

Adaptive Zuflussregelung mit genetischen Fuzzy-Algorithmen

Dr.-Ing. Klaus Bogenberger
BMW AG, E-W-1
Tel.: 089 – 382 30764
Klaus.Bogenberger@bmw.de

1. Einleitung

Infolge der ständig steigenden Verkehrsnachfrage auf den Autobahnen bei gleichzeitig begrenzter Mittelverfügbarkeit für den Ausbau des vorhandenen Streckennetzes gewinnt die dynamische Verkehrsbeeinflussung immer mehr an Bedeutung. Die in Deutschland bisher verwendeten Leitsysteme sind jedoch zur Verbesserung der Verkehrssituation im Bereich hochbelasteter Autobahnen mit gleichzeitig hochbelasteten Zufahrtsrampen kaum bzw. nur begrenzt geeignet. Zur Verbesserung in diesen Bereichen könnten sogenannte "Zuflussregelungsanlagen" eingesetzt werden. Diese wurden erstmals in den 60ern in den USA implementiert und gehören heute bereits in vielen Ländern zum Standardinstrumentarium des modernen Verkehrsmanagements. Zuflussregelungsanlagen können wie folgt definiert werden:

"Regelung des Zuflusses von der Rampe auf die BAB in Abhängigkeit von der aktuellen Verkehrssituation mit Hilfe einer Lichtsignalanlage (LSA)".

Bisher existierende Algorithmen zur Zuflussregelung wurden basierend auf relativ einfachen verkehrstechnischen Zusammenhängen wie z.B. Verkehrsnachfrage-Kapazitätsanalysen oder auf klassischen regelungstechnischen Ansätzen entwickelt. Der hier vorgestellte neue Ansatz für die koordinierte verkehrsabhängige Steuerung von Zuflussanlagen basiert auf sog. "Soft Computing"-Methoden. Die lokale Lichtsignalanlage an der Einfahrt wird hierbei durch einen Fuzzy-Regler gesteuert. Die kontinuierliche Adaption an das sich ändernde Verkehrsgeschehen und die Koordinierung aller dosierten Zufahrten im Gesamtsystem erfolgt durch die Integration eines makroskopischen Verkehrssystemmodells und eines Optimierungsverfahrens in die Systemarchitektur. Als Optimierungsansatz wurde ein genetischer Algorithmus gewählt, da die Struktur und der Optimierungsprozess eines Fuzzy-Systems in diesem stochastischen und effizienten Suchverfahren sehr gut abgebildet werden kann. Parallel werden hierbei mehrere Koordinierungsstrategien (Lösungen) mittels des Verkehrssystemmodells bewertet und optimiert. Ziel dieser Optimierung ist ein Systemoptimum basierend auf der Gesamtreisezeit im System. Als Ergebnis erhält man die optimal koordinierten Parameter für die einzelnen lokalen Fuzzy-Regler der Zuflussanlagen. Die Erfassung der relevanten Verkehrskenngrößen und die Berechnung der Umlaufzeit bzw. Zuflussverkehrsstärke der Einfahrt mit Hilfe

des Fuzzy-Reglers erfolgt minütlich, wohingegen die genetische Adaption online oder offline erfolgt¹.

Die in diesem Kontext entwickelten ACCEZZ-Modelle wurden mittels des mikroskopischen Verkehrsflusssimulationsmodells AIMSUN2 bewertet und die Ergebnisse mit fünf konventionellen Verfahren wie z.B. ALINEA verglichen. Für diese Evaluation wurden mehrere Szenarien entwickelt und getestet, die auf existierendem Verkehrsangebot und realer Verkehrsnachfrage basieren. Die Gesamtreisezeiten im System, Wartezeiten und Warteschlangenlängen an den Einfahrten, Benzinverbrauch und Emissionen wurden für jeden Zuflussalgorithmus ermittelt und analysiert. Die neu entwickelten Algorithmen stellten hierbei eindrucksvoll ihre Effizienz unter Beweis und eine Implementierung des dargestellten Regelungsansatzes wird gegenwärtig im Rahmen des BMBF-Leitprojekts MOBINET für den Sommer 2002 am Mittleren Ring in München vorbereitet.

2. Fuzzy-Zuflussregelung

ACCEZZ basiert auf einfachen lokalen Fuzzy-Reglern, die für eine einzelne Autobahneinfahrt entwickelt wurden. Die Regelbasis dieser Fuzzy-Regler stellt eine sehr gute Möglichkeit dar, politische Rahmenbedingungen und Expertenwissen direkt in die Steuerungsstrategie einzubinden und anschließend auch umzusetzen. Herkömmliche Zuflussalgorithmen zwingen nicht-lineare Systeme häufig in einen linearen Kontext. Da ein Fuzzy-Regler nicht-lineare Systeme mit unbekanntem Zusammenhängen, wie z.B. Verkehrsfluss im Verflechtungsbereich sehr effizient steuern kann, hat er bezüglich des Problems der Zuflussdosierung einen deutlichen Vorteil gegenüber konventionellen Algorithmen. Implementierungen einfacher Fuzzy-Ansätze in Seattle und Amsterdam haben dies bereits eindrucksvoll bewiesen.

