

## Einsatz von Fuzzy-Control für Verkehrsbeeinflussungsanlagen im Außerortsbereich

FA 3.299

Forschungsstelle: Heusch/Boesefeldt GmbH, Aachen  
 Bearbeiter: Folkerts, G./Kirschfink, H./  
 Weber, R./Zimmermann, H.-J.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn  
 Abschluss: Dezember 2000

### 1. Aufgabenstellung

Die Steuerungsmodelle konventioneller Verkehrsbeeinflussungsanlagen basieren im Wesentlichen auf der Abfrage großer Mengen von Schwellenwerten, die neben den Ergebnissen einer lokalen Verkehrsanalyse auch Anforderungen des Quer- oder Längsabgleichs sowie sicherheitstechnische Belange berücksichtigen müssen. Überlagert werden diese Schwellenwerte mit Hilfe von Priorisierungsregeln, welche die Relevanz jedes zu berücksichtigenden Attributs gewichten. Kommt ein weiteres Attribut hinzu, das mit den jeweils anderen überlagert werden muss, multipliziert sich der Aufwand dementsprechend. Auf Grund dieser Voraussetzungen gestaltet sich die Vorgabe optimaler Schwellenwerte zunehmend schwieriger, vor allem, wenn zusätzlich Umfeldbedingungen, Fahrzeuggruppenklassifizierung oder Sonderprogramme in den Überlagerungsmechanismus einbezogen werden sollen.

Eine Möglichkeit zur Lösung dieser Problematik stellt die Anwendung von Fuzzy-Control für Steuerungsmodelle von Verkehrsbeeinflussungsanlagen dar. Die Steuerung erfolgt mit dieser Technologie mit Hilfe einer Wissensbasis, in der Expertenwissen in Form von Regeln abgelegt ist und mit Methoden der Inferenzbildung verarbeitet wird. Die Berücksichtigung unscharfen Wissens ist mit dieser Methode möglich.

Da bereits einige Pilotanwendungen in Verkehrsbeeinflussungsanlagen vorhanden sind, sollten mit der vorliegenden Untersuchung grundsätzliche Aussagen zur Eignung dieser Technik für Belange der Verkehrssteuerung gewonnen werden. Im Vorfeld wird vermutet, dass unter Verwendung der Fuzzy-Logik eine übersichtliche Programmstruktur und eine Verbesserung bestehender Steuerungsmöglichkeiten erreicht wird. Darauf aufbauend erhofft man sich eine höhere Akzeptanz zukünftiger Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Diese Annahmen galt es, in vorliegender Untersuchung zu verifizieren.

### 2. Untersuchungsmethodik

Die gewählte Untersuchungsmethodik begann mit der Darstellung vorhandener konventioneller und fuzzy-basierter Methoden zur Steuerung des Verkehrs. Die dieser Darstellung zu Grunde liegende Literaturrecherche zeigte Anwendungen aus dem Bereich der Verkehrssteuerung mit Methoden künstlicher Intelligenz auf, gab einen Hinweis auf die Anwendung von Fuzzy-Logik im Bereich der Verkehrssteuerung und beschränkt einen Exkurs zur Verkehrsdatenanalyse mit neuronalen Netzen als Sonderanwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz.

Ziel der darauf aufbauenden Untersuchung war die vergleichende Bewertung des verkehrstechnischen Potenzials des Einsatzes von Fuzzy-Control für Verkehrsbeeinflussungsanlagen im Außerortsbereich relativ zu konventionellen, in der Praxis validierten Steuerungsverfahren. Dieses Potenzial der Fuzzy-Logik wurde insbesondere zur Verbesserung der bisherigen Schwellenwertelogik bei der Ableitung von Steuerungsentscheidungen dargestellt. Durch Abstimmung mit den Betreibern und Entwick-

lern von Verkehrsbeeinflussungssystemen erfolgte eine Validierung der erarbeiteten Ansätze, die für die Akzeptanz eines Einsatzes der Fuzzy-Logik unabdingbar ist.

Daraufhin folgte die Analyse der Unschärfe bestehender Verkehrsleitsysteme, denen bislang durch die Anwendung scharfer Schwellenwerte begegnet wurde. Die Betrachtung der Steuerungsmodelle wurde untergliedert in die Funktionsebenen Messwertaufbereitung und -ersetzung, Verkehrszustandsklassifikation, Störfallerkennung und Generierung von Steuerungsanweisungen. Es wurden die Unvollständigkeit der zu Grunde liegenden Verkehrs- und Umfelddaten sowie die Unsicherheit der darauf aufsetzenden Schlüsse anhand konkreter Problemfälle durchleuchtet und eine mögliche Fuzzyifizierung vorgestellt. Bezogen auf die analysierten Unschärfbereiche wurden mögliche fuzzy-basierte Verfahren zur Lösung der erkannten Problemfälle erarbeitet und deren Potenzial anhand bereits in der Praxis gewonnener Erfahrungen bewertet.

