Studienarbeit Technische Kybernetik
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Zwei Algorithmen zur Zuflussregelung an Schnellstraßen. Implementation und Vergleich in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

Steffen Waldherr

Oktober 2004

Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik
Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich
Universität Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung **1**

2. Zuflussregelung **3**
2.1. Struktur einer Zuflussregelung 4
2.2. Entwicklung der Zuflussregelung 6
2.3. Steuerungsverfahren 7
2.3.1. Lokale verkehrsabhängige Zuflussregelung 7
2.3.2. Koordinierte verkehrsabhängige Zuflussregelung 8
2.4. ALINEA 9
2.4.1. Erweiterung von ALINEA 11
2.5. Fuzzy–Zuflussregelung 12
2.5.1. Funktionsweise der Fuzzy–Zuflussregelung 12
2.6. Wirkungen der Zuflussregelung 14

3. Simulation des Verkehrsflusses **17**
3.1. Verschiedene Simulationsansätze 17
3.1.1. Makroskopische Verkehrsflusssimulation 17
3.2. Mikroskopische Verkehrsflusssimulation 19
3.2.1. Psycho–physisches Fahrzeugfolgemodell 19
3.2.2. Ergänzungen zum Fahrzeugfolgemodell 20
3.2.3. Randeinflüsse und Konfidenzintervalle 21
3.3. Simulationssoftware VISSIM 22
3.3.1. Elemente des Verkehrsflussmodells 23
3.3.2. Modellierung der Lichtsignalsteuerung 24
3.3.3. Auswertungen des Verkehrsablaufs 24

4. Messung von Verkehrsdaten **27**
4.1. Messungen zur Weiterverarbeitung im Regler 27
4.1.1. Glättung von Messwerten 28
4.1.2. Einschränkungen der Detektoren in VISSIM 29
4.1.3. Auslesen der Detektoren im VAP-Programm 30
4.1.4. Detektormessungen bei ALINEA 31
4.1.5. Detektormessungen für die Fuzzy–Zuflussregelung 31
4.2. Ausgaben zur Bewertung des Regelverfahrens 33
4.3. Messungen zur Bewertung des Verkehrsablaufs 34

4.3.1. Die Reisezeit als Qualitätsmaß 34
4.3.2. Reisezeitmessung in VISSIM 34
4.3.3. Auswertung der Reisezeitmessung 36
4.3.4. Messung der Rückstaulänge 36

5. Implementation des Simulationsmodells und der Regelung 39
5.1. Aufbau des betrachteten Straßennetzes 39
5.2. Definition der getesteten Szenarien 40
5.2.1. Szenario Standardbelastung 41
5.2.2. Szenario Kapazitätsauslastung 41
5.2.3. Szenario Störfall 42
5.3. Implementation der Regelverfahren 42
5.3.1. Zuflussregelung als VAP–Programm 42
5.3.2. ALINEA–Zuflussregelung 43
5.3.3. Fuzzy–Zuflussregelung 44
5.4. Durchführung der Simulation 44

6. Auswertungen und Vergleich 47
6.1. Methodik der Auswertung 47
6.2. Ergebnisse der einzelnen Szenarien 47
6.2.1. Ergebnisse des Szenarios Standardbelastung 47
6.2.2. Ergebnisse des Szenarios Kapazitätsauslastung 49
6.2.3. Ergebnisse des Störfall–Szenarios 53
6.3. Bewertung der Ergebnisse 56
6.3.1. Wirksamkeit der Zuflussregelung 56
6.3.2. Vergleich der verwendeten Regelverfahren 57

7. Fazit 59

A. Grundlagen der Fuzzy–Methoden 61

B. Regelungstechnisches Glossar 63

Literaturverzeichnis 65

Tabellenverzeichnis

2.1. Wissensbasis des Fuzzy–Zuflussreglers 13

4.1. Messgrößen für die Fuzzy–Zuflussregelung 32

5.1. Verkehrsnachfrage im Szenario Kapazitätsauslastung 41
5.2. Umlauf des Signalgebers zur Zuflussregelung 42
5.3. Verwendete Verfahren für die Zuflussregelung 46

6.1. Ergebnisse des Szenarios Standardbelastung 48
6.2. Ergebnisse des Szenarios Kapazitätsauslastung 50
6.3. Ergebnisse des Störfall–Szenarios 54
6.4. Mittlere Dauer der Verkehrsstörung im Störfall–Szenario 54

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schematische Skizze einer zuflussgeregelten Einfahrt 3
2.2. Anlage zur Zuflussregelung auf der A13 bei Delft-Zuid (NL) 4
2.3. Blockstruktur einer Zuflussregelung 5
2.4. Grafische Darstellung des ALINEA–Verfahrens 10
2.5. Sprungantworten eines verrauschten Systems für verschiedene Reglertypen 11

3.1. Fahrbereiche des Fahrzeugfolgemodells nach Wiedemann [Wie74] 20
3.2. Einfluss von Nachbarfahrzeugen in VISSIM [PTV03a] 23

4.1. z–Übertragungsfunktion der exponentiellen Glättung 29
4.2. Messpunkte für die Fuzzy–Zuflussregelung 32
4.3. Reisezeitmessungen an der Anschlussstelle 35

5.1. Untersuchtes Verkehrsnetz als VISSIM–Streckenmodell 40
5.2. Unscharfe Mengen für den Fuzzy–Zuflussregler 45

6.1. Zulässige Zuflussrate für das Szenario Standardbelastung 49
6.2. Reisegeschwindigkeit auf der Schnellstraße im Szenario Kapazitätsauslastung 51
6.3. Maximale Rückstaulängen im Szenario Kapazitätsauslastung 52
6.4. Belegungsgrad stromabwärts bei ALINEA–Zuflussregelung 53
6.5. Reisegeschwindigkeit auf der Schnellstraße im Störfall–Szenario 55

A.1. Fuzzyfizierung einer numerischen Größe 62

1. Einführung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Zuflussregelung an Schnellstraßeneinfahrten. Das Schnellstraßennetz ist bei dem heutigen Verkehrsaufkommen stellenweise hoch belastet, Staus führen immer wieder zu immensen Zeitverlusten für viele Verkehrsteilnehmer. Durch eine Zuflussregelung lässt sich im Bereich von Anschlussstellen des Ausmaß von Verkehrsstörungen reduzieren. Damit soll die Leistungsfähigkeit des Schnellstraßennetzes erhöht und für die Verkehrsteilnehmer ein im Mittel verbesserter Verkehrsablauf gewährleistet werden.

Für die Zuflussregelung existieren mehrere Regelverfahren, die aus der aktuellen Verkehrssituation dynamisch eine geeignete Zuflussrate bestimmen. Bei der Errichtung einer Zuflussregelungsanlage muss eines dieser Verfahren ausgewählt und implementiert werden.

In dieser Arbeit werden zwei aktuelle Verfahren zur Zuflussregelung untersucht. Eines dieser Verfahren, ALINEA, stammt aus der klassischen Regelungstheorie, während das andere, der Fuzzy–Zuflussregler nach Bogenberger, Soft–Computing–Methoden für die Zuflussregelung verwendet. In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Zuflussregelung sowie die beiden untersuchten Verfahren beschrieben.

Beide Verfahren wurden in VISSIM, einer Software für mikroskopische Verkehrsflusssimulation, an einer fiktiven Schnellstraßeneinfahrt implementiert. Anhand mehrerer unterschiedlicher Szenarien für die Verkehrssituation im betrachteten Verkehrsnetz wurden die Zuflussregelungsverfahren in der Simulation getestet. Die Kapitel 3 bis 5 erläutern die Grundlagen der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, die verwendeten Methoden, um die benötigten Verkehrsdaten zu bestimmen sowie Vorgehen beim Aufbau des betrachteten Verkehrsnetzes und der Implementation der Regelverfahren.

Mit den Ergebnissen aus den Simulationen konnten die beiden Regelstrategien untereinander und mit dem ungeregelten Fall verglichen werden. Diese Ergebnisse und deren Bewertung finden sich in Kapitel 6.

2. Zuflussregelung

Unter Zuflussregelung versteht man die Begrenzung des Verkehrsflusses an einer Schnellstraßeneinfahrt auf einen maximalen Wert. Dies geschieht durch einen Lichtsignalgeber, der je Grünzeit ein Fahrzeug passieren lässt. Abb. 2.1 zeigt eine schematische Skizze der örtlichen Gegebenheiten der Einfahrtsrampe mit einer Anlage zur Zuflussregelung. Abb. 2.2 auf der nächsten Seite zeigt ein Foto [1] einer solchen Anlage an einer zweispurigen Einfahrt.

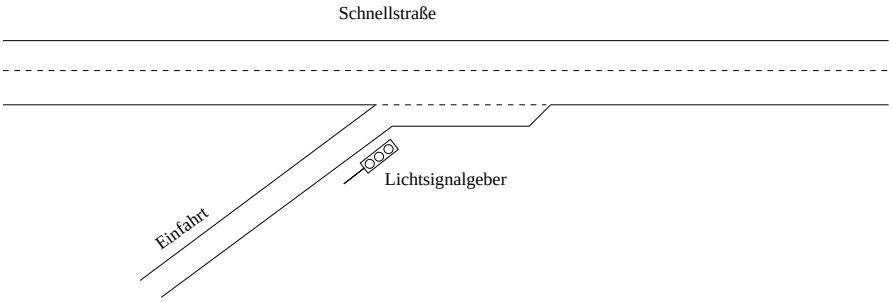


Abbildung 2.1.: Schematische Skizze einer zuflussgeregelten Einfahrt

Durch Variation der Rotzeit an der Lichtsignalanlage lässt sich der maximale Verkehrsfluss verändern. Die Grünzeit wird konstant gehalten, um jeweils einem Fahrzeug die Überfahrt zu ermöglichen. Da die heutigen Steuergeräte für Lichtsignalanlagen nur Schaltzeiten im Sekundentakt zulassen, lässt sich der Verkehrsfluss nur auf diskrete Werte einstellen. In Abhängigkeit von der Umlaufzeit T_U lässt sich die zulässige Zuflussrate r mit folgender Formel berechnen:

$$r = \frac{1 \text{ Fhz}}{T_U} \tag{2.1}$$

Es gab auch verschiedene Ansätze, mehrere Fahrzeuge je Grünzeit passieren zu lassen, allerdings geht dadurch der Effekt der Pulkzerstückelung (Abschnitt 2.6 auf Seite 14) verloren. Sinn macht dieser Ansatz nur, wenn man sehr hohe Verkehrsstärken zulassen will, da die Umlaufzeit T_U durch verschiedene Randbedingungen nach unten begrenzt ist. Es gibt damit einen Bereich zwischen dem Zeitbedarfswert von ca. $1,8\ s$ und einer

[1] Bildquelle: `http://lcewww.et.tudelft.nl/~crweb/research/node20.html`

Abbildung 2.2.: Anlage zur Zuflussregelung auf der A13 bei Delft-Zuid (NL)

minimalen Umlaufzeit[2] von beispielsweise $4s$, für den die entsprechende Zuflussrate mit einer Ein–Fahrzeug–pro–Grün Regelung nicht eingestellt werden kann. In dieser Arbeit wird die Verkehrsnachfrage über die Einfahrtsrampe gering genug angenommen, dass mit einer Ein–Fahrzeug–pro–Grün Regelung gearbeitet werden kann, was für die meisten Anschlussstellen auch zutrifft.

Mit einer Zuflussregelung werden verschiedene Ziele verfolgt [ST01]:

1. Verbesserung der Verkehrsqualität auf der Schnellstraße durch Reduktion der Reisezeit.
2. Erhöhung der Verkehrssicherheit
3. Bessere Kapazitäts–Ausnutzung der Schnellstraße

Im Rahmen dieser Arbeit sollen nur die Punkte 1 und 3 untersucht werden, da die Verkehrssicherheit in einer mikroskopischen Simulation nicht gut ermittelt werden kann.

2.1. Struktur einer Zuflussregelung

Aufgrund der Vielzahl an Steuerungsverfahren kann eine allgemeingültige Regelkreisstruktur nur sehr vereinfacht dargestellt werden. Dennoch hilft es dabei, einige grundlegende Konzepte der Zuflussregelung zu verstehen.