¹ Die unterschiedlichen Versionen des entwickelten Steuerungsansatzes werden nachfolgend unter dem Akronym ACCEZZ ("Adaptive and Coordinated Control of Entrance Ramps with Fuzzy Logic") zu einer Modellfamilie zusammengefasst.

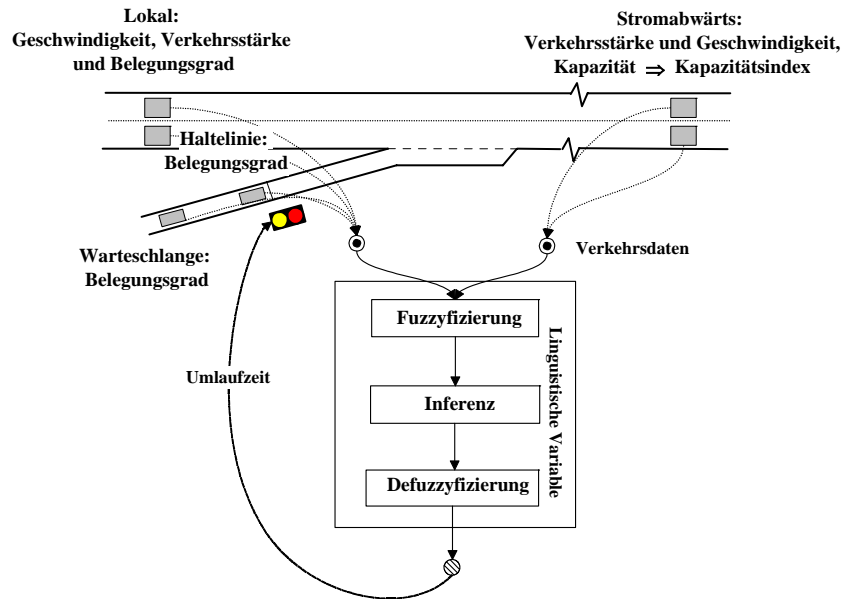


Abbildung 1: Prinzip der Fuzzy-Zuflussregelung

Als Eingangswerte in den lokalen Fuzzy-Regler wurden insgesamt sieben Verkehrskenngrößen verwendet (siehe Abbildungen 1 und 2). Die Anzahl und die Parameter der Zugehörigkeitsfunktion(en) für jede Eingangsgröße wurde aus Simulationen ermittelt bzw. aus bestehenden Algorithmen erlernt und abgeleitet. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, 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. Der stromabwärtige Engpassindex ist die gemessene aktuelle Verkehrsstärke dividiert durch die Kapazität des Engpasses. Die Kapazität des Engpasses wird aus historischen Verkehrsdaten der gemessenen maximalen Verkehrsstärken auf der Hauptfahrbahn berechnet. Die Integration des Verkehrsstärke-Kapazität-Verhältnisses des Engpasses als Eingangsgröße für alle dosierten Zufahrten stromaufwärts kann als erste Koordinierung der gesamten Zuflussregelungsanlage betrachtet werden. Eine zweite Koordinierung der dosierten Zufahrten ist in der später beschriebenen genetischen Optimierung integriert. Um die Länge der aktuellen Warteschlange zu schätzen, wird die Belegung am Beginn der Einfahrt und an der Haltelinie der Lichtsignalanlage ermittelt und in die Steuerlogik eingebunden.

Bei der Fuzzyfizierung wird jedem der sieben Messwerte ein Zugehörigkeitsgrad anhand einer oder mehrerer Zugehörigkeitsfunktionen zugeordnet. Die Definition dieser Funktion(en) orientiert sich an einer verbalen Beschreibung des aktuellen Verkehrszustandes auf der Hauptfahrbahn bzw. der Einfahrt. So werden z.B. die Belegung, die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit mit den Begriffen "gering", "mittel" und "hoch" beschrieben. Es sind hierbei nicht nur die Eingangsgrößen zu fuzzyfizieren, sondern auch die Zuflussverkehrsstärke als Ausgangsgröße. Drei verschiedene Werte "hoch",

"mittel" und "gering" beschreiben die Zuflussrate bzw. Umlaufzeit. Für alle verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen des Reglers werden Polygone bzw. Dreiecke verwendet. Die Parameter der einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen beeinflussen direkt das Regelungsverhalten jeder Zuflussregelungsanlage. Die Parameter dieser Funktionen wurden intelligent vorinitialisiert und werden anschließend durch die genetische Optimierung dynamisch angepasst. Die optimalen Größen für eine koordinierte Steuerung der Zuflussanlage sind das Ergebnis der genetischen Optimierung. Die Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen pro Eingangs- bzw. Ausgangsgröße bleibt unverändert. Mit anderen Worten, eine Möglichkeit der Modifikation des Verhaltens eines Reglers besteht in der Verfeinerung der linguistischen Fuzzy-Variablen. Die Randbedingungen für alle Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen wie z.B. die maximale und minimale Umlaufzeit werden während der Adaption beachtet.

