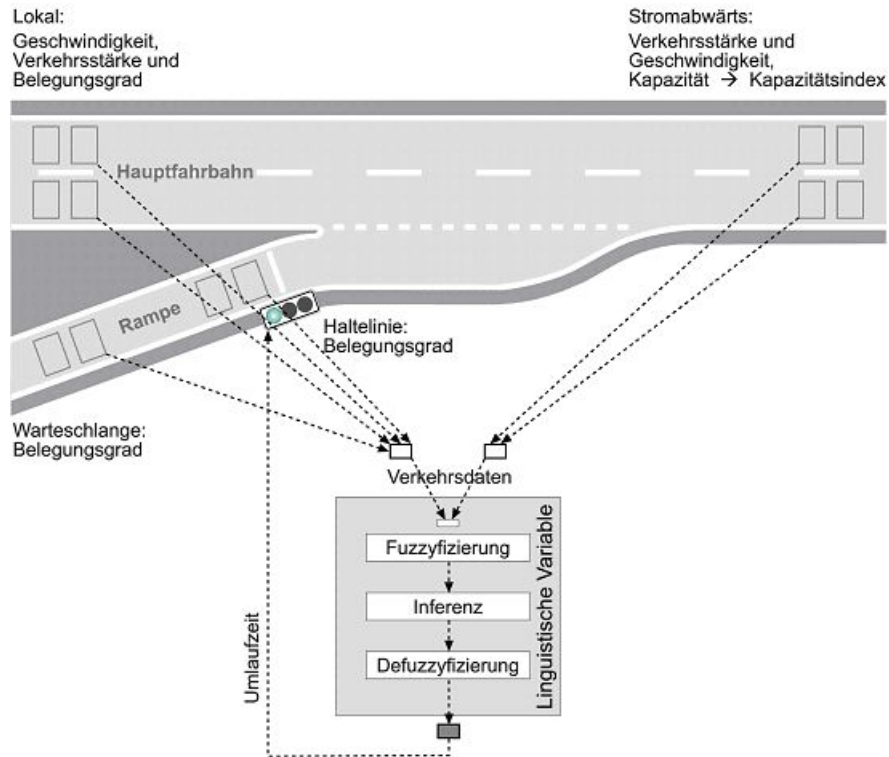
$$r^{(k)} = r^{(k-1)} + K_R[o' - o_{out}^{(k)}]$$

mit:

- r : Rampenverkehrsstärke (Zufluss)
- k : diskreter Zeitindex für Abtastzeiten T , üblicherweise im Intervall $[20s, 60s]$
- K_R : Reglerparameter
- o' : Sollwert des Belegungsgrades
- $o_{out}^{(k)}$: gemessener Belegungsgrad im Abflussquerschnitt

Wird der Sollwert o' des Belegungsgrades gleich dem kritischen Belegungsgrad festgelegt, so liefert ALINEA eine maximale **Abflussverkehrsstärke** q_{out} . Die Realisierung der errechneten Rampenverkehrsstärke $r^{(k)}$ erfolgt mittels geeigneten Schaltens der installierten Lichtsignalanlage, z.B. durch das Einfahren einzelner Fahrzeuge oder Fahrzeugpuls.

In Deutschland bekannt und angewendet wurde inzwischen ebenfalls eine Methode, die lokale Lichtsignalanlage an der Einfahrt durch einen Fuzzy-Regler zu steuern.



Optimierungsansatz Als Optimierungsansatz wird eine regelorientierte Entscheidungslogik entwickelt. Ziel ist es, die Gesamtreisezeit im System zu optimieren. Probleme liegen insbesondere im Zusammenspiel von Verkehrsbelastungen auf der Autobahn, der Zufahrtsrampe und im anschließenden nachgeordneten Straßennetz. Hier ist eine Balance zu halten, die vor allem dem betroffenen Verkehrsteilnehmer klar gemacht werden muss, um die für die Funktion des Systems erforderliche Akzeptanz zu erreichen.

2.2 Methoden

Geeignete Methoden Der ALINEA-Algorithmus nach dem Ansatz

$$r^{(k)} = r^{(k-1)} + K_R[o' - o_{out}^{(k)}]$$

mit:

- r : Rampenverkehrsstärke (Zufluss)
- k : diskreter Zeitindex für entsprechende Abtastzeiten T üblicherweise im Intervall [20s, 60s]
- K_R : Reglerparameter
- o' : Sollwert des Belegungsgrades
- $o_{out}^{(k)}$: gemessener Belegungsgrad im Abflussquerschnitt

kann auch im Rahmen einer linear-quadratischen Optimierung betrachtet werden; es handelt sich hier um ein Problem der optimalen Regelung eines linearen „dynamischen und diskreten Systems“.