Die Struktur einer Zuflussregelung, wie sie der Autor versteht, ist in Abb. 2.3 auf der nächsten Seite dargestellt. Als übergeordnete Regelgröße kann man in den meisten Fällen

[2] siehe dazu Abschnitt 5.3.1 auf Seite 42

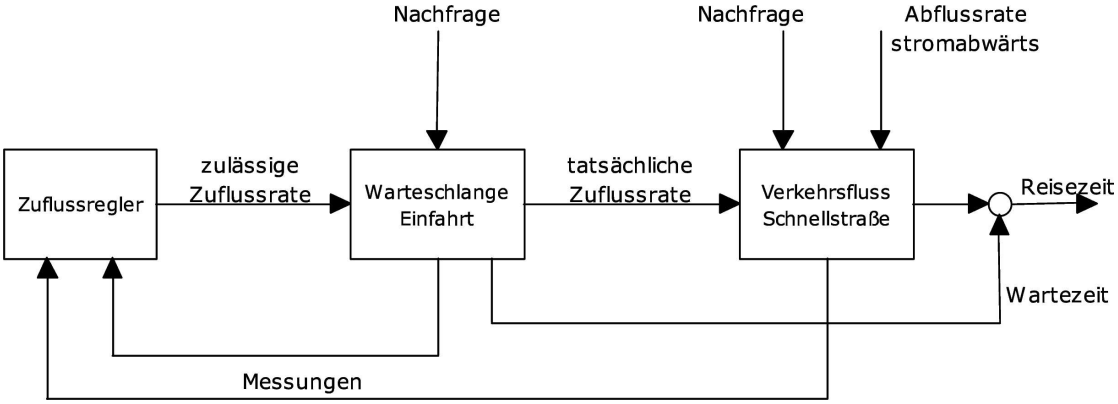


Abbildung 2.3.: Blockstruktur einer Zuflussregelung

die Gesamtreisezeit im untersuchten System betrachten, die auf einen von den lokalen Gegebenheiten und der aktuellen Verkehrsnachfrage abhängigen wünschenswerten Idealwert gebracht werden soll.

Die Gesamtreisezeit, die sich aus der Reisezeit auf der Schnellstraße und der Wartezeit an der Einfahrt zusammensetzt, ist ein üblicher Wert zur Beschreibung der Qualität des Verkehrsablaufs. Cremer und Fleischmann schlagen sie in [CF87] als Gütekriterium vor, wobei sie eine evtl. unterschiedliche Gewichtung von Wartezeit und Reisezeit auf der Schnellstraße vorsehen. Bogenberger verwendet die Gesamtreisezeit als Fitnessfunktion für die Optimierung der Parameter seiner Regelstrategie mit genetischen Algorithmen [Bog02].

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Reisezeit entlang der Schnellstraße und die Wartezeit an der Einfahrt gleich gewichtet in die Gesamtreisezeit eingehen. Je nach politischen Vorgaben ist es natürlich denkbar, einen Wert stärker zu gewichten als den anderen und so entweder den Verkehr entlang der Schnellstraße oder den über die Einfahrt etwas zu bevorzugen. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass eine Zuflussregelung an sich immer eine Bevorzugung der Schnellstraße bedeutet, so dass eine Gleichbewertung für die Gesamtreisezeit durchaus Sinn macht.

Die Regelstrecke setzt sich hier aus der Warteschlange an der Einfahrt und dem Verkehrsfluss auf der Schnellstraße zusammen. Für beide Blöcke existieren Modellierungen: Die Warteschlange kann als M/D/1 Warte–Bedien–System betrachtet werden, wobei die Bedienzeit durch die Zuflussregelung vorgegeben wird. Das Cremer–Modell [Cre79] als makroskopisches Verkehrsflussmodell ist eine Möglichkeit, die dynamischen Vorgänge auf der Schnellstraße zu beschreiben. Diese Modelle können verwendet werden, um modellbasierte Zuflussregler zu entwerfen. Leider arbeiten die klassischen Methoden der Regelungstechnik mit anderen Modellen und Regelkreisstrukturen, so dass sich diese Methoden nicht einfach anwenden lassen.

Für das System relevante Eingangsgrößen sind die Verkehrsnachfrage über die Schnellstraße und über die Einfahrt. Falls der aktuelle Verkehrszustand im labilen Bereich des Fundamentaldiagramms liegt, wird auch noch die Abflussrate stromabwärts der betrachteten Anschlussstelle relevant. Dieser Effekt ist jedoch in einer mikroskopischen Simulation nur schwer abzubilden.

Die üblichen Messgrößen sind Verkehrsstärke, Belegung und Geschwindigkeit, die an mehreren Stellen in der Umgebung der Anschlussstelle gemessen werden können. Dies lässt sich unterteilen in die Orte an der Einfahrtsrampe und stromaufwärts bzw. stromabwärts auf der Schnellstraße. Anhand dieser Messungen berechnet die Zuflussregelung eine zulässige Zuflussrate, die auf die Anlage geschaltet wird.

Im regelungstechnischen Verständnis sind die beiden Nachfragewerte Störgrößen, die zulässige Zuflussrate ist die Steuergröße. Im Unterschied zu einem üblichen Regelkreis fällt auf, dass die betrachtete Regelgröße mit dem heutigen Stand der Verkehrstechnik nicht direkt zurückgeführt werden kann: Es gibt in der Praxis keine Online–Messverfahren für die Reisezeit. Aus diesem Grund existieren einige Zuflussregelungsverfahren wie z.B. ALINEA (Abschnitt 2.4 auf Seite 9), die direkt die Belegung oder eine andere messbare Kenngröße des Verkehrszustandes auf der Schnellstraße als Regelgröße betrachten. Über diesen Wert lassen sich dann zumindest qualitative Rückschlüsse auf die Verkehrssituation und die benötigte Reisezeit im Bereich der Anschlussstelle ziehen. Dennoch ist das Halten eines bestimmten Wertes im Verkehrszustand nicht das eigentliche Ziel einer Zuflussregelung, sondern nur ein Mittel zur Reduktion der Reisezeit.

2.2. Entwicklung der Zuflussregelung

In den frühen 1960er Jahren wurden die ersten Anlagen zur Zuflussregelung im Osten der USA errichtet. Das verwendete Steuerungsverfahren war eine tageszeitabhängige Festzeitsteuerung (Abschnitt 2.3.1 auf der nächsten Seite).

Die erste Anlage zur verkehrsabhängigen Zuflussregelung wurde 1963 auf dem Eisenhower Expressway in Chicago installiert [Weg99, Bog01]. Bis Anfang der 70er Jahre fanden sie weitere Verbreitung in den USA und Kanada. Zu dieser Zeit wurden auch die ersten koordinierten verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren eingesetzt (Abschnitt 2.3.2 auf Seite 8).

In Europa installierte man Mitte der 1970er Jahre Anlagen zur Zuflussregelung. In Deutschland wurde 1976 an der Anschlussstelle Bonn/Siegburg auf der A3 eine Anlage in Betrieb genommen, die jedoch wegen Problemen mit der Steuerlogik wieder abgebaut werden musste [Weg99]. In den 1990er Jahren gab es verschiedene Forschungsprojekte zur Zuflussregelung. Dabei wurden z.B. in Paris, Amsterdam, Edinburgh und Birmingham entsprechende Anlagen in Betrieb genommen [Bog01]. Im Zusammenhang damit wurde auch der von M. Papageorgiou u.a. entwickelte ALINEA–Algorithmus am Boulevard Périphérique in Paris getestet [PHSM97].

2.3. Steuerungsverfahren

In diesem Abschnitt werden verschiedene Verfahren zur Zuflussregelung kurz vorgestellt. Sie werden in dieser Arbeit nicht weiter untersucht und sind nur als Hintergrundinformation aufgeführt. Die in dieser Arbeit verwendeten Algorithmen, ALINEA und die Fuzzy–Zuflussregelung nach Bogenberger, werden in den Abschnitten 2.4 und 2.5 beschrieben.

Eine genauere Beschreibung der einzelnen Verfahren findet man in einem vom BMVBW herausgegebenen Forschungsbericht [ST01] oder bei Bogenberger [Bog01].

2.3.1. Lokale verkehrsabhängige Zuflussregelung

Bei der lokalen Zuflussregelung wird nur eine Schnellstraßeneinfahrt betrachtet, d.h. nur die Verkehrsdaten aus der direkten Umgebung der Einfahrt werden für die Steuerung benutzt.

Festzeitsteuerung

Hierbei handelt es sich um eine Steuerung, die auf historischen Verkehrsdaten beruht. Bereits in der Planung wird anhand von Zähldaten eine evtl. tageszeitabhängige Umlaufzeit für die Lichtsignalanlage festgelegt.

Da mit diesem Verfahren keine Reaktion auf die aktuelle Verkehrssituation möglich ist, wird die Qualität des Verkehrsablaufs bei veränderter Kapazität oder Nachfrage nicht verbessert.

Nachfrage–Kapazitäts–Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die Verkehrsstärke stromaufwärts der Einfahrt mit der Kapazität stromabwärts verglichen. Die Differenz passt noch auf die Straße und wird über die Einfahrt zugelassen. Da die Rampe nicht komplett gesperrt werden soll, gibt es eine minimale Zuflussrate, welche der Algorithmus noch erlaubt.

Als Steuerungsalgorithmus ergibt sich

$$r = C - q_{\text{in}}; \qquad r \geq r_{min} \tag{2.2}$$

mit

r zulässige Verkehrsstärke über die Einfahrt

C Kapazität stromabwärts der Anschlussstelle

q_{in} gemessene Verkehrsstärke stromaufwärts der Anschlussstelle

r_{min} minimale Zuflussrate über die Einfahrt

Da die Verkehrsstärke den Zustand des Verkehrsflusses nicht eindeutig beschreibt, wird manchmal noch der Belegungsgrad oder die lokale Geschwindigkeit verwendet, um bei labilem Verkehrszustand auf der Schnellstraße die Zuflussregelungsanlage auf die minimale Zuflussrate einzustellen.

Im regelungstechnischen Verständnis entspricht dieses Verfahren einer Störgrößenaufschaltung für die in Abschnitt 2.1 beschriebene Regelkreisstruktur.

Belegungs–Verfahren

Das Belegungs–Verfahren beruht auf der gleichen Idee wie das Nachfrage–Kapazitäts–Verfahren. Es verwendet jedoch eine andere Methode, um die aktuelle Verkehrsstärke zu ermitteln.

Die Verkehrsstärke wird bei diesem Algorithmus in Abhängigkeit von der gemessenen Belegung geschätzt. Hierfür ist eine Kalibrierung an jedem Einsatzort notwendig. Aus der Menge an einstellbaren Zuflussraten wird dann eine ausgewählt, wobei die Auswahl ähnlich wie im Nachfrage–Kapazitäts–Verfahren getroffen wird.

RE–Strategie [ST01]

Die RE–Strategie wurde im Rahmen eines Projektes zur Zuflussregelung an der A40 in Nordrhein–Westfalen entwickelt, dessen Pilotanlage 1999 eröffnet wurde.

Der Algorithmus kann entweder aktuell gemessene oder Prognosewerte für die lokale Verkehrsstärke und –dichte verwenden. Es werden jeweils Schwellwerte festgelegt, bei deren Überschreiten die zulässige Zuflussrate auf den nächstkleineren Wert verringert wird. Hierbei wird das Minimum der berechneten Zuflussraten aus den beiden Kriterien Verkehrsstärke und –dichte verwendet. Zur Vermeidung von häufigem Umschalten wird eine Hysterese verwendet.

2.3.2. Koordinierte verkehrsabhängige Zuflussregelung

Bei der koordinierten Zuflussregelung wird ein längerer Schnellstraßenabschnitt zusammen mit mehreren Einfahrten als ein System betrachtet. Einige der Einfahrten sollten mit Anlagen zur Zuflussregelung ausgestattet sein, dies müssen jedoch nicht notwendigerweise alle sein. Die Idee der koordinierten Zuflussregelung ist dabei, aus einer Betrachtung des Gesamtsystems optimale Zuflussraten an den geregelten Einfahrten einzustellen. Ein damit erreichbares Ziel ist etwa das Freihalten von Kapazitäten auf der Schnellstraße für eine weiter stromabwärts liegende, stark nachgefragte Einfahrt. Dieses Ziel wäre mit nur lokaler Zuflussregelung an jeder einzelnen Einfahrt nicht zu erreichen.

Nach Zhang und Jin[3] werden drei Formen der koordinierten Zuflussregelung unterschieden:

Kooperative Zuflussregelung Eine zulässige Zuflussrate wird in erster Linie anhand eines lokalen Algorithmus berechnet und dann abhängig vom Zustand des Gesamtsystems noch leicht verändert.

Kompetitive Zuflussregelung Für jede Einfahrt werden zwei zulässige Zuflussraten berechnet: Eine aus dem lokalen Verkehrszustand und eine aus den systemweiten Erfordernissen. Dann wird die restriktivere der beiden angewandt.

Integrale Zuflussregelung Der Algorithmus berechnet die zulässige Zuflussrate direkt aus dem lokalen und dem systemweiten Verkehrszustand.

Für jede der drei Formen existieren mehrere Algorithmen, die etwa bei Bogenberger [Bog01] nachgelesen werden können.