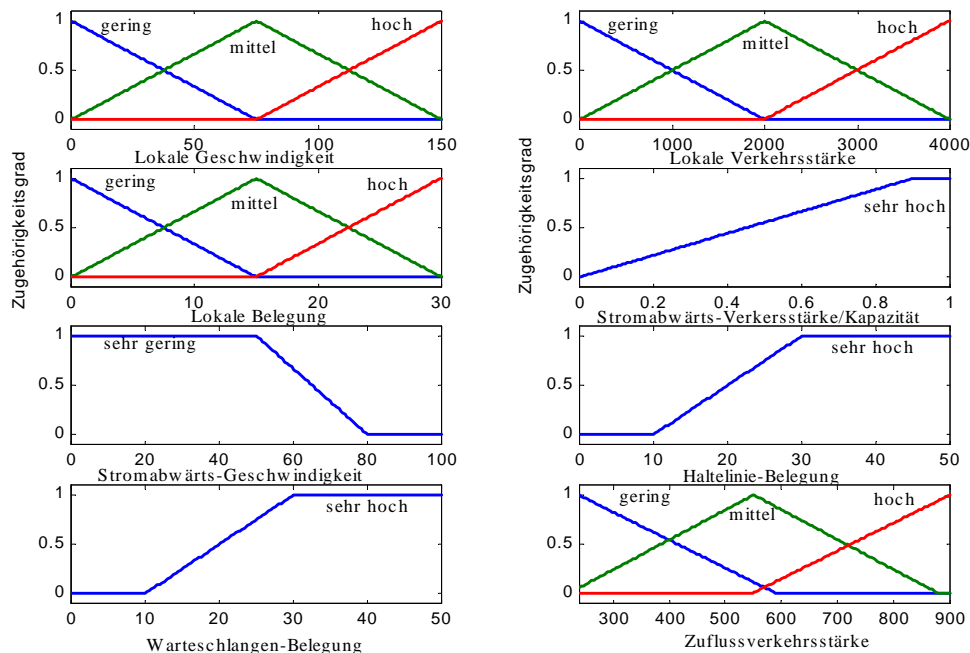


Abbildung 2: Zugehörigkeitsfunktion(en) für die sieben Eingangsgrößen und die Ausgangsgröße des Fuzzy-Zuflussreglers

Die als Wissensbasis bezeichneten Regeln sind das Kernstück des Fuzzy-Logikreglers und werden während der Inferenz abgearbeitet (siehe Tabelle 1). 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 von ACCEZZ wurde durch Expertenwissen, Emulationen bestehender Verfahren und durch Simulationen bestimmt. Insgesamt besteht die Regelbasis von ACCEZZ aus neun Regeln, die in drei inhaltliche Blöcke gegliedert werden können:

1. Der erste inhaltliche Block (Regel I-III) basiert auf der lokalen Belegung. In Anlehnung an die "Occupancy-Strategy", einem sehr erfolgreich

implementierten Zuflussregelungsalgorithmus, wurden insgesamt drei Regeln definiert.

2. Der zweite Block (Regel IV-VII) verwendet das empirische Wissen über die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsstärke, um daraus einen detaillierteren Stauindex zu erhalten und daraus eine effizientere Zuflussrate abzuleiten. Insgesamt wurden hierfür vier Regeln integriert.
3. Der dritte und wichtigste Block (Regel VIII-IX) besteht aus zwei 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 zu vermeiden, wird die aktuelle Warteschlangenlänge in die Entscheidungslogik miteingebunden.

Regel	Gewichte	Prämisse	Konsequenz
I	1.5	WENN Lokale Belegung GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH
II	1.5	WENN Lokale Belegung MITTEL	DANN Zuflussverkehrsstärke MITTEL
III	2.0	WENN Lokale Belegung HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke GERING
IV	2.0	WENN Lokale Geschwindigkeit GERING UND Lokale Verkehrsstärke HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke GERING
V	1.0	WENN Lokale Geschwindigkeit MITTEL UND Lokale Belegung HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke MITTEL
VI	1.0	WENN Lokale Geschwindigkeit MITTEL UND Lokale Belegung GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH
VII	1.0	WENN Lokale Geschwindigkeit HOCH UND Lokale Verkehrsstärke GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH
VIII	3.0	WENN Stromabwärts-Geschwindigkeit SEHR GERING UND Stromabwärts- Verkehrsstärke/Kapazität SEHR GERING	DANN Zuflussverkehrsstärke GERING
IX	3.0	WENN Haltelinie-Belegung SEHR HOCH ODER Warteschlangen- Belegung SEHR HOCH	DANN Zuflussverkehrsstärke HOCH

Tabelle 1: Regelbasis des Fuzzy-Zuflussreglers

Das Gewicht der einzelnen Regel gibt deren strategische Bedeutung an. Je höher das Gewicht, umso wichtiger ist die Regel. Politische Ziele und Steuerungsstrategien können so gezielt verstärkt bzw. gedämpft werden. Simulationen zeigten, dass mit einer erweiterten Regelbasis kein nennenswerter zusätzlicher positiver Effekt erzielt werden kann. Auch um den enormen Vorteil der Transparenz und der leichten Handhabbarkeit von Fuzzy-Reglern effektiv zu nutzen, wurde die Regelbasis so klein wie möglich gehalten.