Der Reglerparameter K_R beträgt in allen Implementierungen 20 Fz/h pro Hauptfahrbahnspur (z.B. 60 Fz/h für eine dreispurige Autobahn), aber die diesbezügliche Empfindlichkeit ALINEAs ist eher gering. Der Sollwert o' wird bei lokalen Installationen gleich der kritischen Belegung gesetzt, um, gemäß **Fundamentaldiagramm**, den Verkehrsfluss stromabwärts der Rampe zu maximieren. ALINEA ist ein I-Regler, weshalb im stationären Zustand (d.h. wenn der Zufluss q_{in} im Mittel konstant ist) im Mittel $o^{(k)} = o'$ automatisch hergestellt wird, obwohl keine Messungen von q_{in} verwendet werden. Der aus dem I-Regler resultierende Wert wird gekappt, wenn er den Wertebereich $[r_{min}, r_{max}]$ verlässt, wobei r_{min} den minimalen erlaubten **Zufluss** und r_{max} die **Abflusskapazität** der Rampe darstellen.

Als Randbedingung darf sich die wegen der Zuflussregelung entstehende Rampenschlange nicht über das Ende der Rampe hinaus erstrecken. Zur Einhaltung dieser Randbedingung sind eine Reihe geeigneter Massnahmen aus der Literatur bekannt.

2.3 Experiment

Experiment


ALINEA im
Einsatz

Hier haben Sie die Gelegenheit, die Wirkung der ALINEA-Methode zu beobachten.

Betrachtet wird ein dreistreifiger Hauptfahrbahnabschnitt mit einer Zufahrtsrampe, deren Zufluss mit der ALINEA-Methode geregelt werden kann. Die Verkehrsnachfrage auf der Hauptfahrbahn unterliegt stochastischen Schwankungen. Sie beginnt mit einer Verkehrsstärke von ca. 4000 Fz/h, steigt dann bis zu einem Wert von ca. 5000 Fz/h (12. Minute) und fällt anschließend bis auf ca. 100 Fz/h (40. Minute). Die Verkehrsnachfrage auf der Rampe schwankt stochastisch um einen Wert von ca. 1200 Fz/h. Durch Modellrechnungen können die resultierenden Verkehrsstärken am Einfahrquerschnitt (q_{in}), am Abflussquerschnitt (q_{out}) und auf der Rampe (r) sowie die Verkehrsdichte auf der Hauptfahrbahn (ρ) und der aktuelle Belegungsgrad o der Detektoren im Abflussquerschnitt ermittelt werden.

- Starten Sie als erstes einen Simulationslauf **ohne ALINEA** durch wiederholtes Drücken auf den gleichnamigen Button. Die Verkehrsnachfrage auf der Rampe fährt hierbei ungehindert auf die Hauptfahrbahn ein. Beobachten Sie die zeitlichen Entwicklungen der Kurven. Was für ein Verkehrszustand stellt sich auf der Hauptfahrbahn ein?
- Drücken Sie **Reset** und wiederholen Sie die Simulation, aber diesmal **mit ALINEA**. Die Verkehrsnachfrage auf der Rampe wird nun bei Erreichen des Sollwerts des Belegungsgrades $o' = 23\%$ nach der ALINEA-Methode geregelt. Beobachten Sie abermals die zeitlichen Entwicklungen der Kurven. Gibt es einen Unterschied zum vorherigen Simulationslauf ohne ALINEA?
- Beobachten Sie nun zum Schluss noch einmal die zeitlichen Entwicklungen der Kurven im direkten **Vergleich**.

 Erläuterungen zu den Simulationsergebnissen

 Hinweise zur Modellierung



— = ohne ALINEA — = mit ALINEA

 Download Applet

Infoseite **Ohne ALINEA:**

Der Belegungsgrad o der Hauptfahrbahn und die Verkehrsstärke q_{out} steigen bis zur ca. 8. Minute. Der Belegungsgrad erreicht seinen kritischen Wert von 25 %; ebenso q_{out} mit 6.000 Fz/h. Danach steigt der Belegungsgrad weiter. Es entsteht ein Stau auf der Hauptfahrbahn, der zu einer Reduktion der Abflussverkehrsstärke q_{out} führt. Die Stauwelle wandert stromaufwärts und reduziert auch die zufließende Verkehrsstärke q_{in} . Der Verkehrszustand ist quasi-stationär von der 10. Minute bis zur 32. Minute. Erst nach der 34. Minute bewirkt die inzwischen stark gesunkene Nachfrage auf der Hauptfahrbahn, dass sich der Stau auflösen kann.