Nach der bis dahin beschrittenen theoretischen Herangehensweise wurden vier Steuerungsanlagen vorgestellt, in denen jeweils eine Komponente mit Fuzzy-Logik realisiert wurde. Bei den Anlagen handelte es sich um

- Streckenbeeinflussungsanlage A9, München-Nord (Störfallerkennung),
- Umsetzbare Stauwarnanlage A9, Gefrees (Störfallerkennung),
- Streckenbeeinflussungsanlage A5, Frankfurt a.M. (Verkehrsfusssharmonisierung) und
- Netzbeeinflussungsanlage A5/A67/A9, Bergstraßenkorridor (Verkehrszustandsklassifikation).

Nach Darstellung der Funktionsweise folgte die Analyse der Ergebnisdaten der fuzzy-basierten und konventionellen Module und deren Bewertung. Es folgten Hinweise zum Nutzenpotenzial implementierter Fuzzy-Komponenten für Verkehrsbeeinflussungsanlagen, woraufhin ein Fazit aus den erzielten Untersuchungsergebnissen gezogen und ein Ausblick für die weitergehende Untersuchung der betrachteten Ansätze gegeben wurde.

### 3. Untersuchungsergebnisse

Die Gegenüberstellung von Fuzzy-Control und Fuzzy-Datenanalyse ergab im Wesentlichen, dass abhängig von den vorliegenden Randbedingungen, beide Verfahren zur Lösung von Unschärfeproblemen von Verkehrsleitsystemen in Frage kommen. Die Fuzzy-Datenanalyse bietet insgesamt den Vorteil, dass Zwischenergebnisse leichter dargestellt werden und damit eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden kann. Fuzzy-Control hingegen arbeitet mit einem geschlossenen Regelkreis, an dessen Ende eine scharfe Ergebnisgröße liegt, die direkt in einen Schaltvorschlag mündet.

Sowohl für die Verkehrszustandsklassifikation als auch die Störfallerkennung konnte anhand der Beispiele aus Literatur und Anwendung festgestellt werden, dass durch die Verwendung von Fuzzy-Logik eine verbesserte Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und eine bessere Anpassung der Darstellung an menschliche Denk- und Ausdrucksweisen erzielt werden kann. Des Weiteren ist es mit dieser Technologie nahezu ausgeschlossen, dass die Veränderung eines Eingangswertes um eine Einheit die Zuordnung eines Verkehrszustandes in eine andere Klasse hervorruft.

Für die Generierung von Steuerungsanweisungen mit Fuzzy-Datenanalyse liegen bislang noch keine Ergebnisse aus der Pra-

vis vor. Da jedoch Verkehrssteuerung durch eine Vielzahl konkurrierender Ziele charakterisiert ist, für die ein Kompromiss gefunden werden muss, bietet die Fuzzy-Logik gegenüber konventionellen Verfahren konzeptionelle Vorteile.

Die Erfahrungen, die mit dem Einsatz von Fuzzy-Control gemacht wurden, zeigten, dass positive Einflüsse auf den Verkehr zu verzeichnen waren. So konnten die Stautunden bei einer Brückensteuerung verringert und für die Steuerung einer Lichtsignalanlage unvollständiges Wissen bei guten Steuerungsergebnissen verwendet werden.

Anhand der Analyse der Daten aus den untersuchten Anlagen konnte festgestellt werden, dass die Fuzzy-Verfahren abhängig von der Verkehrssituation insgesamt sehr unterschiedlich reagieren.

Die schwache Störung, d.h. ein Geschwindigkeitseinbruch auf hohem Geschwindigkeitsniveau, wird durch das in München eingesetzte Fuzzy-Verfahren besser abgebildet als durch das konventionelle; hier bewirkt die zu unterschreitende Grenze von 35 km/h zur Erkennung des Störfalls die mangelnde Zuverlässigkeit des konventionellen Verfahrens für diesen Störungstyp. Die mittlere und starke Störung wird in München durch das konventionelle Verfahren besser abgebildet. Das Fuzzy-basierte springt hier zu stark hin und her und reagiert zudem mit der verspäteten Erkennung des Störfalls.