Die empfohlenen, universellen WENN-DANN Regeln und deren Gewichtung sind für jede dosierte Zufahrt identisch und werden auch durch die genetische Optimierung nicht verändert.

Für den Defuzzifizierungsprozess in ACCEZZ wird die Schwerpunktmethode verwendet, die zur Dämpfung stochastischer Schwankungen beiträgt. Als Ausgangsgröße je Minute wird die Umlaufzeit der Zuflassanlage ermittelt. Diese Umlaufzeit setzt sich aus einer Grünzeit von 3 Sekunden, einer Gelbzeit von 1 Sekunde und einer Rotzeit von 2 bis 11 Sekunden zusammen.

3. Genetische Fuzzy-Regelung

Für eine weitere verbesserte Koordinierung wurde ein genetischer Optimierungsalgorithmus in die Systemarchitektur integriert. Die Identifikation der Parameter in einem Fuzzy-Modell wurde als Optimierungsproblem betrachtet, da Parameterwerte gefunden werden müssen, die das Modell auf Basis vorgegebener Evaluierungskriterien optimieren. Genetische Algorithmen sind stochastische Optimierungsalgorithmen, deren Wirkungsweise und mathematische Operationen an die natürliche Evolution angelehnt sind. Es werden parallel mehrere potentielle Lösungen bewertet. Auf diese Lösungen wird - in Anlehnung an Darwin - 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 usw. Diese Schritte werden solange wiederholt bis entweder die Lösung konvergiert oder eine maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist (siehe Abbildung 2).

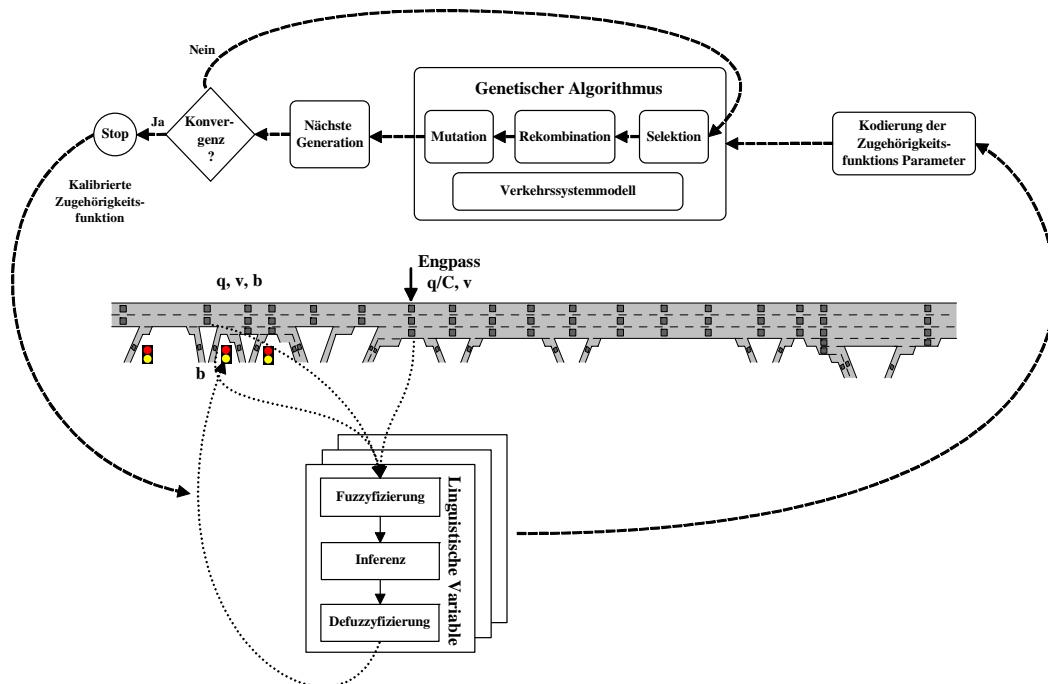


Abbildung 3: Genetische Fuzzy-Zuflussregelung

In ACCEZZ bestimmt der genetische Algorithmus auf Basis einer Zielfunktion die optimal koordinierten Parameter der einzelnen Fuzzy-Zuflussregler. Die Parameter aller Zugehörigkeitsfunktionen der Ein- und Ausgangsgrößen wurden als signifikante Größen der Fuzzy-Regler identifiziert und nur diese werden deshalb während der Optimierung verändert. Das gewählte Vorgehen kann als optimale Interpretation der WENN-DANN Regeln unter den gegebenen Voraussetzungen bezeichnet werden. Für ACCEZZ wurde ein spezielles Verfahren entwickelt, um die Fuzzy-Parameter einer koordinierten Zuflussstrategie in dem für die genetische Optimierung notwendigen Format eines sog. Individuums zu repräsentieren. Hierbei werden nur die Eckpunkte der Polygone bzw. die Abstände der Maxima codiert. Dies erlaubt eine absolut eindeutige Codierung einer Strategie bei gleichzeitiger Minimierung der zu suchenden Parameter.