Mit ALINEA:

Alle Kurven verlaufen zunächst ähnlich wie bei dem Fall ohne ALINEA. Wenn jedoch der Belegungsgrad o seinen Sollwert o' erreicht (23 %), setzt die Zufussdosierung ein. Die Verkehrsstärken auf der Rampe werden reduziert, so dass der Belegungsgrad o nahe seinem Sollwert o' gehalten wird. Dies bewirkt, dass der Verkehr auf der Hauptfahrbahn *ohne Stau* ($o < 23\%$) weiterfahren kann, während die Abflussverkehrsstärke q_{out} ihren Maximalwert von 6.000 Fz/h annimmt. Nach der 27. Minute ist die Verkehrsnachfrage auf der Hauptfahrbahn genügend gefallen, so dass die Regelung höhere Verkehrsstärken r bis zur Kapazität der Rampe von 1800 Fz/h zulässt, um den gebildeten Rückstau auf der Rampe bis zur 30. Minute abzubauen.

2.3.1 Nebenpfad: Modellierungsgleichungen

Notation	ρ_{max} : maximale Verkehrsdichte
	k : laufender Zeitschritt ($k = 0, 1, \dots, K$)
	v_f : freie Geschwindigkeit
	w : Warteschlange auf der Rampe
	w_m : Warteschlange auf der Hauptfahrbahn

Initialisierungen und Parameterwerte	<ul style="list-style-type: none">• $\rho_{max} = 240$ Fz/km• Simulationshorizont $K = 240$ (Zeitschritte)• Flusskapazität Rampe $r_{max} = 1800$ Fz/h• Zeitschritt $T = 10$ Sekunden• Sollwert des Belegungsgrades $o' = 23\%$• Länge des Einfädelsegments $\Delta = 500$ m• Anfangswerte: $\rho^{(1)} = w_m^{(1)} = w^{(1)} = 0$; $r^{(1)} = 1200$ Fz/h
--------------------------------------	---

- ALINEA-Parameter $K_r = 20$; $K_p = 100$

Funktion
Fundamental-
diagramm

$$q(\rho, v_f) = v_f \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}}\right)$$

Zeitschleife für
 $k = 1, \dots, K$

- Stochastische Veränderung der freien Geschwindigkeit $v_f^{(k)} = 100 + \zeta^{(k)}$, wobei $\zeta^{(k)}$ stochastische Variable, gleichverteilt im Bereich von $[-5,5]$.
- Kapazität Hauptfahrbahn:

$$q_{\max}^{(k)} = 0,5 \cdot v_f^{(k)} \cdot p_{\max}$$

- Ankommende Verkehrsstärke (Nachfrage) der Hauptfahrbahn (in Fz / h):

$$Q_{in} = 4000 + \left\{ \begin{array}{ll} 20k & \text{wenn } k \leq 50 \\ 1000 & \text{wenn } 50 < k \leq 70 \\ 1350 - 5k & \text{wenn } 70 < k \leq 150 \\ 6750 - 45k & \text{wenn } k > 150 \end{array} \right\} + \epsilon^{(k)},$$

wobei $\epsilon^{(k)}$ stochastische Variable, gleichverteilt im Bereich $[-500,500]$.

- Rampennachfrage (Fz / h):

$$d^{(k)} = 1200 + \eta^{(k)},$$

wobei $\eta^{(k)}$ stochastische Variable, gleichverteilt im Bereich $[-200,200]$.

- Belegungsrate (%) Hauptfahrbahn:

$$o_{out}^{(k)} = \frac{50 \rho^{(k)}}{\rho_{\max}}$$

- Rampenverkehrsstärke (Fz / h):

– mit ALINEA:

$$r^{(k)} = \min \left\{ d^{(k)} + \frac{w^{(k)}}{T}, r_{\max}, r^{(k-1)} + K_r [23 - o^{(k)}] \right\} - K_p [o^{(k)} - o^{(k-1)}]$$

– ohne Zuflussdosierung:

$$r^{(k)} = d^{(k)} + \frac{w^{(k)}}{T}$$

- Verkehrsstärke Hauptfahrbahn (einfahrend):

$$q_{in}^{(k)} = \begin{cases} \min \{Q_{in}^{(k)} + \frac{w_m^{(k)}}{T}, q_{max}^{(k)}\} & \text{wenn } \rho^{(k)} \leq 0,5\rho_{max} + 38 \\ \min \{Q_{in}^{(k)} + \frac{w_m^{(k)}}{T}, Q[\rho^{(k)}, v_f^{(k)}] - r^{(k)}\} & \text{wenn } \rho^{(k)} > 0,5\rho_{max} + 38 \end{cases}$$