2.4. ALINEA

Der ALINEA–Algorithmus wurde erstmals Ende der 1980er Jahre von Papageorgiou und anderen vorgestellt und in den 90er Jahren in Paris und Amsterdam implementiert und getestet. Die Ergebnisse dieser Tests finden sich in einem von Papageorgiou u.a. veröffentlichten Artikel [PHSM97].

Der Algorithmus zielt auf eine Regelung des Belegungsgrades stromabwärts der Einfahrt, um durch Erreichen eines optimalen Wertes die Reisezeit zu minimieren. Dieser optimale Wert kann dabei durch die örtlichen Gegebenheiten oder aus Systembetrachtungen bei einer koordinierten Zuflussregelung bestimmt werden. Ein typischer Wert ist ca. $0,25$.

Abbildung 2.4 auf der nächsten Seite zeigt eine skizzenhafte Darstellung der Regelstrategie des ALINEA–Verfahrens.

Dem Berechnungsverfahren liegt dabei ein I–Regler zugrunde. Die Berechnung erfolgt zu diskreten Zeitpunkten k, mit einem wählbaren festen Zeitabstand von z.B. 1 min. ALINEA benötigt dafür zwei Messgrößen:

$o_{ab}(k)$ Belegungsgrad stromabwärts zum Zeitpunkt k in %.

$r(k-1)$ Verkehrsfluss über die Einfahrt im Zeitraum $k-1$ bis k.

Die Berechnung der zulässigen Zuflussrate erfolgt dann mit der Formel

$$r(k) = r(k-1) + K_R\,(\hat{o} - o_{\mathrm{ab}}(k)) \tag{2.3}$$

Hierbei ist

[3] Jin, W. und Zhang, M.: Evaluation of on-ramp control algorithms. University of California at Davis, 2000.

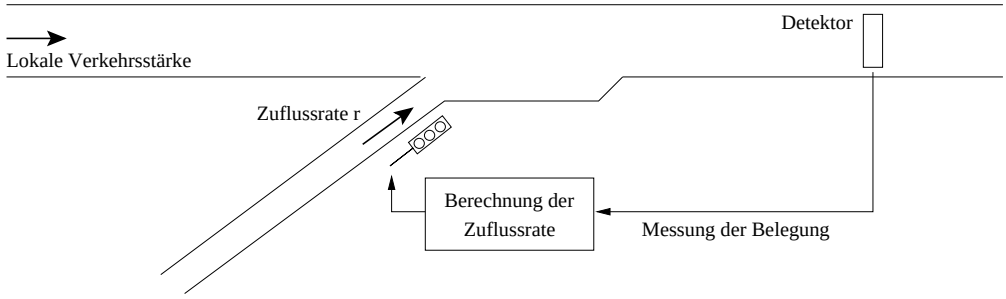


Abbildung 2.4.: Grafische Darstellung des ALINEA–Verfahrens

$r(k)$ die zulässige Zuflussrate für den Zeitraum k bis $k+1$

K_R ein vom Benutzer wählbarer Regelparameter

$\hat{o}$ der Sollwert für die Belegung stromabwärts in %.

Nach Papageorgiou reagiert ALINEA wenig sensitiv auf die Wahl des Regelparameters K_R. Für die meisten Anlagen scheint ein Wert von $K_R = 70\ \frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ gute Ergebnisse zu bringen [PHSM97].

Im Gegensatz zu einem üblichen I–Regler sollte hier der Wert $r(k-1)$ gemessen werden, da die tatsächliche Zuflussrate nicht unbedingt gleich der zulässigen Zuflussrate ist.

Papageorgiou stellte fest, dass bei konstanter Verkehrsnachfrage ALINEA asymptotisch zum Gleichgewichtszustand $o_{\text{ab}}(k) = \hat{o}$ führt, solange dieser Wert noch nicht alleine durch die Verkehrsnachfrage über die Schnellstraße überschritten wird [PHSM97].

Die Untersuchungen von Papageorgiou ergaben mehrere Vorzüge von ALINEA:

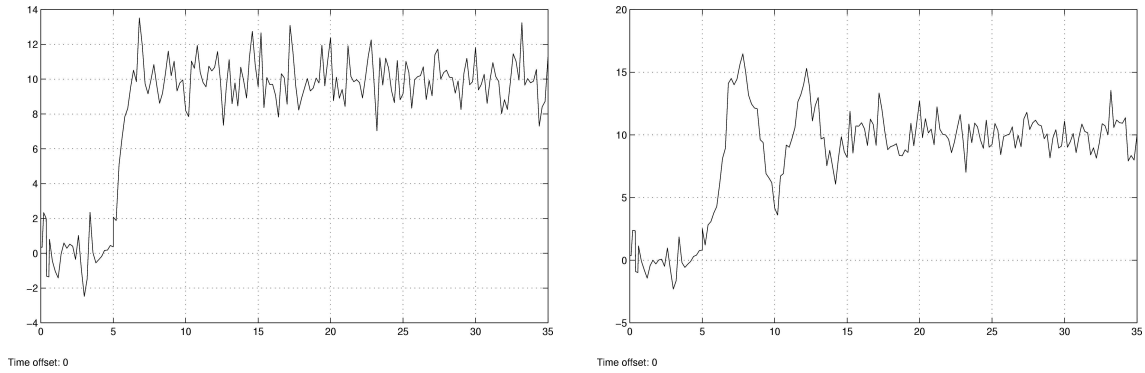
- Die Anwendung von ALINEA verbessert den Verkehrsablauf deutlich. Dabei ist ALINEA anderen Verfahren wie z.B. der Nachfrage–Kapazitäts–Strategie überlegen.
- ALINEA ist sehr einfach und günstig zu implementieren, da für das Regelgesetz nur eine einfache Berechnung durchgeführt werden muss und nur zwei Detektoren benötigt werden.
- Durch die schwache Sensitivität bezogen auf den Parameter K_R ist ALINEA ohne Kalibrierung auf den Einzelfall anwendbar. Die Wahl eines Sollwertes $\hat{o}$ macht das Verfahren flexibel.

Für eine erfolgreiche Implementation sollten jedoch noch weitere Randbedingugen vorgegeben werden, die über die einfache Berechnungsformel (2.3) hinausgehen [Fri04b, S. 202]. Im Kapitel 5, in dem es um die Implementation der zu vergleichenden Algorithmen geht, wird darauf noch näher eingegangen.

Ein koordiniertes ALINEA–Verfahren ist METALINE [PHSM97], bei dem die Zuflussraten vektoriell für mehrere Einfahrten berechnet werden. Der Parameter K_R ist dann eine Matrix der entsprechenden Dimension.

2.4.1. Erweiterung von ALINEA

Eine mögliche Erweiterung des ALINEA–Algorithmus ist der Übergang von einem reinen I–Regler zu einem PI–Regler. Da ein PI–Regler für die meisten Systeme weniger zum Überschwingen neigt, besteht die Hoffnung, dass dadurch ein schnelleres Reagieren auf Änderungen in der Verkehrssituation möglich ist. Die Motivation für diese Erweiterung liefert Abbildung 2.5, in welcher der Ausgang eines PI–geregelten Systems bei einer sprunghaften Änderung einem I–geregelten System gegenübergestellt wird. Man erkennt, dass der PI–Regler wesentlich schneller auf den neuen stationären Wert einschwingt.



(a) PI–Regler (b) I–Regler

Abbildung 2.5.: Sprungantworten eines verrauschten Systems für verschiedene Reglertypen

Im Folgenden wird die Abweichung der Belegung stromabwärts vom Sollwert mit $e(k) = \hat{o} - o_{\mathrm{ab}}(k)$ bezeichnet. Der Einfachheit halber soll für die Herleitung eines PI–Regelgesetzes angenommen werden, dass die tatsächliche Zuflussrate gleich der zulässigen Zuflussrate sei. In der Implementation kann diese Vereinfachung dann wieder rückgängig gemacht werden.

Die Z–Transformation [Föl00] der ALINEA–Berechnungsvorschrift (2.3) liefert dann

$$R(z) = K_R \, \frac{z}{z-1} \, E(z) \tag{2.4}$$

wobei $R(z)$ und $E(z)$ die Z–Transformierten der Folgen $r(k)$ bzw. $e(k)$ sind.

Die Übertragungsfunktion $K_1(z) = K_R \frac{z}{z-1}$ entspricht einem zeitdiskreten I–Glied. Für ein zeitdiskretes PI–Glied wird diese Funktion erweitert zu

$$K_2(z) = K_R \frac{z}{z-1} + K_P \tag{2.5}$$

womit ein weiterer Reglerparameter K_P eingeführt wird.

Die Z–Rücktransformation der Übertragungsfunktion $K_2(z)$ liefert die Formel für den erweiterten ALINEA–Algorithmus:

$$r(k) = r(k-1) + K_R e(k) + K_P \left(e(k) - e(k-1)\right) \tag{2.6}$$

Hierbei sollte K_R etwas kleiner gewählt werden als bei einem reinen ALINEA–Regler, um die Korrektur von $r(k)$ in jedem Berechnungsintervall durch die Summe aus P– und I–Teil nicht zu groß werden zu lassen.

Eine Bewertung des erweiterten ALINEA–Algorithmus im Vergleich zum ursprünglichen Verfahren ist in Kapitel 6 zu finden. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass diese Erweiterung Verbesserungen bringt, falls nicht das — in der Verkehrstechnik relativ hohe — Systemrauschen das Überschwingen der I–geregelten Strecke übertönt.

2.5. Fuzzy–Zuflussregelung

Bei der Fuzzy–Zuflussregelung nach Bogenberger [Bog01, Bog02] an einer einzelnen Einfahrt wird ein Algorithmus verwendet, der anhand mehrerer gemessener Verkehrsgrößen mit Fuzzy–Methoden eine zulässige Zuflussrate berechnet. Dieser Algorithmus ist anhand der üblichen Struktur eines Fuzzy–Reglers aufgebaut, wie sie etwa Zimmermann in [Zim93] beschreibt. Diese Grundlagen sind in Anhang A auf Seite 61 beschrieben, der nächste Abschnitt erläutert direkt die Umsetzung dieser Methoden für eine Zuflussregelung.

2.5.1. Funktionsweise der Fuzzy–Zuflussregelung

Bogenberger verwendet 7 Eingangsgrößen für den Fuzzy–Zuflussregler: Zur Beschreibung der Verkehrssituation auf der Schnellstraße werden die Geschwindigkeit, die Verkehrsstärke und der Belegungsgrad etwas stromaufwärts der Zufahrt gemessen. Für diese Position wird der Begriff der *lokalen* Messung verwendet. Zu Beginn der Einfahrt und an der Haltelinie für den Lichtsignalgeber werden die Belegungsgrade detektiert. Die Messung dieser Werte erlauben der Zuflussregelung, bei einer langen Warteschlange eine höhere Zuflussrate zuzulassen und somit einen Rückstau in das nachgeordnete Netz zu vermeiden.

Stromabwärts der Anschlussstelle werden die Geschwindigkeit und die Verkehrsstärke gemessen. Als Eingang für den Regler wird jedoch nicht die Verkehrsstärke direkt verwendet, sondern die Auslastung, also die Verkehrsstärke dividiert durch die Kapazität der Schnellstraße. Der Hintergrund dieser Messung ist, dass sowohl bei geringem als auch bei dichtem Verkehr die Auslastung gering sein wird. Die Geschwindigkeit kann dann als zusätzlicher Wert benutzt werden, um die tatsächliche Verkehrssituation zu bestimmen.

Die Zugehörigkeitsfunktionen für die verwendeten Größen wurden aus bestehenden Algorithmen zur Zuflussregelung abgeleitet und über genetische Algorithmen in Simulationen optimiert. Die Regelbasis der Zuflussregelung wurde durch Expertenwissen bestimmt und ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Dabei ist jeder Regel eine Gewichtung zugeordnet, mit der sie in der Interferenz verwendet wird.