Als Selektionsverfahren wurde sie sog. Roulettselektion implementiert. Die Individuen werden entsprechend ihrer absoluten "Fitness" aus der Menge der Lösungen pro Iteration (Generation) ausgewählt. Als Fitness wird die Güte der jeweiligen koordinierten Zuflussstrategie bezeichnet. Das Ziel der genetischen Anpassung der Fuzzy-Parameter ist die Minimierung der Gesamtreisezeit im geregelten Verkehrssystem bestehend aus der Reisezeit auf der Hauptfahrbahn und den Wartezeiten auf den dosierten Einfahrten. Diese Gesamtreisezeit wird mit Hilfe des makroskopischen Verkehrsflussmodells METANET und eines deterministischen Wartemodells ermittelt und dient als Gütekriterium zur Beurteilung der jeweiligen Zuflussstrategie. Die Abbildung des gesamten zu steuernden Verkehrssystems in der genetischen Optimierung wird als zweite Koordinierungsstufe bezeichnet. Die Interaktion der Einfahrten, Ausfahrten und der Hauptfahrbahn wird abgebildet und so die optimale Steuerungsstrategie der in Reihe geschalteten dosierten Einfahrten ermittelt. Durch die Verwendung der Gesamtreisezeit als Gütekriterium gehen sowohl die im Normalfall verbesserten Reisezeiten auf der Hauptfahrbahn als auch die zusätzlichen Wartezeiten auf den dosierten Einfahrten in die Bewertung einer Strategie ein. Zu restriktive Dosierungsstrategie der Einfahrten und dadurch entstehende lange Warteschlangen werden während der Optimierung durch eine zusätzliche Abfrage eliminiert. Dieses Vorgehen liefert ein einfaches und nachvollziehbares Gerüst für die interne Simulation und Bewertung einzelner Fuzzy-Strategien. Die Integration dieses Verkehrsmodells garantiert außerdem die beste koordinierte Strategie aller individuellen verkehrsabhängigen Zuflussregler als Ergebnis der genetischen Optimierung. Es werden parallel 30 Lösungen pro Generation ausgewertet und eine maximale Anzahl von 500 Iterationen berechnet.

Durch die Rekombination werden aus zwei Individuen bzw. Parametersets die Nachkommen bzw. neuen Lösungen gebildet. Dies geschieht durch Kombination der Variablenwerte der "Eltern". In ACCEZZ wurde hierfür die intermediäre Rekombination verwendet. Im Anschluß daran erfolgen durch die Mutation zufällige Veränderungen der neuen Individuen. Diese Veränderungen sind meist nur relativ gering und werden mit einer geringen Wahrscheinlichkeit auf die einzelnen Werte der Fuzzy-Parameter einer Lösung angewendet.

Verschiedene Randbedingungen der einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen, wie z.B. die maximale/minimale Zuflussverkehrsstärke, wurden ebenfalls in die genetische Optimierungsprozedur integriert.

Für das nächste Zeitintervall wird eine optimale Lösung ermittelt und implementiert. In ACCEZZ wurden unterschiedliche Prognosehorizonte für die Verkehrsnachfrage getestet wie z.B. eine 15 min- bzw. eine 12 h-Prognose. In der "*genetic fuzzy online*" ACCEZZ-Version wird die Verkehrsnachfrage der letzten 15 Minuten als Prognose für die nächsten 15 Minuten verwendet. Darauf basierend wird eine aktuelle Zuflussstrategie optimiert und anschließend implementiert. In der "*genetic fuzzy offline*" Version wird eine Prognose für einen kompletten 12 h-Tag verwendet und eine koordinierte Fuzzy-Strategie für diesen Tag errechnet. Neben der synthetischen Bewertung mit einem Verkehrssystemmodell innerhalb der Optimierung wurde auch eine Version von ACCEZZ realisiert, die auf einer Implementierung in der Realität und einer anschließenden Bewertung basiert ("*genetic fuzzy reality*"). Hierfür wird ebenfalls eine genetische Optimierungsprozedur gewählt. Die Gesamtreisezeit im System wird jedoch nicht errechnet, sondern real gemessen.