- Verkehrsstärke Hauptfahrbahn (ausfahrend):

$$q_{out}^{(k)} = \begin{cases} Q[\rho^{(k)}, v_f^{(k)}] & \text{wenn } \rho^{(k)} \leq 0,5\rho_{max} + 38 \\ Q[\rho_{max} + 38, v_f^{(k)}] & \text{sonst.} \end{cases}$$

Kontinuitäts-
gleichungen

- Verkehrsdichte:

$$\rho^{(k+1)} = rho^{(k)} + \frac{T [q_{in}^{(k)} - q_{out}^{(k)} + r^{(k)}]}{\Delta}$$

- Schlange Hauptfahrbahn:

$$w_m^{(k+1)} = w_m^{(k)} + T [Q_{in}^{(k)} - q_{in}^{(k)}]$$

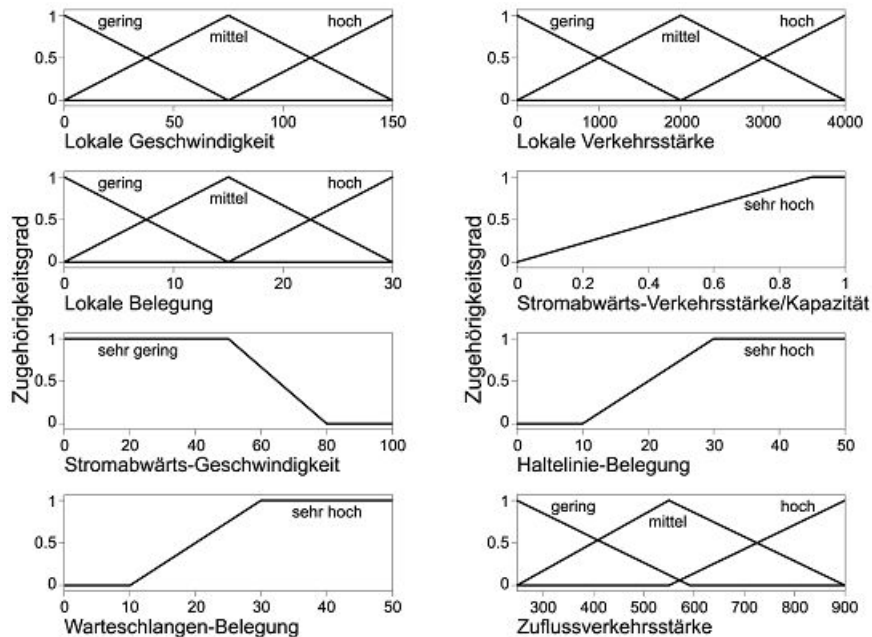
- Schlange Rampe:

$$w^{(k+1)} = w^{(k)} + T [d^{(k)} - r^{(k)}]$$

2.4 Fuzzy

Fuzzy-Regler Ein Fuzzy-Regler kann nicht-lineare Systeme mit unbekanntem Zusammenhängen, wie z.B. Verkehrsfluss in **Verflechtungsbereichen**, sehr effizient steuern. Laut [BOGENBERGER 2002] werden als Eingangswerte in den lokalen Fuzzy-Regler sieben Verkehrskenngrößen einbezogen. Die Anzahl und die Parameter der Zugehörigkeitsfunktion für jede Eingangsgröße werden aus Simulationen ermittelt bzw. aus bestehenden Algorithmen erlernt und abgeleitet. Es ist besonderer Wert darauf zu legen, dass durch die gewählten Inputgrößen eine detaillierte Ableitung der aktuellen Verkehrsbedingungen auf der Hauptfahrbahn und auf der Einfahrt erfolgen kann.

- Die lokale Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Belegung auf der Hauptfahrbahn werden unmittelbar stromaufwärts der Einfahrt gemessen.
- Die Kapazität des Engpasses wird aus historischen Verkehrsdaten der gemessenen maximalen Verkehrsstärken auf der Hauptfahrbahn berechnet.
- Der stromabwärtige **Engpassindex** ist die gemessene aktuelle Verkehrsstärke dividiert durch die Kapazität des Engpasses.