Nr.	Gewicht	Vorraussetzung	Folgerung
1	$1,5$	Lokale Belegung GERING	Zuflussverkehrsstärke HOCH
2	$1,5$	Lokale Belegung MITTEL	Zuflussverkehrsstärke MITTEL
3	$2,0$	Lokale Belegung HOCH	Zuflussverkehrsstärke GERING
4	$2,0$	Lokale Geschwindigkeit GERING UND Lokale Verkehrsstärke HOCH	Zuflussverkehrsstärke GERING
5	$1,0$	Lokale Geschwindigkeit MITTEL UND Lokale Belegung HOCH	Zuflussverkehrsstärke MITTEL
6	$1,0$	Lokale Geschwindigkeit MITTEL UND Lokale Belegung GERING	Zuflussverkehrsstärke HOCH
7	$1,0$	Lokale Geschwindigkeit HOCH UND Lokale Verkehrsstärke GERING	Zuflussverkehrsstärke HOCH
8	$3,0$	Stromabwärts Geschwindigkeit SEHR GERING UND Stromabwärts Auslastung SEHR HOCH	Zuflussverkehrsstärke GERING
9	$3,0$	Haltelinien–Belegung SEHR HOCH ODER Warteschlangen–Belegung SEHR HOCH	Zuflussverkehrsstärke HOCH

Tabelle 2.1.: Wissensbasis des Fuzzy–Zuflussreglers

Nach der Interferenz wird mit der Center–of–Gravity Methode die zulässige Zuflussrate berechnet und daraus die notwendige Umlaufzeit für die Anlage ermittelt. Hierbei sind noch Rahmenbedingungen wie etwa die maximale und minimale Umlaufzeit zu beachten. Die Neuberechnung der zulässigen Zuflussrate nach diesem Algorithmus erfolgt minütlich.

2.6. Wirkungen der Zuflussregelung

Die Ziele der Zuflussregelung wurden bereits auf S. 4 aufgelistet. Dieser Abschnitt soll erläutern, wie gut diese Ziele erreicht werden und welche anderen Auswirkungen eine Anlage zur Zuflussregelung auf die Verkehrssituation hat.

In allen entsprechenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine Zuflussregelung einen positiven Effekt auf die Verkehrssituation an der Anschlussstelle hat. In den Simulationen von Bogenberger wurde eine Reduktion der Gesamtreisezeit um bis zu 24 % erreicht [Bog02]. Papageorgiou stellte in einem anderen Szenario für den ALINEA–Algorithmus eine Reduktion um $5,2$ % fest [PHSM97]. In der Untersuchung an der A 40 [ST01] wurde damit einhergehend eine Erhöhung der durchschnittlichen Geschwindigkeit auf der Autobahn um ca. 10 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ beobachtet. Dies wurde hauptsächlich auf eine deutliche Verringerung der Geschwindigkeitseinbrüche durch Überlastung zurückgeführt. Bei einer Verringerung der Varianz der lokalen Geschwindigkeit um 20 % erscheint diese Begründung plausibel.

Dieser positive Effekt ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Zuflussregelung kleine Schwankungen der Verkehrsnachfrage in der Nähe der optimalen Verkehrsstärke glättet. Dadurch wird das Risiko von Verkehrszusammenbrüchen durch kurzzeitiges Überschreiten der optimalen Verkehrsstärke verringert. Eine weitere Auswirkung dieser Glättung ist eine bessere Kapazitäts–Ausnutzung der Schnellstraße. Der mit einem Verkehrszusammenbruch verbundene "capacity–drop", der nach neuen Untersuchungen bis zu 24 % betragen kann [BZ04], tritt bei Zuflussregelung nicht so häufig auf und die volle Kapazität der Schnellstraße kann öfter genutzt werden.

Bei einer Ein–Fahrzeug–pro–Grün–Regelung hat die Pulkzerstückelung positive Auswirkungen auf den Verkehrsablauf: Die Situation, dass mehrere von der Einfahrt kommende Fahrzeuge um Lücken im Hauptstrom konkurrieren, tritt nicht mehr auf. Somit kommt es seltener zu einem Hereindrücken von einfahrenden Fahrzeugen und der Verkehr im Hauptstrom wird weniger gestört, was einen ausgleichenden Effekt auf das Geschwindigkeitsniveau hat.

Die Pulkzerstückelung hat dadurch auch eine positive Wirkung auf die Verkehrssicherheit. In der Untersuchung an der A 40 wurde eine Reduktion der Unfallzahlen festgestellt. Dabei kam es nicht, wie befürchtet, zu häufigeren Auffahrunfällen in der Zufahrt.

Eine weitere Auswirkung der Zuflussregelung ist die Reduktion von Treibstoffverbrauch und Emissionen [Bog01]. Allerdings kann ein Rückstau auf der Einfahrtsrampe in diesem Zusammenhang eine lokale Erhöhung von Schadstoff– und Lärmemissionen bewirken, was je nach den örtlichen Gegebenheiten nachteilig sein kann.

Beim Entwurf einer Zuflussregelung ist zu beachten, dass eine Überstauung der Einfahrtsrampe vermieden werden sollte. Ansonsten gäbe es nachteilige Auswirkungen auf das untergeordnete Netz. Die Zuflussregelung hat generell das Problem eines höheren

Rückstaus, welches aber durch geeignete Massnahmen im Algorithmus umgangen werden kann.

Im Zusammenhang mit dem ganzen Verkehrsnetz gab es Überlegungen, wie sich die Zuflussregelung auf die Routenwahl auswirkt: Es kann sein, dass einige Verkehrsteilnehmer sich dadurch davon abhalten lassen, die Schnellstraße zu befahren, und statt dessen das nachgeordnete Netz nutzen. Dies kann von Vorteil sein, wenn die Alternativrouten den zusätzlichen Verkehr aufnehmen können, da so eine eventuelle Überlastung der Schnellstraße aufgehoben wird. Falls dies jedoch nicht der Fall ist, ist es eher negativ zu sehen, wenn nachgeordnete Straßen bevorzugt werden. Wie die Veränderungen in der Routenwahl auf die Verkehrssituation im Gesamtnetz wirken, hängt auch stark vom verwendeten Regelungsalgorithmus ab. In dieser Hinsicht ist eine zu restriktive Regelung sehr gefährlich. Die Kapazität der Schnellstraße sollte immer möglichst voll genutzt werden, wenn eine entsprechende Nachfrage besteht.

Da negative Wirkungen kaum auftreten, liegen die Kosten der Zuflussregelung hauptsächlich im relativ geringen Aufwand für Installation und Betrieb der Anlage. Damit lässt sich ein volkswirtschaftliches Nutzen/Kosten–Verhältnis von 15 : 1 angeben [Bog01].

3. Simulation des Verkehrsflusses

Die Wirkungen der Zuflussregelung sollen in dieser Arbeit anhand einer Simulation des Verkehrs auf einer Schnellstraße im Bereich einer Anschlussstelle untersucht werden. Die folgenden Eigenschaften einer Simulationsmethode sind für diese Untersuchung wichtig:

- Modellierung des Verkehrs sowohl für fließenden als auch für gestauten Verkehr.
- Aufbau eines Rückstaus, falls die Nachfrage die Kapazität übersteigt.
- Genaue Modellierung der Fahrzeug–Interaktionen im Bereich der Schnellstraßeneinfahrt.

In diesem Kapitel werden verschiedene Ansätze zur Verkehrsflussmodellierung vorgestellt und auf ihre Eignung für die Untersuchung in dieser Arbeit geprüft. Anschließend wird die hier verwendete Simulationsumgebung beschrieben.

3.1. Verschiedene Simulationsansätze

In der Verkehrsflusssimulation werden mehrere Ansätze zur Modellierung unterschieden: Kapazitätsabhängige Modelle, makroskopische, mikroskopische und mesoskopische Verkehrsflussmodelle. Jede dieser Modellierungsformen hat besondere Vor– und Nachteile und kommt somit in verschiedenen Situationen zum Einsatz.

Das einfachste Modell ist das kapazitätsabhängige: Über eine Capacity–Restraint–Funktion wird jeder Strecke eine Fahrzeit zugeordnet, die von der Auslastung dieser Strecke abhängt [Fri04a]. Dieses Modell eignet sich für die Berechnung einer Routenwahl, jedoch eher weniger für eine Simulation zur Untersuchung der Qualität des Verkehrsablaufs.

3.1.1. Makroskopische Verkehrsflusssimulation

Die makroskopische Modellierung entstand aus Analogien zur Strömungsmechanik. Die relevanten Größen des Modells sind die Verkehrsstärke q, die Fahrzeugdichte k und die

lokale Geschwindigkeit v. Dabei sind diese Größen als Durchschnittswerte über einen Bereich mit mehreren Fahrzeugen zu verstehen.

Die wichtigste Gesetzmäßigkeit eines makroskopischen Modells ist die auch aus der Strömungsmechanik bekannte Kontinuitätsgleichung:

$$q = v\ k \tag{3.1}$$

Die Kontinuitätsgleichung beschreibt einen stationären Verkehrszustand, der sich bei gleichbleibenden Randbedingungen einstellt. Dazu wird der Zusammenhang $v = v(k)$ benötigt, der über das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses beschrieben wird. Da dies nur aus Messungen gewonnen werden kann, enthalten verschiedene makroskopische Verkehrsflussmodelle verschiedene mathematische Formulierungen dieser Funktion. Eine ausführliche Beschreibung des Fundamentaldiagramms findet sich etwa in [Leu88]

Da ein kontinuierliches Modell auf einem Rechner nicht simuliert werden kann, werden meistens direkt diskrete Modelle fomuliert. Dazu wird eine Strecke in Abschnitte unterteilt, in denen die Dichte und Geschwindigkeit konstant angenommen werden. Die Verkehrsstärke wird als Fluss über die Abschnittsgrenzen interpretiert.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen makroskopischen Modellen liegen in der Beschreibung der Dynamik, wobei verschiedene fahrdynamische und fahrer–psychologische Einflüsse auf die betrachteten Verkehrsgrößen mathematisch formuliert werden. Eines der komplexeren Modelle ist das Cremersche Verkehrsflussmodell [Cre79]. Als dynamische Größen werden hier die Verkehrsdichte und die Geschwindigkeit in den diskreten Streckenabschnitten betrachtet. Die Dynamik der Dichte wird aus einer Fahrzeugbilanz für einen einzelnen Abschnitt gewonnen. Die Geschwindigkeit wird verändert durch

- einen Anpassungsterm, der die Annäherung der Fahrer an die durch das Fundamentaldiagramm bestimmte stationäre Geschwindigkeit beschreibt,
- einen Konvektionsterm, der die Verschiebung des Geschwindigkeitsprofils in Bewegungsrichtung berücksichtigt, und
- einen Dichtegefälleterm, der durch eine vorrausschauende Fahrweise bei örtlichen Dichteunterschieden zustandekommt.

Bei makroskopischen Modellen kann man zwischen deterministischen und stochastischen Modellen unterscheiden. In einer deterministischen Modellierung werden nur die Erwartungswerte der relevanten Größen betrachtet. Bei einem stochastischen Ansatz kommen noch Rauschterme hinzu, die den zufälligen Charakter des Verkehrsgeschehens abbilden. Damit eignet sich dieser Ansatz für Untersuchungen, in denen genauere Aussagen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung relevanter Größen notwendig sind.

Die makroskopische Simulation eignet sich nur bedingt für die Untersuchungen in dieser Arbeit. Mit ihr lässt sich zwar der Verkehr auf der Schnellstraße gut nachbilden, die wartenden Fahrzeuge in der Einfahrt und insbesondere die Interaktionen zwischen einfahrenden und sich bereits auf der Schnellstraße befindenden Fahrzeugen lassen sich damit jedoch nicht genau modellieren.

3.2. Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

In einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell werden einzelne Fahrzeuge betrachtet. Diese werden anhand der Gesetzmäßigkeiten eines Fahrzeugfolgemodells entlang einer Strecke bewegt.

Dabei beschreibt ein Fahrzeugfolgemodell das Verhalten eines Fahrers in Reaktion auf vorausfahrende Fahrzeuge. Wenn keine vorrausfahrenden Fahrzeuge berücksichtigt werden müssen, beschleunigt der Fahrer auf seine Wunschgeschwindigkeit. Wegen der Betrachtung aufeinander folgender Fahrzeuge eignen sich diese Modelle überwiegend für den einspurigen Verkehr ab einer mittleren Verkehrsdichte.

Eine einfache Variante eines Folgemodells ist die Gleichung

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda\big(\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)\big) \tag{3.2}$$

in der folgende Größen verwendet werden:

x_n Position des vorausfahrenden Fahrzeugs

x_{n+1} Position des folgenden Fahrzeugs

T Reaktionszeit

λ Sensitivitätswert

Der Sensitivitätswert ist dabei je nach Modellierung eine Konstante oder abhängig vom Abstand zwischen den Fahrzeugen und von der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs [LS87, S. 156f].

3.2.1. Psycho–physisches Fahrzeugfolgemodell

Beim psycho–physischen Folgemodell nach Wiedemann [Wie74] wird die Wahrnehmung der Fahrer im Folgeverhalten berücksichtigt. Wiedemann geht davon aus, dass ein Fahrer den Abstand und die Differenzgeschwindigkeit nicht genau feststellen kann und definiert Bereiche, in denen der Fahrer sich unterschiedlich verhält:

Unbeeinflusstes Fahren Der Fahrzeugabstand ist größer als die von der Differenzgeschwindigkeit abhängige Wahrnehmungsschwelle. Der Fahrer richtet sich nach seiner Wunschgeschwindigkeit.