4. Simulative Bewertung

Alle drei ACCEZZ-Versionen, genetic fuzzy online, genetic fuzzy offline, genetic fuzzy reality und die fünf aus der Literatur bekannten Zuflussalgorithmen,

- Demand-Capacity,
- Occupancy Strategy,
- ALINEA,
- Helper Algorithmus,
- Zone Algorithmus,

wurden in dem mikroskopischen Simulationsprogramm AIMSUN2 implementiert und bewertet. Bei der Auswahl der Vergleichsalgorithmen wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass alle Algorithmen bereits in der Realität ihre Effizienz unter Beweis gestellt haben. Außerdem wurde darauf geachtet, dass sowohl verkehrstechnische als auch regelungstechnische Ansätze unterschiedlichen Detaillierungsgrades in der Evaluierung repräsentiert sind. Für die simulativ gestützte Bewertung wurde das sehr hoch belastete 26 km lange Teilstück der A9 von München Richtung Nürnberg ausgewählt (siehe Abbildung 3). Die Verkehrsnachfrage wurde aus dort zahlreich vorhandenen Detektordaten abgeleitet und in die Simulationsumgebung eingearbeitet. Die Daten stammen vom Freitag, den 11.4.1997, an dem auf dieser Autobahn ein typisches Staumuster aufgrund von Überlastungen zu beobachten war. Eine Analyse der Geschwindigkeiten, Verkehrsstärken und Verkehrsdichten (siehe Abbildung 4 links) zeigt, dass an diesem Freitag zwei quasi voneinander unabhängige Staus auftraten. Der erste Stau (ca. 11.00 -13.30 Uhr) wurde durch das typische Pendlerverhalten am Freitagmittag verursacht. Der zweite Stau (ca. 14.00 - 18.00 Uhr) wird durch die enorm hohe Verkehrsnachfrage durch Fern- bzw. Pendlerverkehr am Freitagnachmittag verursacht.

Zur Reduktion der Stauungen wurden Zuflussanlagen an drei bzw. fünf Zufahrten stromaufwärts des Engpasses in verschiedenen Szenarien simuliert. Diese Zufahrten wurden mit den unterschiedlichen Algorithmen gesteuert und das Verhalten des Gesamtsystems bewertet. Es konnte hierbei der Nachweis erbracht werden, dass Zuflussregelung die Verkehrssituation unabhängig vom Steuerungsansatz signifikant verbessert.

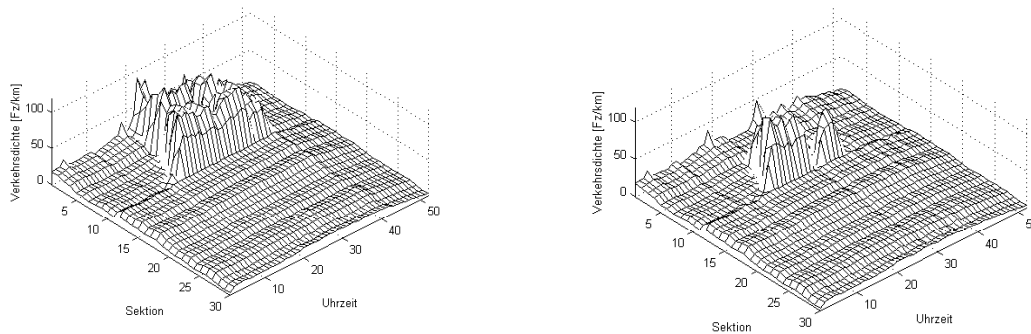


Abbildung 4: Verkehrsdichte - ohne Zuflussregelung (links) und ACCEZZ Genetic Fuzzy Reality mit drei dosierten Einfahrten (rechts)

Schon durch die Dosierung von nur drei Zufahrten mit dem genetic fuzzy reality Algorithmus kann eine enorme Verbesserung der Verkehrsverhältnisse im evaluierten Autobahnabschnitt beobachtet werden. Hierbei wurden die drei Einfahrten mit der höchsten Verkehrsnachfrage dosiert. Die zeitliche und räumliche Ausprägung der Stauungen wurde stark reduziert (siehe Abbildung 4). Geringere Verkehrsdichten ermöglichen höhere Geschwindigkeiten und so verringert sich die Reisezeit für jeden Einzelnen. Der Verlauf der Gesamtreisezeit im System (siehe Abbildung 5) zeigt deutlich, dass alle Zuflussalgorithmen den Verkehrszustand während der Stauzeit (11.00-18.00 Uhr) deutlich verbessern. In dem Zeitraum vor und nach den Stauungen wirkt die Dosierung kaum, da die Verkehrsnachfrage auf den Zufahrten kleiner ist als die Zuflussverkehrsstärke der Lichtsignalanlagen. Durch die intelligente Dosierung von drei Zufahrten während der Stauzeit konnte die Gesamtreeszeit mit ACCEZZ bis zu 24% reduziert werden (siehe Tabelle 2). Auch dies zeigt deutlich, dass der Reisezeitgewinn auf der Hauptfahrbahn weit höher ist als die zusätzlichen Wartezeiten an den Einfahrten. Die maximalen Wartezeiten an den dosierten Zufahrten betragen dabei im Mittel nur etwa 2:10 Minuten. Die ebenfalls analysierten Zuflussalgorithmen ALINEA, Demand-Capacity, Occupancy Strategy, HELPER Algorithmus und Zone Algorithmus konnten die gegebene Situation auch nachhaltig verbessern, erreichten jedoch nicht die Performance der ACCEZZ-Modelle.