Die als **Wissensbasis** bezeichneten Regeln sind das Kernstück des Fuzzy-Logikreglers und werden während der **Interferenz** abgearbeitet:

REGEL	PRÄMISSE	KONSEQUENZ
I	WENN lokale Belegung GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH
II	WENN lokale Belegung MITTEL	DANN Zuflussverkehrsstärke MITTEL
III	WENN lokale Belegung HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke GERING
IV	WENN lokale Geschwindigkeit GERING UND lokale Verkehrsstärke HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke GERING
V	WENN lokale Geschwindigkeit MITTEL UND lokale Belegung HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke MITTEL
VI	WENN lokale Geschwindigkeit MITTEL UND lokale Belegung GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH
VII	WENN lokale Geschwindigkeit HOCH UND lokale Verkehrsstärke GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH
VIII	WENN Stromabwärtsgeschwindigkeit SEHR GERING UND Stromabwärtsverkehrsstärke/Kapazität SEHR GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke GERING
XI	Wenn Haltelinie-Belegung SEHR HOCH ODER Warteschlangen-Belegung SEHR HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH

Fuzzy-Set-Theorie Die auf der Fuzzy-Set-Theorie basierende Auswertung der **Regeln** verwendet Standard-Operatoren zur Durchführung der logischen Operationen wie Negation, UND- und ODER-Verknüpfung. Die Regelbasis wird durch **Expertenwissen**, **Emulationen** bestehender Verfahren und durch Simulationen bestimmt; insgesamt besteht die Regelbasis aus neun Regeln. Wichtig sind vor allem die letzten beiden Regeln:

- Durch die Verarbeitung der Engpassdaten in einer speziellen Regel wird eine erste Koordinierung für die Zufahrtssteuerung erreicht.
- Um außerdem einen Rückstau von der Einfahrt ins Sekundärnetz möglichst zu vermeiden, wird die aktuelle Warteschleifenlänge in die Entscheidungslogik mit eingebunden.

Die Regelbasis wurde so klein wie möglich gehalten, um den Vorteil der Transparenz und der leichten Handhabbarkeit von Fuzzy-Reglern effektiv zu nutzen. Die WENN-DANN-Regeln sind für jede geregelte Zufahrt identisch und werden auch durch die genetische Optimierung nicht geändert. Als Ausgangsgröße je Minute wird die Umlaufzeit der Zuflussanlage ermittelt.

3 Koordinierte Zuflussregelung

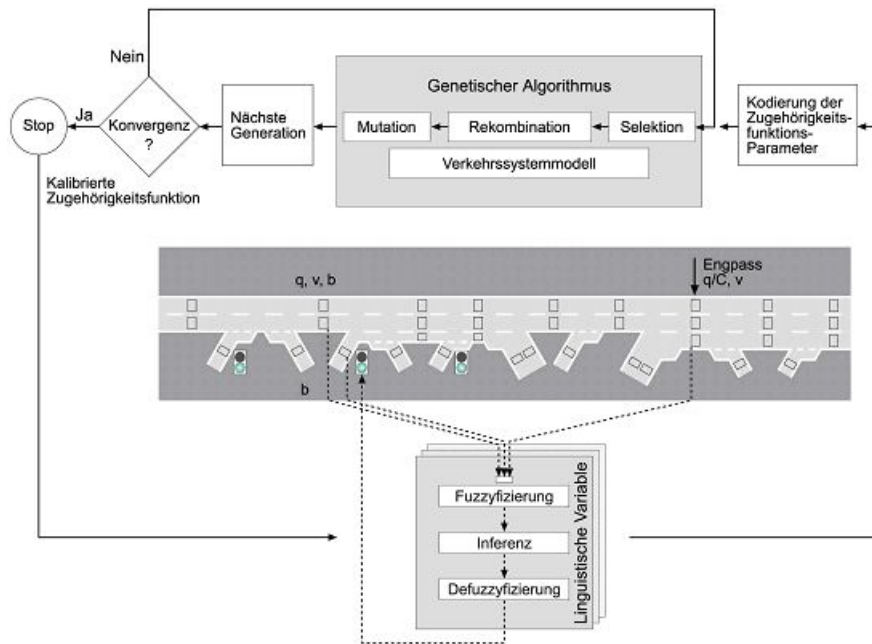
3.1 Einleitung

Koordinierte Zuflussregelung Die Steuerung erfolgt über eine Reihe entlang einer Autobahn liegenden Zufahrtsrampen, es erfolgt sozusagen eine Koordinierung des Verkehrsablaufs über mehrere Autobahnabschnitte hinweg in einer Fahrtrichtung (oder für ein ganzes Autobahnnetz). Frühe koordinierte Optimierungsverfahren basierten auf einfachen **statischen** (stationären) Verkehrsflussmodellen, um eine Maximierung des gesamten Durchsatzes oder der Fahrbahnnutzung unter Berücksichtigung der beschränkten Fahrbahnkapazität und weiterer Restriktionen zu erzielen; entsprechende Optimierungsaufgaben fallen in die Kategorien der Linearen oder Quadratischen Programmierung.