Bewusst beeinflusstes Fahren Der Fahrer bemerkt, dass er sich dem vorausfahrenden Fahrzeug nähert und verringert seine Geschwindigkeit. Der Betrag der Bremsbeschleunigung wird dabei an die aktuelle Situation und den gewünschten Abstand angepasst.

Unbewusst beeinflusstes Fahren In diesem Zustand ist die Geschwindigkeitsdifferenz so klein, dass sie nicht wahrgenommen wird. Der Fahrer versucht dem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen. Falls der Fahrzeugabstand eine Wahrnehmungsschwelle erreicht, versucht der Fahrer die Geschwindigkeit wieder anzupassen. Dadurch entstehen für diesen Bereich typische Schwingungen im Abstand.

Die verschiedenen Bereiche des Fahrzeugfolgemodells sind in Abhängigkeit vom Fahrzeugabstand und der Differenzgeschwindigkeit in Abbildung 3.1 dargestellt.

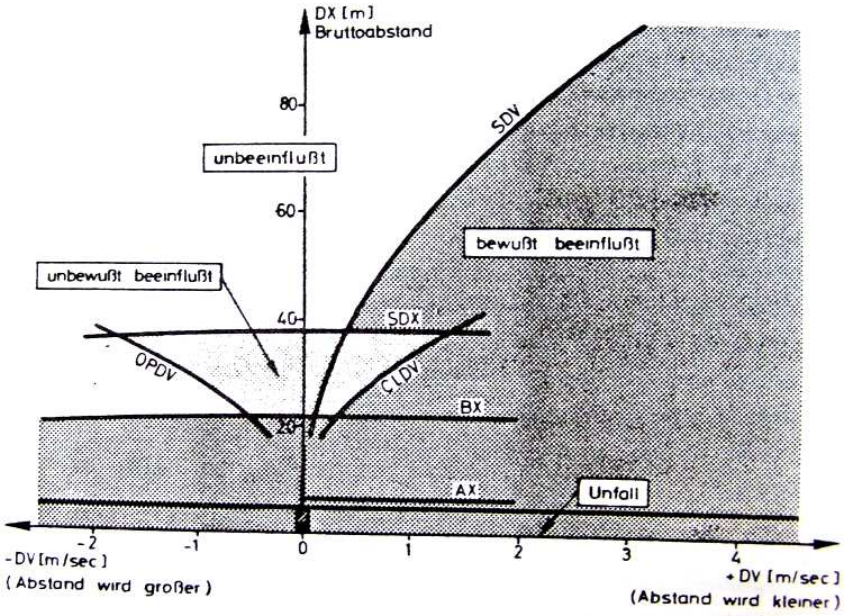


Abbildung 3.1.: Fahrbereiche des Fahrzeugfolgemodells nach Wiedemann [Wie74]

3.2.2. Ergänzungen zum Fahrzeugfolgemodell

Um von einem Fahrzeugfolgemodell zu einer Simulation eines Schnellstraßenabschnittes mit Zufahrt zu kommen, bedarf es noch einiger Ergänzungen. Das Folgemodell beschreibt nur den Verkehr auf einem Fahrstreifen.

Für eine mehrspurige Strecke ist ein Fahrstreifen–Wechsel–Modell erforderlich, um Überholvorgänge abbilden zu können. Dies kann ähnlich wie das psycho–physische Folgemodell implementiert werden, indem Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit von anderen

Fahrzeugen auf den betrachteten Fahrstreifen definiert werden, bei deren Erreichen ein Fahrstreifenwechsel begonnen wird. Beim Fahrstreifenwechsel können auch vom Fahrer wahrgenommene makroskopische Kenngrößen wie die Verkehrsdichte auf den einzelnen Fahrstreifen eine Rolle spielen [LS87, S. 204ff].

Da ein einzelnes Fahrzeug nicht auf seiner kompletten Route betrachtet wird, muss das Einsetzen von Fahrzeugen am Rande des simulierten Bereichs besonders beachtet werden. Hier sind vor allem die zeitlichen Abstände der Fahrzeugankünfte wichtig. Diese werden aus der von der Verkehrsstärke abhängigen Zeitlückenverteilung gewonnen. Mit einem Zufallsgenerator, der diese Verteilung nachbildet, werden Zahlenwerte für die Abstände zwischen Fahrzeugankünften erzeugt.

Bei der Erzeugung von Fahrzeugen werden auch andere für die Simulation relevante Kenngrößen über Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt. Dies lässt sich unterteilen in Kenngrößen, die den Fahrer beschreiben, und solche für das Fahrzeug. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Fahrer–Fahrzeug–Einheiten, die in das simulierte Verkehrsnetz eingesetzt werden. Wichtige Kenngrößen für den Fahrer sind etwa die Wunschgeschwindigkeit und beim psyscho–physischen Folgemodell individuelle Wahrnehmungsschwellen. Das Fahrzeug wird z.B. durch die maximal mögliche Beschleunigung und andere physikalische Werte beschrieben.

Eine mikroskopische Simulation mit einem realitätsnahen Modell für den Fahrstreifenwechsel eignet sich gut zur Nachbildung des Verkehrs im Bereich der Anschlussstelle. Eine Alternative wäre noch eine mesoskopische Simulation, bei der nur der Verflechtungsbereich mikroskopisch simuliert werden würde. Die übrige Strecke würde dann mit einem makroskopischen Ansatz modelliert werden.

3.2.3. Randeinflüsse und Konfidenzintervalle

Für die Auswertung eines Simulationslaufs ist es wünschenswert, dass die betrachtete Situation möglichst genau die im Modell beschriebenen Effekte widerspiegelt. Dies ist in den Randbereichen sowohl für den relevanten Wegabschnitt als auch Zeitabschnitt nicht immer möglich, da für die Randbedingungen oft vereinfachte Annahmen gemacht werden.

Die beim Einsetzen neuer Fahrzeuge verwendete Zeitlückenverteilung etwa kann oft nicht alle Auswirkungen eines detaillierten Fahrzeugfolgemodells abbilden. Ein deutliches Beispiel hierfür ist die Bildung von LKW–Pulks auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen. Bei einer einfachen, zeitlückenbasierten Methode zum Einsetzen von Fahrzeugen wird dieser Effekt erst in einiger Entfernung zum Einsatzort auftreten.

Insofern ist es notwendig, den zu untersuchenden Wegabschnitt mit einer Anlaufstrecke und einer Auslaufstrecke zu umgeben, um Randeinflüsse auf den Untersuchungsbereich möglichst zu vermeiden. Ebenso ist im Zeitbereich eine Anlaufphase vor dem eigentlichen

Untersuchungszeitraum notwendig, um den Anfangszustand an die Modellbedingungen anzugleichen [LS87, S. 198ff].

Um aussagekräftige Werte für die interessierenden Daten wie etwa die Reisezeit zu erhalten, ist es notwendig, mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlich initialisierten Zufallsgeneratoren auszuwerten. Die notwendige Anzahl verschiedener Simulationsläufe ergibt sich aus dem geforderten Konfidenzintervall für den gemessenen Mittelwert und der angenommenen Verteilung.

Der interessierende Messwert für diese Untersuchung ist die Gesamtreisezeit im simulierten Straßennetz, wobei angenommen wird, dass diese normalverteilt ist. Dann gilt für den Erwartungswert einer zu messenden zufälligen Größe mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,95

$$|\mu - \overline{x}| \leq k_1 s \tag{3.3}$$

mit

μ Erwartungwert der gemessenen Größe

$\overline{x}$ Mittelwert einer Stichprobe vom Umfang n

s Standardabweichung der Stichprobe

k_1 Konfidenzfaktor in Abhängigkeit von n.

Der Konfidenzfaktor k_1 kann dabei Tabellen wie z.B. [RW00, S. 478] entnommen werden. Bei einer gegeben Stichprobe lässt sich der relative Fehler für den aus der Stichprobe errechneten Mittelwert im Vergleich zum tatsächlichen Mittelwert nach folgender Gleichung mit 95–prozentiger Sicherheit abschätzen:

$$|\frac{\mu - \overline{x}}{\mu}| \leq \frac{k_1 s}{\mu} \approx \frac{k_1 s}{\overline{x}} \tag{3.4}$$

In dieser Arbeit soll eine Stichprobe als signifikant gewertet werden, wenn der relative Fehler nach obiger Gleichung nicht mehr als 2 % beträgt.

3.3. Simulationssoftware VISSIM

Für diese Arbeit wurde die Simulationsumgebung VISSIM verwendet, die alle für diese Untersuchung nötigen Möglichkeiten bietet.

In VISSIM kann ein beliebiges Streckennetz mit Strecken und den für Abbiegebeziehungen notwendigen Verbindungen unterschiedlichen Typs modelliert werden. Dadurch kann der Verkehrsablauf auch für sehr komplexe Straßennetze simuliert werden.

Die Simulation in VISSIM läuft in zwei Unterbereichen: In einem Programmteil wird der Verkehrsfluss mit dem Verhalten der Fahrer–Fahrzeug–Einheiten und ihren Interaktionen simuliert. Der andere Programmteil ist für den Ablauf der Signalsteuerung zuständig.

Die beiden Programmteile interagieren, indem in der einen Richtung Daten aus dem Zustand des Verkehrsflusses über Detektoren der Signalsteuerung zugänglich gemacht werden und in der anderen Richtung die Fahrer auf angezeigte Signalbilder reagieren.

Aus beiden Programmteilen können Daten für die Auswertung gewonnen werden, die nicht wieder auf das Simulationsmodell rückgekoppelt werden können[1]. Unter diesen Punkt fällt etwa eine Reisezeitmessung.

3.3.1. Elemente des Verkehrsflussmodells

Als Fahrzeugfolgemodell verwendet VISSIM das in Abschnitt 3.2.1 auf Seite 19 beschriebene psycho-physische Modell nach Wiedemann, wobei die Parameter des Modells an das heutige Fahrverhalten angepasst wurden [PTV03a].

An Erweiterungen enthält VISSIM ein Modell zum Fahrstreifenwechsel für mehrspurige Strecken sowie eine Reaktion der Fahrer auf Lichtsignalanlagen und Vorfahrtsregeln. Es wird nicht nur der Einfluss des vorausfahrenden Fahrzeugs betrachtet, sondern mehrere Nachbarfahrzeuge, wie in Abbildung 3.2 gezeigt wird.

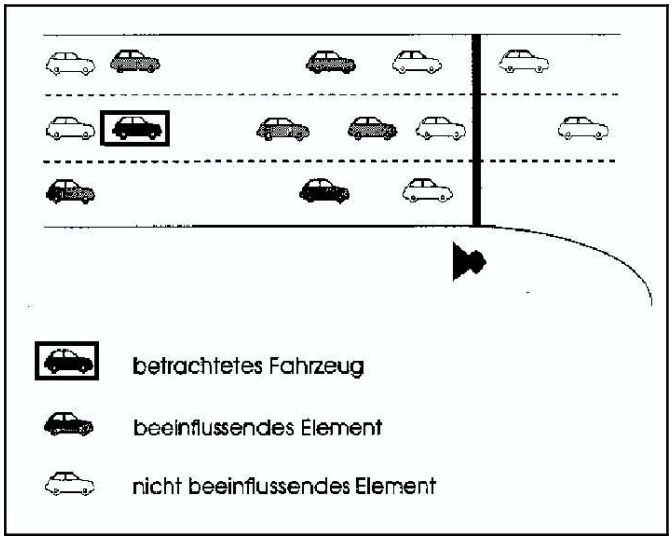


Abbildung 3.2.: Einfluss von Nachbarfahrzeugen in VISSIM [PTV03a]

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die benötigten Kenngrößen einer Fahrer–Fahrzeug–Einheit, die bei deren Einsetzen angewandt werden, sind frei einstellbar. In VISSIM sind

[1] Die Möglichkeit zur dynamischen Umlegung wird hierbei nicht betrachtet.

bereits einige Standardverteilungen enthalten. Diese wurden für die Simulation in dieser Untersuchung verwendet, solange dem keine speziellen Erfordernisse entgegenstanden.

3.3.2. Modellierung der Lichtsignalsteuerung

In VISSIM können alle notwendigen Elemente für die Signalsteuerung wie Lichtsignalanlagen, Signalgruppen und Signalgeber definiert werden. Die Haltelinien für Signalgeber können fahrstreifengenau platziert werden. Eine Möglichkeit zur Festzeitsteuerung der Lichtsignalanlagen ist im Grundumfang der Programmumgebung enthalten.