Verbesserte Verkehrsverhältnisse mit gleichmäßigeren Geschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn bewirken natürlich auch eine Verringerung des Benzinverbrauchs bzw. der wichtigsten Emissionen (siehe Tabelle 3). An den dosierten Zufahrten kann es lokal natürlich durch ein verändertes Anfahrverhalten bzw. durch die wartenden Fahrzeuge zu einer Verschlech-

terung der Verhältnisse kommen. Der Benzinverbrauch im Gesamtsystem konnte bis zu 29% reduziert werden, NOx sogar bis zu 38%. Auch signifikante CO- und HC-Reduzierungen konnten festgestellt werden.

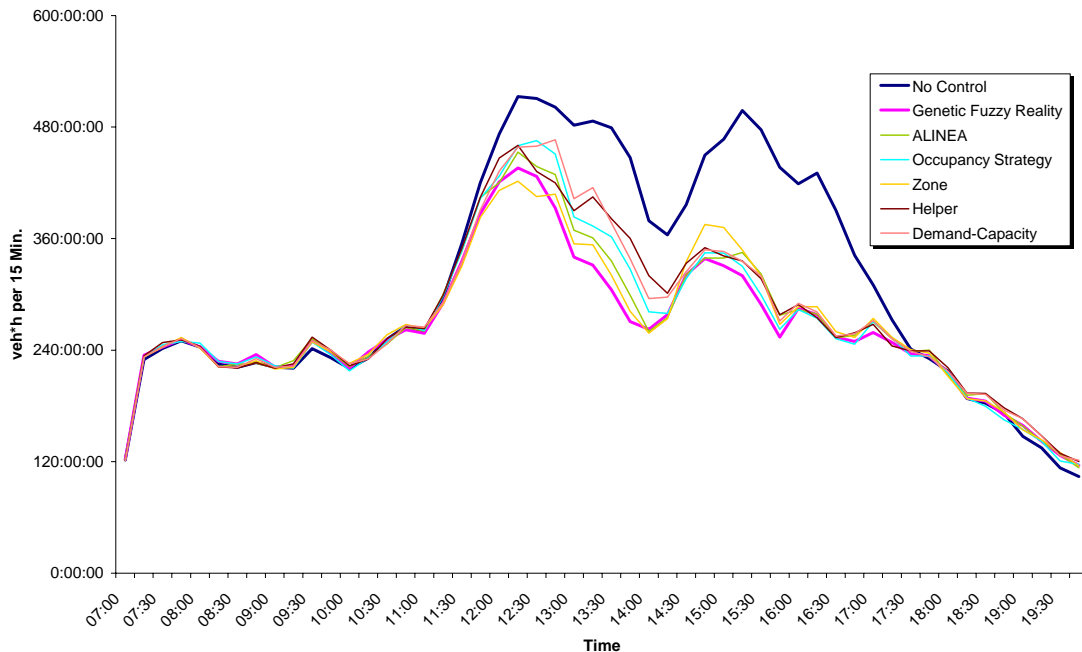


Abbildung 5: Gesamtreisezeit im System - 3 Einfahrten dosiert

Eine ausreichende Anzahl an Simulationen und eine anschließende Sensitivitätsanalyse lassen den Schluß zu, dass alle errechneten Ergebnisse einen stabilen Mittelwert darstellen. Die bei fast allen weltweit installierten Zuflussregelungssystemen beobachtete Reduzierung der Unfälle und der damit verbundene Gewinn an Verkehrssicherheit wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Bei der Simulation von fünf Zufahrten wurden neben den drei höchst belasteten Einfahrten auch zwei BAB-Zufahrten im Bereich eines Autobahnkreuzes dosiert. ACCEZZ reduzierte die Gesamtreisezeit im System um etwa 24% (siehe Tabelle 2). Auf der durchgehenden Hauptfahrbahn stadtauswärts stellen sich hierbei freie Verkehrsverhältnisse ein. Diese zusätzlichen Reisezeitgewinne auf der Hauptfahrbahn werden jedoch durch die Wartezeiten auf den BAB-Einfahrten (maximal 3:30 Minuten) in der Gesamtbetrachtung ausgeglichen. Für das Gesamtsystem kann also mit der Dosierung von nur drei Einfahrten der gleiche Effekt erzielt werden. Benzinverbrauch und Emissionen (siehe Tabelle 3) werden ebenfalls deutlich reduziert. Die langen Wartezeiten führen auch hier dazu, dass kein signifikant positiver Effekt im Vergleich zum 3-Einfahrten Szenario erreicht wird.