Moderne Verfahren der koordinierten Zuflusssteuerung basieren auf umfangreichen **dynamischen** makroskopischen nichtlinearen Verkehrsflussmodellen, um eine Minimierung der gesamten Verweilzeit aller Verkehrsteilnehmer über einen zeitlichen Optimierungshorizont zu erzielen; die resultierende komplexe Optimierungsaufgabe kann mit bewährten Verfahren der Nichtlinearen Programmierung effizient in Echtzeit gelöst werden.

Koordinierte Zuflussregelungsverfahren können in eine hierarchische Steuerungsstruktur eingebettet werden, wobei optimale Sollwerte für den Verkehrszustand in der Nähe einzelner Rampen bereitgestellt werden. Der Steuerung der Einzelrampen liegt wiederum die ALINEA-Methode zugrunde.

Die Wirkungen auf den Hauptfahrbahnen können durch weitere Maßnahmen wie Fahrstreifenzuweisungen und Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Einzelspur verstärkt werden. Auch hier wurde von [BOGENBERGER 2002] ein genetischer Optimierungsalgorithmus auf Fuzzy-Basis in die vorliegende Systemarchitektur integriert.



Fuzzy Koordinierung Bei der Fuzzy **Koordinierung** wird ein genetischer Optimierungsalgorithmus in die Systemarchitektur integriert. Die Identifikation der Parameter der einzelnen Zuflussregler in einem Fuzzy-Modell wird als Optimierungsproblem betrachtet. Genetische Algorithmen sind stochastische Optimierungsalgorithmen, deren Wirkungsweise und mathematische Operationen an die natürliche **Evolution** angelehnt sind. Auf diese Lösungen wird das Prinzip „der Stärkste überlebt“ angewendet (**Selektion**), um im Sinne einer Zielfunktion bessere Lösungen zu erzeugen, die am Ende zu einer optimalen Lösung führen. Aus den besten Lösungen einer Generation werden neue Lösungen erzeugt (**Rekombination** und **Mutation**). Diese werden anschließend wiederum bewertet etc. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis entweder die Lösung konvergiert oder eine vorgegebene maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist.

Probleme Der Untersuchungsbereich vergrößert sich gegenüber der lokalen Zuflussregulierung auf eine Reihe von Zufahrtsrampen und gegebenenfalls einen Verkehrskorridor, wobei meistens - wenn auch zu unterschiedlichen Zeiträumen - beide Fahrtrichtungen betroffen sind. Die Haltung der Balance wird damit erheblich schwieriger. Zu den Zielen kann hier auch die Nutzung von Reservekapazitäten im nachgeordneten Netz hinzukommen. Bei Bewertungen sind diese Netzteile einzubeziehen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei koordinierten Zuflussregelungen ist die Gleichberechtigung der Nutzer unterschiedlicher Einfahrtsrampen, wobei etwaige Verzögerungen auf verschiedenen zuflussgeregelten Rampen möglichst gleichverteilt sein sollten.

Optimierungs-
ansatz Zur optimalen Lösung - einer Minimierung der Gesamtreisezeit im System - kann ein genetischer Algorithmus mit Selektion, Rekombination und Mutation führen, wenn der Lösungskreislauf konvergiert oder eine maximale Anzahl von Iterationen erfolgt ist.

3.2 Methoden

Beschreibung der Methoden Bei der stationär optimierten Koordinierung der **Zuflussraten** wird von konstanten Nachfragen während einer Tagesperiode ausgegangen, um den Einsatz einfachster statischer Verkehrsflussmodelle zu ermöglichen. Eine Autobahnstrecke mit mehreren Ein- und Ausfahrtsrampen wird in Segmente der Länge $\Delta_j = 1, \dots, N$ unterteilt, die jeweils maximal eine Ein- und eine Ausfahrtsrampe enthalten dürfen. Es gilt dann:

$$q_j = \sum_{i=1}^j p_{ij} \cdot r_j$$

unter den Nebenbedingungen:

$$r_{j,min} \leq r_j \leq \min \{r_{j,max}, d_j\}$$

mit:

- q_j : Verkehrsstärke des Segments j
- r_i : Zufluss der Rampe i
- p_{ij} : bekannte Anteile der Nachfrage der Einfahrtsrampe i , die die Autobahn stromaufwärts des Segments j noch nicht verlassen hat ($0 \leq p_{ij} \leq 1$)
- c_j : Flusskapazität des Segments j
- d_j : Nachfrage der Einfahrtsrampe j

Optimierungskriterien Als Optimierungskriterium kann die Maximierung der Anzahl einfahrender Fahrzeuge oder die Fahrbahnbenutzung herangezogen werden.