Mit dem Erweiterungsmodul VAP (Verkehrsabhängige Programmierung) [PTV03b] wird eine Programmiersprache in VISSIM eingebunden, mit der eigene verkehrsabhängige Steuerungen programmiert werden können. Hierbei kann direkt auf verschiedene Detektormesswerte zugegriffen werden.

Die Syntax von VAP ist der Programmiersprache Pascal ähnlich. Mit ihr können auch relativ komplexe Algorithmen implementiert werden. Allerdings gibt es einige Einschränkungen, wie etwa fehlende lokale Namensräume für Variablen und keine Parameterliste bei Unterprogrammen, welche die mögliche Komplexität von Steuerungen beschränken. Dadurch sind etwa rekursive Funktionsaufrufe nicht möglich. Für die hier untersuchten Algorithmen reichen die Möglichkeiten von VAP jedoch noch aus.

VAP bietet auch die Möglichkeit, Wunschgeschwindigkeiten oder Routenentscheidungen aus einem Steuerungsprogramm heraus verkehrsabhängig zu beeinflussen. So können etwa Streckenbeeinflussungsanlagen oder Wechselwegweiser simuliert werden.

3.3.3. Auswertungen des Verkehrsablaufs

Zur Analyse des Verkehrsflusses in einem Simulationslauf stehen prinzipiell zwei Werkzeuge in VISSIM zur Verfügung:

Mit einer Reisezeitmessung können die Reisezeiten von Fahrzeugen zwischen zwei beliebig wählbaren Querschnitten gemessen werden und einzeln abgespeichert werden.

Bei einer Querschnittsmessung werden Messdaten an einem Querschnitt ähnlich wie mit einem Detektor erfasst. Allerdings ist hier auch die Messung von Fahrzeugkenngrößen möglich, die mit einem realen Detektor nicht erfasst werden können.

Eine Variante der Querschnittsmessung ist die Messung der Staulänge, bei der ausgehend von einem Querschnitt die Länge des eventuell entstandenen Rückstaus gemessen wird. Da die Position des Messquerschnitts hierbei fest ist, eignet sich dies für die Rückstaumessung an Haltelinien.

Für eine vollständige Analyse des Verkehrsflusses ist es möglich, das Fahrzeugprotokoll abzuspeichern. In diesem können in jedem Simulationsschritt alle relevanten Größen für jedes einzelne Fahrzeug ausgegeben werden. Dies führt jedoch zu sehr großen Ausgabedateien und ist oft auch nicht erforderlich für die Auswertung.

Für die Auswertung der Lichtsignalsteuerung können alle in einem VAP–Programm verwendeten Variablen in einer sog. `Trace`–Datei gesichert werden. Zusätzlich ist es möglich, die Schalt– und Detekorzustände in einem LSA–Protokoll auszugeben.

Mit diesen Auswertemöglichkeiten können alle Daten aus dem Simulationslauf gewonnen werden, die im Rahmen dieser Arbeit von Interesse sind.

4. Messung von Verkehrsdaten

In dieser Arbeit bezieht sich die Messung der Verkehrsdaten in erster Linie auf die Entnahme und Weiterverarbeitung relevanter Werte aus dem simulierten Verkehrsmodell. Eine physikalische Betrachtung von Messsensoren ist daher nicht notwendig, wohl aber Überlegungen zur geeigneten Weiterverarbeitung von Rohdaten aus dem simulierten Verkehrsablauf.

Bei den Messungen lässt sich unterscheiden zwischen Daten, die noch während der Simulation vom Regler zur Berechnung der zulässigen Zuflussrate benötigt werden, und solchen, die nur nach einem Simulationslauf für die Bewertung des simulierten Verkehrsgeschehen notwendig sind. Die erste Art der Messung sollte auch in der Realität möglich sein, für die zweite Art genügt es, wenn aus der Simulation entsprechende Daten gewonnen werden können.

4.1. Messungen zur Weiterverarbeitung im Regler

Für Messungen, auf deren Ergebnisse aus der verkehrsabhängigen Programmierung zugegriffen werden kann, stellt VISSIM einen Detektor als Netzelement zur Verfügung [PTV03a]. Für den Kfz–Verkehr arbeitet dieser Detektor ähnlich wie eine in der Realität verwendete Induktionsschleife.

Ein Detektor hat in VISSIM eine vom Benutzer festzulegende Länge. In der Simulation wird in jedem Schritt geprüft, ob eine Fahrzeugvorderkante den Detektor befährt oder eine Hinterkante den Detektor verlässt. Die Zustandsgrößen des Detektors werden dabei entsprechend aktualisiert. Folgende Zustandsgrößen kann ein Detektor in VISSIM speichern:

- exponentiell geglätteter Belegungsgrad
- Geschwindigkeit des zuletzt erfassten Fahrzeugs
- Länge des zuletzt erfassten Fahrzeugs
- Anzahl der erfassten Vorderkanten
- Anzahl der erfassten Hinterkanten
- Belegungszeit bzw. Zeitlücke seit letzter Belegung

- Impulsspeicher des Detektors

Die Programmiersprache VAP stellt Funktionen zur Verfügung, mit denen auf die Messwerte einzelner Detektoren zugegriffen werden kann. Diese Werte können dann im Algorithmus zur Signalsteuerung beliebig verwendet werden. Über diese Vorgehensweise lassen sich alle verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren implementieren, die auf Messungen aus Induktionsschleifen beruhen.

Bei einer Aufnahme der Detektorwerte über die zur Verfügung stehenden Abfragefunktionen überlagern jedoch zufällige Schwankungen im Verkehrsgeschehen den für die Regelung relevanten längerfristigen Trend. Deshalb müssen diese Rohdaten erst geglättet werden, bevor sie im Regler verwendet werden können. Ansonsten würde der Regler zu sehr von kurzfristigen, zufälligen Schwankungen beeinflusst werden und stark oszillieren, ohne dass sich die Verkehrssituation wesentlich änderte. Nur der Belegungsgrad wird bereits von VISSIM geglättet und kann daher direkt verwendet werden.

Aus signaltheoretischer Sicht muss das Messsignal erst durch einen Tiefpass gefiltert werden, um das überlagerte Rauschen zu dämpfen, bevor das Signal im Regler weiterverarbeitet wird. Wünschenswert wäre es, einen Beobachter zu benutzen. Da hier jedoch kein Modell der Regelstrecke genutzt wird und es sich quasi um eine modellfreie Regelung handelt, kann auch kein modellbasierter Beobachter verwendet werden.

Für mehrspurige Strecken wird in der Zuflussregelung nur ein gemeinsamer Messwert für alle Fahrstreifen benötigt. Dazu wird das arithmetische Mittel der Messwerte aus den einzelnen Fahrstreifen verwendet, da in VISSIM Detektoren auf den einzelnen Fahrstreifen platziert werden.

4.1.1. Glättung von Messwerten

Für die Glättung der aufgenommenen Messwerte wird die exponentielle Glättung verwendet, wie sie in [LS87, S. 221f] beschrieben wird. Die Messgröße x_k zum Zeitpunkt k wird dabei wie folgt berechnet:

$$x_k = \alpha y_k + (\alpha - 1)x_{k-1} \tag{4.1}$$

Hierbei sind

α der Glättungsfaktor aus dem Intervall $]0, 1]$ und

y_k der zum Zeitpunkt k aufgenommene Messwert.

x_k der geglättete Messwert zum Zeitpunkt k .

Signaltheoretisch betrachtet hat diese Glättung die z–Übertragungsfunktion $F(z) = \frac{\alpha z}{z-1+\alpha}$ und entspricht damit einem diskreten Tiefpassfilter. Das Bode–Diagramm der Übertragungsfunktion $F(z)$ ist für $\alpha = 0,3$ und eine Abtastzeit von 2 s in Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite dargestellt. Die -3 dB Durchgangsfrequenz liegt bei

$\omega_B = 0,18\ \frac{1}{\mathrm{s}}$, was einer Schwingungsdauer von 34,9 s entspricht. Schnellere Schwingungen in der Eingangsgröße werden durch die Glättung gedämpft.

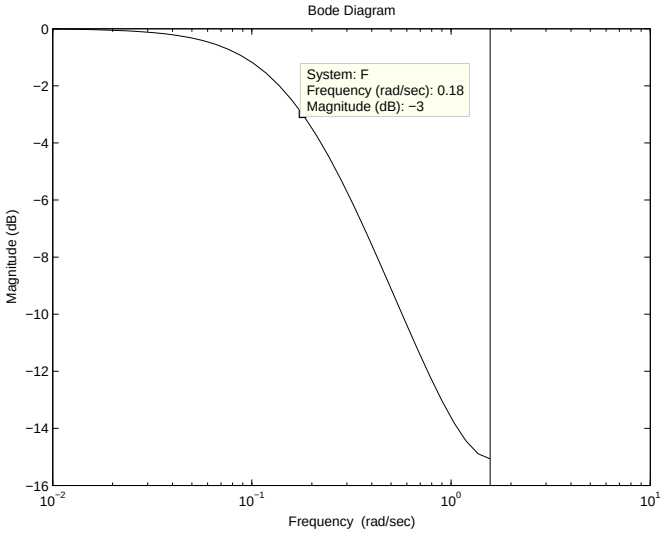


Abbildung 4.1.: z–Übertragungsfunktion der exponentiellen Glättung

Der Tiefpass fügt außerdem einen Verlust an Phase in das System ein. Dieser Phasenverlust tritt etwa ab der Grenzfrequenz des Filters auf. Da diese wesentlich höher als die Rechenfrequenz des Reglers ist, wirkt sich die Phase des Tiefpasses nicht auf die Stabilität des geregelten Systems aus.

4.1.2. Einschränkungen der Detektoren in VISSIM

Zwei wichtige Einschränkungen sind bei der Abfrage von Detektoren zu beachten:

Die Abbfragefunktion für die Geschwindigkeit geht davon aus, dass nur ein Fahrzeug je Simulationssekunde über den Detektor fährt. Wenn die Fahrer nicht zu dicht auffahren, ist diese Annahme für gewöhnlich erfüllt. Falls sie nicht erfüllt ist, wird der Messfehler klein bleiben, da zwei so dicht hintereinanderfahrende Fahrzeuge in etwa die gleiche Geschwindigkeit fahren werden. Ein kleiner Fehler entsteht dennoch dadurch, dass nur ein Wert in die Glättung eingeht. Bei einer üblichen Zeitlückenverteilung ist dieser Fall jedoch zu vernachlässigen.

Die Abfrage der Anzahl der über den Detektor fahrenden Fahrzeuge, wie sie im folgenden Abschnitt beschrieben ist, ist fehleranfälliger: Hier muss die Länge des Detektors kurz genug gewählt werden, so dass sich niemals zwei Fahrzeuge gleichzeitig darüber befinden. Ansonsten wird die Verkehrsstärke zu gering gemessen. Für die Auffahrt, auf der die Fahrzeuge häufig halten, werden daher eigene Detektoren einer sehr kurzen Länge für die Messung der Verkehrsstärke verwendet. Auf der Schnellstraße selbst

genügt eine Länge von 5 m, wenn man eine Mindestgeschwindigkeit von 20 $\frac{km}{h}$ annimmt.

4.1.3. Auslesen der Detektoren im VAP-Programm

Die folgenden VAP–Funktionen zum Auslesen von Detektorwerten werden für die in dieser Arbeit untersuchten Regelalgorithmen verwendet:

Belegungsgrad(detnum) Liefert den von VISSIM bereits exponentiell geglätteten Belegungsgrad. Als Glättungsfaktor wird in allen Simulationen $0,2$ verwendet.

Geschwindigkeit(detnum) Liefert die durch eine quasi lokale Messung aufgenommene Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$ des in der aktuellen Simulationssekunde über den Detektor fahrenden Fahrzeuges zurück. Falls kein Fahrzeug aufgenommen wird, gibt die Funktion 0 zurück.

Vorderkanten(detnum), Hinterkanten(detnum) Gibt die Anzahl der seit dem letzten Rücksetzen aufgenommen Vorder- bzw. Hinterkanten zurück, die über den Detektor gefahren sind. Beachtet werden muss hier, dass keine neue Kante erfasst wird, falls sich gleichzeitig noch ein anderes Fahrzeug auf dem Detektor befindet.

Loesche_Vorderkanten(detnum), Loesche_Hinterkanten(detnum) Die Zählung der Fahrzeugkanten wird auf 0 zurückgesetzt.

Das VAP–Programm enthält die Routine `SensorTick`, die bei jedem Durchlauf des Programms, also im Sekundentakt, aufgerufen wird. Darin wird die Geschwindigkeitsmessung durchgeführt, da hierfür die Glättung im VAP–Programm selbst implementiert werden muss.

Eine Routine für längerfristige Messungen ist `LeseSensoren`. Diese wird vor dem Aufruf des Algorithmus zur Zuflussregelung ausgeführt, um dem Regler die aktuellen Messwerte zur Verfügung zu stellen. Die folgende Auflistung erläutert die durchgeführten Messungen.