Die Untersuchung der Daten der in Gefrees eingesetzten Verfahren zur Störfallerkennung erbrachte folgende Ergebnisse: Das eingesetzte Fuzzy-Verfahren reagiert sehr frühzeitig, teilweise vor Beginn des Störfalls, d.h. hier ist mit dem Auftreten von Fehlalarmen zu rechnen. Die Kombination der konventionellen Verfahren reagiert dagegen unzuverlässig, d.h. die aufgetretenen Störfälle werden bis zu 9 Minuten später bzw. gar nicht erkannt. Die konventionellen Verfahren springen bei Veränderung von Eingangsdaten sehr stark hin- und her, d.h. eine darauf basierende Schaltung würde sich ständig aus- und anschalten, was zu einer starken Verminderung der Akzeptanz führen würde. Bei dem fuzzy-basierten Störfallerkennungsverfahren handelt es sich dagegen um ein sich auch bei deutlichen Schwankungen in Verkehrsstärke und Geschwindigkeit ruhig verhaltendes Verfahren, das weniger sensitiv als die konventionellen reagiert.

Es hängt also deutlich von den eingesetzten fuzzy-basierten und konventionellen Verfahren ab, ob ein Vorteil mit dem einen oder dem anderen Verfahren erzielt werden kann.

Beim Vergleich der beiden Verfahren an der A5 kann das fuzzy-basierte als besser bewertet werden als das konventionelle. Wesentliche Kenngrößen dafür sind die höhere durchschnittliche Geschwindigkeit und Verkehrsstärke im betrachteten Abschnitt. Dies ist sicherlich auch damit zu begründen, dass das Fuzzy-Verfahren bei vergleichbarer Verkehrssituation früher reagiert und damit eine angemessenere Reaktion auf die Verkehrssituation für die Schaltung der Geschwindigkeitsbeschränkung bereitstellt. Die Leistungsfähigkeit des Streckenabschnitts liegt damit nach Einführung des Fuzzy-Moduls deutlich höher als vorher. Des Weiteren trat mit Anwendung des Fuzzy-Moduls in den untersuchten Zeiträumen kein völliger Zusammenbruch des Verkehrs mehr auf, d. h.  $q$  und  $v$  fielen nicht mehr auf Null. Dies stellt insbesondere aus Gründen der Verkehrssicherheit einen entscheidenden Aspekt dar, da ein vollkommener Zusammenbruch des Verkehrs ein besonders hohes Sicherheitsrisiko darstellt.

Für die Netzbeeinflussungsanlage Bergstraßenkorridor wurde die erste Stufe der Verkehrszustandsklassifikation untersucht, die jedoch nach vollständiger Implementierung aus mehreren Aggregationsschritten bestehen wird. Dabei konnten sowohl das fuzzy-basierte als auch das konventionelle Verfahren als gleich gut bewertet werden, da sie beide der Verkehrssituation angemessene Klassifikationsergebnisse lieferten. Eine endgültige Bewertung kann erst nach Anwendung der noch fehlenden Aggregationsschritte durchgeführt werden; die Fertigstellung findet jedoch erst nach Abschluss des vorliegenden Forschungsberichtes statt.

#### 4. Folgerungen für die Praxis: Leitfaden für Anlagenbetreiber

Mittels einer Identifikation der Unschärfbereiche in den untersuchten konventionellen Steuerungsalgorithmen und den dafür aufgezeigten Modellierungsmöglichkeiten konnte ein Leitfaden für Anlagenbetreiber entwickelt werden, der Anhaltspunkte für den Einsatz von fuzzy-basierten Verfahren zur Anlagensteuerung gibt. Folgende wesentlichen Ergebnisse sind dort enthalten:

##### **Funktionsebene: Plausibilitätscheck, Messwertersetzung, streckenbezogene Daten, Behandlung von Störgrößen, Verknüpfung von Daten aus unterschiedlichen Quellen**

Mit Fuzzy-Logik modellierbar sind demnach:

- Fahrzeuggruppenunterscheidung,
- Messwertschwankungen,
- Räumliche Datenlücken durch lokale Messwertfassung,
- Störgrößen/Randbedingungen des Verkehrs,
- Starre Obergrenze für maximale Fahrzeuganzahl,
- Abbildung unscharfen Expertenwissens,
- Modellierung nicht erfasster Quellen und Senken,
- Messwertersetzung in Kombination mit Trendextrapolation und Fuzzy-Logik),
- Verkehrszustandsklassifikation auf der Basis fehlender Messwerte,
- Bewertung von Umfeldzuständen,
- Definition von Fangbereichen bei der Datenglättung.

Durch Fuzzy-Modellierung nicht zu beseitigen sind:

- Zeitliche Datenlücken auf Grund Aggregation und Glättung von Daten.