Anzahl einfahrende Fahrzeuge:

$$\sum_{j=1}^N r_j \Rightarrow Max$$

Fahrbahnbenutzung:

$$\sum_{j=1}^N q_j \cdot \Delta_j \Rightarrow Max$$

Alternativ kann eine Vergleichsmäßigung der entstehenden Rampenschlangen mittels

$$\sum_{j=1}^N (q_j - r_j)^2 \Rightarrow Min$$

angestrebt werden.

3.3 Methoden (2)

Statisches Verkehrsflussmodell Diese Problemformulierungen führen zu Optimierungsaufgaben der Linearen bzw. Quadratischen Programmierung, die mit verfügbarer Lösungssoftware leicht gelöst werden können. Eine Erweiterung des einfachen statischen Verkehrsflussmodells zur Berücksichtigung konstanter Fahrzeit für jedes Autobahnsegment sowie zeitlich veränderlicher Nachfrage um den Preis entsprechend erhöhter Problemdimensionen wurde ebenso vorgeschlagen.

Moderne Verfahren Moderne fortgeschrittene Verfahren der koordinierten Zufussregelung berechnen optimale Einfahrtsverkehrsstärken und entsprechende Verkehrszustände über einen Optimierungshorizont, ausgehend von einem gegebenen Anfangszustand des Verkehrs auf der betrachteten Schnellstrasse und zugehörigen Einfahrtsrampen; hierzu werden geeignet bereitgestellte Prognosen der Nachfrage an den Netzsprünge (Einfahrtsrampen) sowie der **Ausfahrtsraten** über den gleichen zeitlichen Horizont zugrundegelegt. Die Optimierungsverfahren berücksichtigen hierbei:

- die beschränkte Speicherkapazität der Einfahrtsrampe
- die oben erwähnten Restriktionen der Einfahrtsflüsse
- die nichtlineare Verkehrsdynamik in Form eines makroskopischen zeitdiskreten Zustandsmodells (worin indirekt die beschränkte **Flusskapazität** der Fahrbahn enthalten ist)

$$x^{(k+1)} = f [x^{(k)}, r^{(k)}, d^{(k)}]$$

wobei der **Zustandsvektor** x die Verkehrsdichten ρ_i und mittleren Geschwindigkeiten v_i in 500 m langen Segmenten sowie die **Schlängellängen** l_i in den Einfahrtsrampen beinhaltet; der Eingangsvektor r beinhaltet alle steuerbaren Einfahrtsverkehrsstärken; und der Störungsvektor d beinhaltet die Nachfragen in den Netzsprünge sowie die Ausfahrtsraten.

Optimierungskriterium Das zu minimierende **Optimierungskriterium** ist üblicherweise die gesamte Verweilzeit T_s aller Fahrzeuge im Autobahnnetz (einschliesslich Einfahrtsrampen) über den zeitlichen Optimierungshorizont

$$T_s = \sum_{k=0}^K \left(\sum_{i=1}^n \rho_i^{(k)} \cdot \Delta_i + \sum_{i=1}^m l_i^{(k)} \right) \cdot T$$

mit:

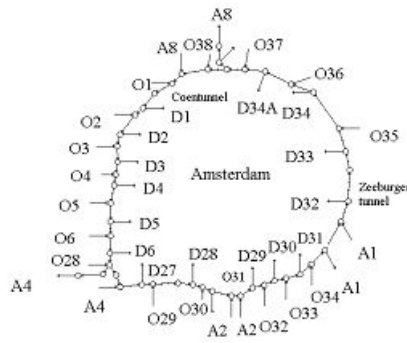
- T : Schrittweite des zeitdiskreten Modells (ca. 10 sec)
- k : diskreter Zeitindex
- K : zeitlicher Optimierungshorizont
- $\rho_i^{(k)}$: Verkehrsdichte
- Δ_i : Segmentlänge des Segments i
- $l_i^{(k)}$: Schlängellänge im Segment i
- n : Anzahl der Segmente
- m : Anzahl der Einfahrtsrampen

Das beschriebene zeitdiskrete dynamische Optimierungsproblem mag bei langen Schnellstrassen entsprechend hohe Dimensionen aufweisen, kann aber sehr effizient (wenige CPU Minuten) mittels numerischer Verfahren der Nichtlinearen Programmierung (z. B. konjugierte Gradienten) gelöst werden.