Messung der Geschwindigkeit In der Routine `SensorTick` wird mit der VAP-Funktion `Geschwindigkeit(detnum)` die Geschwindigkeit eines in der gleichen Simulationssekunde über den Detektor fahrenden Fahrzeuges ausgelesen und mit dem Faktor $\alpha_v = 0.3$ exponentiell geglättet. Falls die VAP-Funktion 0 zurückgibt, also kein Fahrzeug erfasst wurde, wird der alte Geschwindigkeitswert beibehalten.

Messung der Verkehrsstärke In der Routine `LeseSensoren` wird die Anzahl der im letzten Messintervall den Querschnitt passierenden Fahrzeuge als Mittelwert der gezählten Vorder- und Hinterkanten berechnet. Die Zählung wird danach zurückgesetzt.

Messung des Belegungsgrades Der von VISSIM geglättete Belegungsgrad wird in der Routine `LeseSensoren` ausgelesen. Da in die Berechnung dieses Belegungsgrades jedoch zu ca. 95% die letzten 10 Simulationsschritte eingehen, wird für die Verwendung im Regler eine weitere Glättung benötigt. Deshalb wird der von den Detektoren zurückgegebene Belegungsgrad noch mit $\alpha_b = 0.75$ geglättet, um auch weiter zurückliegende Daten miteinzubeziehen.

4.1.4. Detektormessungen bei ALINEA

Für den ALINEA–Algorithmus wird in der Grundform nur ein Detektor je Fahrstreifen benötigt, der die Belegung auf der Schnellstraße stromabwärts der Auffahrt misst, wie bereits in Abbildung 2.4 auf Seite 10 dargestellt. Der gemessene, exponentiell geglättete Belegungsgrad wird direkt für die Berechnung der zulässigen Zuflussrate nach Gleichung 2.3 auf Seite 9 verwendet.

Weiterhin ist es sinnvoll, in der Berechnungsformel die tatsächliche Zuflussrate im letzten Zeitintervall für den Wert $r(k-1)$ zu verwenden. Hierfür wird dann ein weiterer Detektor benötigt, der den Verkehrsfluss über die Haltelinie an der Zufahrt wie oben beschrieben misst.

Um den ALINEA–Algorithmus in der Praxis einsetzen zu können, ist meist noch eine Stauraumüberwachung notwendig, da ein Rückstau über die bauliche Länge der Einfahrtsrampe hinaus vermieden werden sollte. Dies kann mit einem weiteren Detektor erreicht werden, der im Anfangsbereich der Einfahrt platziert wird. Zusätzlich muss der Algorithmus zur Zuflussregelung geeignet angepasst werden, um bei einer Überstauung dieses Detektors Gegenmassnahmen zu ergreifen. Dies führt dann zu einer höheren Zuflussrate, um Rückstau abzubauen, was natürlich nur auf Kosten der Verkehrsqualität auf der Schnellstraße zu erreichen ist.

Die Fuzzy–Zuflussregelung nach Bogenberger verwendet ebenfalls einen Detektor zur Stauraumüberwachung. Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den beiden Verfahren zu gewährleisten, wird im Rahmen dieser Arbeit der ALINEA–Algorithmus um einen Stauraumdetektor und eine entsprechende Anpassung der Berechnungsvorschrift erweitert. Bei der Untersuchung von ALINEA auf der A40 wurden solche Massnahmen bereits erprobt [ST01]. Die hier angewandte Implementation ist in Abschnitt 5.3.2 beschrieben.

4.1.5. Detektormessungen für die Fuzzy–Zuflussregelung

Die Fuzzy–Zuflussregelung verwendet sehr viele Messwerte, um einen umfassenden Überblick über die Verkehrssituation im Bereich der Anschlussstelle zu bekommen. Die verwendeten Messgrößen wurden von Bogenberger nach dem Gesichtspunkt ausgewählt, "eine detaillierte Abbildung der aktuellen Verkehrsbedingungen auf der Hauptfahrbahn und auf der Einfahrt" zu ermöglichen [Bog02]. Nach der Fuzzyfizierung der Messwerte

können der Wissensbasis des Fuzzy–Reglers somit alle für die Zuflussdosierung relevanten Informationen zur Verfügung gestellt werden.

In Tabelle 4.1 sind alle Messgrößen aufgelistet, die in der Fuzzy–Zuflussregelung verwendet werden. Für diese Messungen sind insgesamt an vier Orten Detektoren notwendig. Eine lokale Messung auf der Schnellstraße bedeutet hier eine Messung im Bereich der Anschlussstelle, aber etwas stromaufwärts, so dass die Fahrzeuge, die hier erst auf die Schnellstraße auffahren, noch nicht mit erfasst werden. Die Messpunkte sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

Bezeichnung	Ort der Messung
Verkehrsstärke Q_{lok}	Lokal auf der Schnellstraße
Geschwindigkeit v_{lok}	Lokal auf der Schnellstraße
Belegungsgrad o_{lok}	Lokal auf der Schnellstraße
Verkehrsstärke/Kapazität	Stromabwärts auf der Schnellstraße
Geschwindigkeit v_{ab}	Stromabwärts auf der Schnellstraße
Belegungsgrad o_{halt}	Haltelinie der Auffahrt
Belegungsgrad o_{stau}	Beginn des Stauraums der Auffahrt

Tabelle 4.1.: Messgrößen für die Fuzzy–Zuflussregelung

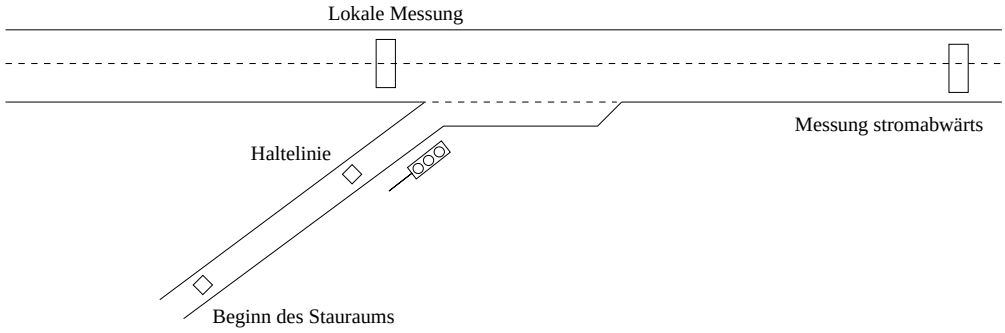


Abbildung 4.2.: Messpunkte für die Fuzzy–Zuflussregelung

Die Messgrößen werden wie in Abschnitt 4.1.3 auf Seite 30 beschrieben im VAP–Programm erfasst. Für die Verkehrssituation auf der Schnellstraße stromabwärts der Anschlussstelle ist außerdem die Auslastung, also der Quotient aus Verkehrsstärke und Kapazität relevant. Die Kapazität der Schnellstrasse ist dabei eine Konstante, die in der Praxis aus der maximalen Verkehrsstärke in vergangenen Messungen bestimmt werden kann. In dieser Arbeit wird der Wert von 4400 $\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ als Kapazität für eine Schnellstraße mit zwei Fahrstreifen verwendet.

4.2. Ausgaben zur Bewertung des Regelverfahrens

VISSIM bietet die Möglichkeit, aus einem VAP-Programm heraus beliebige Werte in einer sog. Trace–Datei abzuspeichern, die nach der Simulation für eine Bewertung oder Überprüfung des implementierten Algorithmus verwendet werden können.

In dieser Arbeit wird diese Möglichkeit dazu genutzt, das Stellsignal des Reglers — also die geschaltete zulässige Zuflussrate — während der Simulation aufzuzeichnen und für eine nachfolgende Bewertung im Zusammenhang mit den gemessenen Verkehrsgrößen zu nutzen.

Insbesondere sollte bei einer im Mittel konstanten Verkehrsnachfrage über die Schnellstraße und über die Einfahrtsrampe das Reglersignal in etwa konstant bleiben. Diese Annahme kann zur Bewertung der Empfindlichkeit des Reglers gegenüber den zufälligen Schwankungen im Verkehr verwendet werden. Falls der Regler trotz der konstanten Nachfrage starke Schaltungen ausführt, ist er vermutlich zu empfindlich gegenüber dem Rauschen im Verkehrsgeschehen.

Hierfür wird ein Maß für das Rauschen R_x eines Signals benötigt. Je größer dieser Wert für das Stellsignal eines Reglers bei konstantem, aber verrauschtem Eingang ist, desto empfindlicher ist der Regler gegenüber dem Rauschen in diesem Eingangssignal.

Um als Maß für die Anzahl und Größe der Schaltungen in einem Signal zu dienen, soll die Definition des Rauschens R_x folgende Eigenschaften haben:

- Das Rauschen eines konstanten Signals ist 0.
- $R_x = R_{2 \cdot x}$ — Ein konstanter Faktor verändert das Rauschen nicht.
- $R_{k+x} < R_x$ für $k \in \mathbb{R}^+,\ x > 0$ — Bei einem größeren Mittelwert des Signals wird das Rauschen relativ betrachtet geringer.

Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, wird das Rauschen R_x eines Signals $x(t)$ im Bereich $0 < t < T$ definiert als

$$R_x = \frac{\int_0^T |\dot{x}(t)|\, dt}{\int_0^T |x(t)|\, dt} \tag{4.2}$$

Die physikalische Einheit des Rauschens entspricht der einer Frequenz. Eine interessante Eigenschaft der hier verwendeten Definition findet man für Sinus–Signale mit Mittelwert 0: Hierfür wird das Rauschen gleich der Frequenz des Sinus–Signals.

4.3. Messungen zur Bewertung des Verkehrsablaufs

Um die vorgestellten Algorithmen zur Zuflussregelung zu vergleichen, müssen Messungen gemacht werden, in denen die Auswirkungen der Zuflussregelung auf den Verkehrsablauf deutlich werden. Durch die Bewertung der so gewonnenen Daten können Unterschiede in der Verkehrssituation bei verschiedenen Regelungsverfahren quantitativ erfasst werden.

4.3.1. Die Reisezeit als Qualitätsmaß

Da die Kosten des Verkehrs für einen Verkehrsteilnehmer zu einem grossen Anteil durch den Zeitaufwand entstehen, erscheint es sinnvoll, die benötigte Zeit zum Befahren eines bestimmten Streckenabschnittes als Qualitätsmaß für den Verkehrsablauf auf diesem Streckenabschnitt zu definieren. Für die Bewertung von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen wird dies nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [For01] ebenfalls angewandt.

In [CF87] untersuchten Cremer und Fleischmann bereits verschiedene Gütemaße für den Verkehrsablauf in Schnellstraßennetzen, insbesondere auch im Hinblick auf eine Zuflussregelung. Die dort untersuchten Größen sind die Verkehrsleistung, die Geschwindigkeit, die Reisezeit sowie eine gemischte Größe aus Kilometerleistung und Reisezeit. Als sinnvollstes Maß für eine Zuflussregelung bewerteten sie die Gesamtreisezeit im Verkehrsnetz, unter Einbeziehung der Wartezeit an den Einfahrten.

Da in dieser Untersuchung jeder Verkehrsteilnehmer genau eine Route zur Auswahl hat und die Distanz für die jeweiligen Reisezeitmessungen konstant bleibt, ist eine Betrachtung der erreichten Reisegeschwindigkeit äquivalent zur Untersuchung der benötigten Reisezeit.

Für die volkswirtschaftliche Beurteilung der Verkehrsqualität ist außerdem wichtig, wie viele Fahrzeuge einen Streckenabschnitt in einer gewissen Zeit passieren können, also die Leistung des betrachteten Streckenabschnittes. Da hier die betrachtete Verkehrsnachfrage für alle verwendeten Regelalgorithmen dieselbe ist, sollte sich für dieses Kriterium kein Unterschied ergeben. Die Anzahl der Fahrzeuge, die innerhalb des Untersuchungszeitraumes in eine Reisezeitmessung eingehen, wird dennoch ausgewertet. So kann festgestellt werden, ob eventuell ein Verkehrsstrom übermäßig zurückgehalten wird.

4.3.2. Reisezeitmessung in VISSIM

In der Simulationsumgebung VISSIM können Reisezeiten zwischen einem Start– und einem Zielquerschnitt im Verkehrsnetz gemessen werden. Die in einem Simulations-

lauf gewonnenen Daten werden in einer Ausgabedatei abgespeichert. VISSIM bietet die Möglichkeit, entweder Rohdaten oder bereits aggregierte Daten auszugeben. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Rohdaten der Reisezeitmessung verwendet.