ACCEZZ konnte auch in diesem Szenario die besten Ergebnisse erzielen und eindeutig seine Effizienz unter Beweis stellen.

	3 Einfahrten		5-Einfahrten	
	7.00 – 20.00	11.00 – 18.00	7.00 – 20.00	11.00 – 18.00
No Control	100%	100%	100%	100%
HELPER	87%	82%	88%	78%
Demand-Capacity	87%	82%	89%	79%
Occupancy	86%	80%	87%	77%
ALINEA	85%	79%	86%	77%
Zone	85%	78%	87%	77%
Genetic Fuzzy Online	85%	78%	86%	76%
Genetic Fuzzy Offline	83%	76%	86%	76%
Genetic Fuzzy Reality	83%	76%	-	-

Tabelle 2: Gesamtreisezeit im System

	3 Einfahrten				5 Einfahrten			
	11.00 – 18.00				11.00 – 18.00			
	Benzin	NOx	CO	HC	Benzin	NOx	CO	HC
No Control	100%	100%	100	100%	100%	100%	100%	100%
HELPER	76%	70%	74%	78%	77%	72%	72%	79%
Demand-Capacity	73%	65%	71%	75%	74%	64%	72%	74%
Occupancy	75%	69%	74%	77%	74%	68%	75%	78%
ALINEA	73%	66%	72%	75%	74%	67%	73%	75%
Zone	77%	71%	76%	79%	74%	72%	75%	78%
Genetic Fuzzy Online	73%	66%	71%	75%	74%	61%	69%	77%
Genetic Fuzzy Offline	71%	62%	68%	73%	71%	64%	69%	74%

Tabelle 3: Benzinverbrauch und Emissionen

In beiden simulierten Szenarien wurde bei Verwendung von ACCEZZ-Modellen kein Rückstau von der Lichtsignalanlage auf der Einfahrt ins nachgeordnete Netz festgestellt. Dies ist ein weiteres Indiz für eine sehr gut funktionierende genetische Optimierung und dessen internes Verkehrssystemmodell.

5. Ausblick

Zusätzlich zu den dargestellten genetischen ACCEZZ-Ansätzen wurden auch Neuro-Fuzzy-Steuerungsansätze entwickelt und getestet. Die simulative Bewertung ergab auch für diese Algorithmen hervorragende Ergebnisse. Für eine Implementierung in einem real existierendem System erscheinen jedoch die intuitiveren genetischen Ansätze besser geeignet als die z.T. sehr theoretischen Neuro-Fuzzy Modelle.

Im Rahmen des BMBF-Leitprojekts MOBINET werden verschiedene ACCEZZ-Versionen im Sommer 2002 am Mittleren Ring in München im Bereich des sog. Olympiaknotenpunktes installiert und im online-Betrieb getestet. Interessant ist hier nicht nur die Verwendung eines Fuzzy-Regelungsansatzes, sondern auch die Installation von Videodetektion zur Ermittlung der relevanten Verkehrskenngrößen wie z.B. der Warteschlangenlänge auf der Einfahrt.

6. Literaturverzeichnis

Bogenberger, K. (2001). Adaptive Fuzzy Systems for Traffic Responsive and Coordinated Ramp Metering. Dissertation am Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, München, 2001.

Bogenberger, K. and H. Keller (2001). An evolutionary fuzzy system for coordinated and traffic responsive ramp metering. HICSS-34, 34th Annual Hawaiian International Conference on System Sciences, Maui, USA.

Bogenberger, K., H. Keller and S. Vukanovic (2001). A Neuro-Fuzzy Approach for Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering. IEEE, 4th International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2001, Oakland, USA

Bogenberger, K. and A.D. May (1999). Advanced coordinated traffic responsive ramp metering strategies. California PATH Working Paper, UCB-ITS-PWP-99-1, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

FGSV - Arbeitskreis 3.16.15 – Rampenzuflusssteuerung (geplant 2002). Aktuelle Themen.

Haj-Salem, H. and M. Papageorgiou (1995b). Ramp metering impact on urban corridor traffic: field results. *Transportation Research A*, Volume 29A, No. 4.

Jin, W. and M. Zhang (2000). Evaluation of on-ramp control algorithms. University of California at Davis.

Kang, S. and D. Gillen (1999). Assessing the benefits and costs of intelligent transportation systems: ramp meters. California PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-99-19, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Kotsialos, A.; M. Papageorgiou; and A. Messmer (1999). Optimal coordinated and integrated motorway network traffic control. 14th Intern. Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel.

Meldrum, D.R.; C.E. Taylor (1995). Freeway traffic data prediction using artificial neural networks and development of a fuzzy logic ramp metering algorithm. Report No. WA-RD 365.1, Washington State Department of Transportation.

Papageorgiou, M.; H. Hadj-Salem; and J.-M. Blosseville (1991). ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record* 1320.