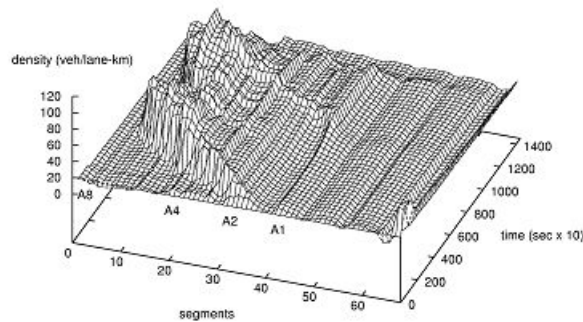
3.4 Beispiel

Beispiel Dargestellt ist ein Beispiel für eine (simulierte) Anwendung der koordinierten Zuflusssteuerung dieser Art unter Nutzung des allgemeinwendbaren Softwarewerkzeugs AMOC auf der Amsterdamer Ringautobahn A10 für die Nachmittagsstosszeit von 4 Stunden. Es wird nur die Richtung entgegen dem Uhrzeigersinn betrachtet .

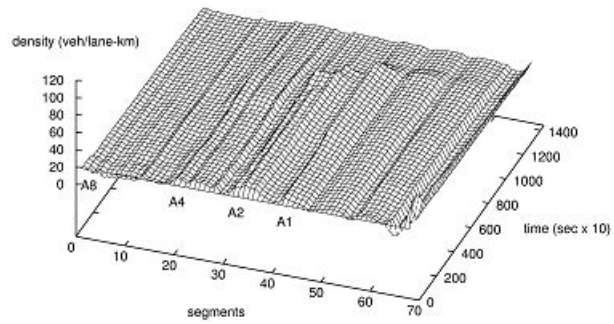
Die A10 hat eine Länge von 32 km in der betrachteten Fahrrichtung und beinhaltet 21 Ein- und 20 Ausfahrtsrampen, darunter 4 Autobahnkreuzungen mit A1, A2, A4, A8.



Ohne Zuflusssteuerung entsteht ein Stau, der bis zur Hälfte des Rings beeinträchtigt.



Mit optimaler Zuflusssteuerung (ohne Speicherrestriktionen für die Einfahrtsrampen) wird die Staubildung verhindert und die Reduktion der gesamten Verweilzeit beträgt - 43 %.



Bei Berücksichtigung der Speicherrestriktionen wird der Stau nicht ganz verhindert, die Reduktion der gesamten Verweilzeit beträgt aber immerhin - 32 %.

4 Literatur

4.1 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [BOGENBERGER 2001] Bogenberger K.
Adaptive Fuzzy Systems for Traffic Responsive and Coordinated Ramp
Metering
FGV-TUM
München 2001
- [BOGENBERGER 2002] Bogenberger K.
Adaptive Zuflussregelung mit genetischen Fuzzy-Algorithmen
HEUREKA '02
FGSV Verlag GmbH
- [DEUFRAKO-IRAMES 2004] DEUFRAKO-IRAMES
Untersuchung der Wirksamkeit von Zuflussregelungsanlagen an Hauptver-
kehrsstraßen
Schlussbericht
München, Juli 2004
- [EURAMP 2003] EURAMP
Project 507645
Brüssel, 2003
- [KOTSIALOS/PAPAGEORGIU 2004] Kotsialos A., Papageorgiou M.
Efficiency and equity properties of freeway network-wide ramp metering
with AMOC.
Transportation Research C, Vol. 12, 2004, 401-420.
- [MOBINET 2004] MOBINET
Fachinformation BMFT
www.mobinet.de
2004
- [PAPAGEORGIU et al. 1998] Papageorgiou M. et al.
ALINEA local ramp metering: Summary of field results
Transportation Research Record No. 1603
1998.
- [PAPAGEORGIU 2000] Papageorgiou M.
Regelungsstrategien für den Straßenverkehr: Vergangenheit, Gegenwart
und Zukunft.
Automatisierungstechnik, Vol. 48, 2000, 165-174.
- [PAPAGEORGIU et al. 2003] Papageorgiou M. et al.
Review of Road Traffic Control Strategies

Proceedings of IEEE, Vol. 91, No 12
2003

[RHYTHM 2000] RHYTHM

Demonstration of ramp metering algorithms
Project IST - 2000 - 29427, Deliverable D 6.2

[ZHANG/LEVINSON 2003] Zhang L., Levinson D.

Optimal Freeway Ramp Control without Origin-Destination Information
Minneapolis, 2003
zhan0294@tc.umn.edu