##### **Funktionsebene: Verkehrszustandsklassifikation**

Mit Fuzzy-Logik sind modellierbar:

- Verkehrszustandsbestimmung zwischen Messstellen,
- Fließende Grenzen für die Verkehrszustände.
- Funktionaler Zusammenhang zwischen Messgrößen und Verkehrszustand.

##### **Funktionsebene: Störfallerkennung**

Mit Fuzzy-Logik sind modellierbar:

- Störfallerkennung zwischen Messstellen,
- Variable Schwellenwerte zur Störfallerkennung.

##### **Funktionsebene: Steuerungsanweisungen**

Mit Fuzzy-Logik sind modellierbar:

- Gesetzlich nicht festgelegte Schaltungen,
- Berechnungsmethoden für die Netzbeeinflussung.

Wesentliche Folgerungen für die Praxis ergeben sich darüber hinaus aus der Betrachtung des Nutzenpotenzials, das sich für die Verkehrsharmonisierung an der BAB A 5 auf eine Ersparnis von 20 419 Fahrzeugstunden pro Jahr beziffern lässt. Dieser Wert basiert auf der Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit im betrachteten Abschnitt um einen geringen Wert, von dem jedoch auf Grund der hohen an dieser Strecke vorhandenen Verkehrsstärken viele Fahrzeuge profitieren. Die Erhöhung der Verkehrssicherheit mit dem Einsatz des fuzzy-basierten Harmonisierungsmoduls wird anhand der Tatsache deutlich, dass im Untersuchungszeitraum (13. bis 19.01.1997/konv. bzw. 12. bis 18.01.1998/fuzzy) der Verkehr nach Aktivierung des fuzzy-basierten Tools nicht mehr vollständig zum Erliegen kam, wie dies noch mit dem konventionellen Verfahren der Fall war. Dies deutet des Weiteren auf eine mögliche Verringerung der Unfallzahlen in diesem Bereich hin, was gegenüber der Zeitersparnis als ein deutlich wichtigeres Ergebnis betrachtet werden muss.

Für den Testfall Verkehrsflussharmonisierung BAB A 5 konnte ein bezifferbarer Nutzen ermittelt werden; die Übertragung dieses Ergebnisses auf allgemeine Schlussfolgerungen gestaltet sich jedoch schwierig. Ein wichtiger Punkt ist an dieser Stelle die Tatsache, dass unterschiedliche Funktionsebenen in den Anlagen betrachtet wurden, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert. Zudem ist eine hohe Abhängigkeit der erzielten Ergebnisse von den Randbedingungen vor Ort vorhanden, da die Implementierung der Verfahren auf die jeweilige Anlage zugeschnitten war. Hinzu kommt der Umstand eines weitestgehenden Know-How-Schutzes der jeweiligen Hersteller der Module, so dass dem Forschungsnehmer nicht deren Funktionsweise im Einzelnen sondern in Form einer „Black-Box“ mit Ein- und Ausgangsgrößen bekannt war. Ob also die Eingangsgrößen optimal verarbeitet wurden, konnte als zusätzlicher Aspekt im Rahmen dieser Untersuchung nicht bewertet werden. Am Beispiel der Anlage an der BAB A 9 München-Nord wurde deutlich, dass das Fuzzy-Modul die schwache Störung angemessener beurteilte als die mittlere und starke. Daraus lässt sich ableiten, dass das zu Grunde liegende Wissen bzw. dessen Verarbeitung für die Erkennung einer Verkehrssituation geeigneter

ist als für eine andere. Sich aus dieser Erkenntnis ergebende weitere Forschungen sollten sich mit der Untersuchung getrennter Regelmengen für unterschiedliche Verkehrssituationen befassen.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus einer engen Untersuchung und Gegenüberstellung der Kenngrößen und Ergebnisdaten mit den Eigenschaften der Trassierung, den Witterungsverhältnissen, der Zusammensetzung des Verkehrs und den bisherigen Erfahrungen mit einer bereits bestehenden Verkehrsbeeinflussungsanlage. Dies kann gekoppelt werden mit einer Portierung verschiedener Verfahren auf denselben Untersuchungsort. Insgesamt wird mit der vorliegenden Untersuchung das zuvor vermutete Potenzial der Anwendung von Fuzzy-Logik für die Verkehrssteuerung bestätigt. Eine besondere Eignung zeigt sich vor allem dann, wenn indifferente Verkehrszustände beurteilt werden sollten, die wie im Fall des Harmonisierungsmoduls an der Schwelle zwischen stabilem und instabilem Verkehr liegen. Diese Grenzzustände lassen sich mit einem auf dem Vergleich von Schwellenwerten basierenden konventionellen System schlechter nachbilden. □