Sobald ein vom Startquerschnitt kommendes Fahrzeug den Zielquerschnitt einer Reisezeitmessung passiert, gibt VISSIM die entsprechenden Messdaten aus, die im Folgenden aufgelistet sind:

1. Zeitpunkt der Überfahrt am Zielquerschnitt
2. Nummer der Reisezeitmessung
3. Nummer des betrachteten Fahrzeugs
4. Fahrzeugtyp
5. benötigte Reisezeit in Sekunden

Da in VISSIM außerdem automatisch die Strecke zwischen den Querschnitten einer Reisezeitmessung berechnet wird, kann damit die durchschnittlich erreichte Reisegeschwindigkeit berechnet werden.

Für die Auswertungen in dieser Arbeit wurden jeweils drei verschiedene Reisezeitmessungen durchgeführt, die in Abbildung 4.3 veranschaulicht sind:

1. Durchgehender Verkehr auf der Schnellstraße
2. Einfahrender Verkehr bis zum Ende des Verflechtungsbereiches
3. Einfahrender Verkehr ab dem Ende des Verflechtungsbereiches

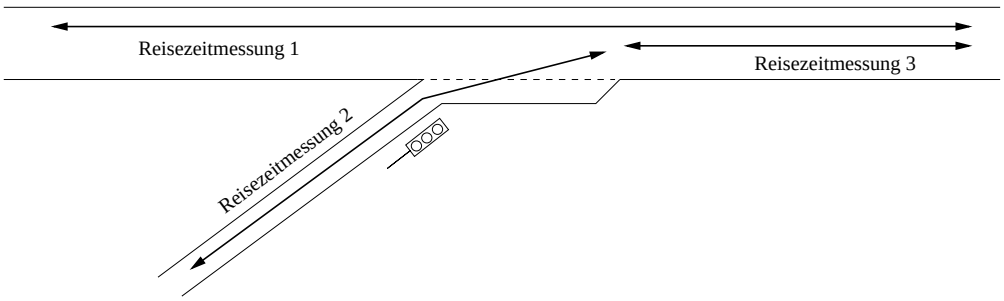


Abbildung 4.3.: Reisezeitmessungen an der Anschlussstelle

Für den einfahrenden Verkehr gibt es zwei aufeinanderfolgende, aber getrennte Messungen, um zwischen den Wartezeiten vor der Zuflussbeschränkung und der — im Vergleich zum Zustand ohne Zuflussregelung vielleicht geringeren — Reisezeit auf der Schnellstraße unterscheiden zu können.

4.3.3. Auswertung der Reisezeitmessung

Die Daten aus der Reisezeitmessung werden nach den Simulationsläufen automatisiert ausgewertet. Um zu statistisch relevanten Ergebnissen zu kommen, werden mehrere Simulationsläufe mit einer unterschiedlichen Initialisierung des Zufallszahlengenerators gemeinsam ausgewertet. Für jeden Kennwert wird dann der Mittelwert sowie die Standardabweichung aus den Werten der einzelnen Simulationsläufe berechnet. Die verwendeten Kennwerte sind im Folgenden beschrieben, die Nummerierung der Reisezeitmessungen bezieht sich dabei auf die Auflistung aus dem vorigen Abschnitt.

Fahrzeuge gesamt Erfasste Fahrzeuge bei allen Messungen

Einfahrende Fahrzeuge Erfasste Fahrzeuge für Messung 2

Systemreisezeit Summe aller gemessenen Reisezeiten

Wartezeit Summe der Reisezeiten aus Messung 2

mittlere Wartezeit je einfahrendem Fahrzeug

durchschnittliche Schnellstraßengeschwindigkeit ein Mittelwert aus Messung 1 und 3, der die erreichte Reisegeschwindigkeit im betrachteten Schnellstraßenabschnitt darstellt

Systemverkehrsleistung Summe aller zurückgelegten Streckenlängen

Die statistische Signifikanz wird über den in Abschnitt 3.2.3 auf Seite 22 beschriebenen Konfidenztest festgestellt, wobei hier die Systemreisezeit als Testgröße verwendet wird.

4.3.4. Messung der Rückstaulänge

Eine weitere Bewertungsgröße ist die Rückstaulänge vor der Schnellstraßeneinfahrt. Bei einer Überschreitung der maximalen Stauraumlänge in der Einfahrt würden sich Rückwirkungen auf das untergeordnete Netz ergeben. Der Knotenpunkt, über den die Einfahrt an das untergeordnete Netz angeschlossen ist, wird dabei überstaut und erreicht nicht mehr seine volle Kapazität. Für den praktischen Einsatz muss der Algorithmus zur Zuflussregelung also so gestaltet sein, dass ein zu großer Rückstau vermieden wird.

Die Rückstaulänge kann in VISSIM über einen virtuellen Stauzähler gemessen werden. Dieser misst die Entfernung von seiner Position bis zum letzten Fahrzeug, das in die Staubedingung eingetreten ist, welche der Länge des aufgestauten Fahrzeugpulks entspricht. Das Eintreten der Staubedingung ist hier durch die Unterschreitung einer Geschwindigkeit von 3 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ definiert, das Verlassen der Staubedingung bei Überschreiten von 5 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$. In der Ausgabedatei des Stauzählers wird für jedes Zeitintervall die maximale und mittlere Rückstaulänge angegeben.

Zur Bewertung der Zuflussregelung ist die Länge des Rückstaus nur insofern relevant, als sie einen durch die Rampengeometrie vorgegebenen Maximalwert nicht überschreiten sollte. Von diesem Maximalwert hängt die Position des zu verwendenden Rückstaudetektors ab, die hier zu 100 m Abstand von der Haltelinie gewählt wurde. Wenn die Länge des Rückstaus diesen Wert überschreitet, sollte die Zuflussregelung die zulässige Zuflussrate erhöhen, um den Rückstau wieder abbauen zu können.

Ein weiterer relevanter Effekt des Rückstaus ist die entstehende Wartezeit. Diese wird jedoch schon in den Messungen der Reisezeit erfasst und spielt daher hier keine weitere Rolle. Falls die Anschlussstelle im Bereich bebauter Gebiete liegt, führt ein langer Rückstau eventuell zu höherer Lärm– und Emmissionsbelastung. Diese Effekte sollten je nach Anwendungsfall bedacht werden, werden jedoch in dieser Arbeit nicht untersucht.

5. Implementation des Simulationsmodells und der Regelung

Die Erstellung eines Simulationsmodells in VISSIM erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst wird das Straßennetz aufgebaut. Die Verkehrsnachfrage wird dann über Zuflüsse am Rand des Netzes definiert. Hierbei werden für den Vergleich der Zuflussregelungsverfahren mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Belastungen erstellt.

Nach der Festlegung der Signalgruppen und des Steuerungsverfahrens für eine Lichtsignalanlage können auf den Strecken die zugehörigen Lichtsignalgeber platziert werden. Die Implementation der Regelung erfolgt über die Programmiersprache VAP, mit der die Lichtsignalanlage abhängig von der Verkehrssituation gesteuert werden kann.

5.1. Aufbau des betrachteten Straßennetzes

Die Geometrie der Anschlussstelle ist der Darstellung in Abbildung 2.1 auf Seite 3 nachempfunden. Die Schnellstraße wird dabei in 3 Abschnitte unterteilt, die in VISSIM als 3 verschiedene Strecken definiert werden: der Abschnitt vor der Anschlussstelle, der Verflechtungsbereich und der darauf folgende Streckenabschnitt. Dies ist notwendig, da der Verflechtungsbereich als dreispurige Strecke modelliert wird, die Abschnitte davor und danach sind zweispurig.

Der Abstand von der Haltelinie am Lichtsignalgeber zum Ende des Verflechtungsbereiches beträgt 200 m, damit ein einfahrender LKW noch auf 80 $\frac{km}{h}$ beschleunigen kann, bevor er sich auf die Hauptfahrbahn einfädelt [ST01, S. 26].

Die Länge des betrachteten Schnellstraßenabschnittes beträgt 1,5 km. Die Anschlussstelle befindet sich etwa in der Mitte davon. Abbildung 5.1 auf der nächsten Seite zeigt das in VISSIM modellierte Verkehrsnetz des Untersuchungsraumes.

Wie in Abschnitt 3.2.3 auf Seite 21 erläutert, ist zur Vermeidung von Randeinflüssen am Beginn der Strecken des betrachteten Netzes eine Einfahrstrecke notwendig. In dieser Untersuchung wurde eine Einfahrstrecke für die Schnellstraße von 1,5 km gewählt, sodass ein mit 80 $\frac{km}{h}$ fahrender LKW noch von einem 10 s später eingesetzten LKW mit 95 $\frac{km}{h}$ eingeholt werden kann. So kann das auf Autobahnen häufige Phänomen hintereinanderfahrender LKW wenigstens angenähert werden.

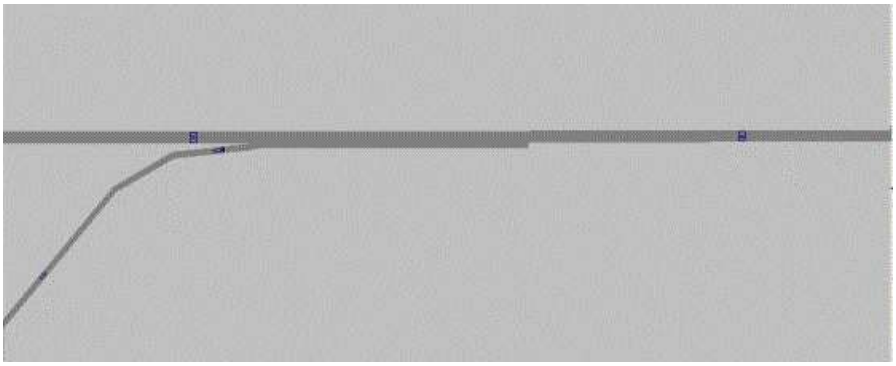


Abbildung 5.1.: Untersuchtes Verkehrsnetz als VISSIM–Streckenmodell

Für die Auffahrt zur Schnellstraße ist eine lange Einfahrstrecke nicht erforderlich, da hier in erster Linie eine Warteschlange modelliert werden soll. Weitere verkehrsdynamische Einflüsse können vernachlässigt werden. Es muss nur sichergestellt werden, dass die Strecke lang genug ist, um alle Fahrzeuge aufzunehmen, da Fahrzeuge, die wegen Platzmangels nicht mehr eingesetzt werden können, von VISSIM gelöscht werden. Hierfür wird — nach Erkenntnissen aus vorhergehenden Testsimulationen — eine Streckenlänge von 1 km benötigt.

Um die Simulation vom leeren Anfangszustand in eine sinnvolle Verkehrssituation zu bringen, ist eine Anlaufphase vor dem eigentlichen Untersuchungszeitraum notwendig. Diese wurde hier zu 5 Minuten gewählt, was gut ausreicht, da ein Fahrzeug mit 80 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ für den simulierten Streckenabschnitt weniger als 3 Minuten benötigt. Dadurch wird die untersuchte Strecke zu Beginn des Untersuchungszeitraumes vollständig mit Fahrzeugen gefüllt sein.

5.2. Definition der getesteten Szenarien

Die Auswirkungen der beiden Zuflussregelungsverfahren werden anhand von drei in den Rahmenbedingungen unterschiedlichen Szenarien getestet und der Verkehrssituation ohne Zuflussregelung gegenübergestellt. In diesen Szenarien sollen relevante Aspekte typischer Verkehrssituationen nachgebildet werden.

Allen Szenarien gemeinsam ist die Zusammensetzung der verwendeten Verkehrsströme: Im durchgehenden Verkehr beträgt der LKW–Anteil 12 %, im einfahrenden Verkehr sind es nur 8 %.

5.2.1. Szenario Standardbelastung

In diesem Szenario wird eine konstante Verkehrsnachfrage mittlerer Größe für die durchgehende Strecke und die Einfahrt angenommen. Damit sollen zum einen die Auswirkungen der Zuflussregelung bei mäßiger Belastung untersucht werden, zum anderen können bei konstanter Belastung Unterschiede in den Regelverfahren besser untersucht werden. Anhand dieses Szenarios wird daher das Rauschen des Regler–Stellsignals bewertet.

Die Verkehrsnachfrage ist hierbei 3200 $\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ über die Schnellstraße und 400 $\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ über die Einfahrt. Damit ist die Gesamtbelastung stromabwärts 3600 $\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$, was bei einer angenommenen Kapazität von 4400 $\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ einer moderaten Auslastung von ca. 80 % entspricht. Diese Belastung wird auch in den folgenden Szenarien als *Standardbelastung* für Erholungsphasen im Verkehrsablauf verwendet.

Die Untersuchungsdauer beträgt in diesem Szenario 2 Stunden, was für konstante Rahmenbedingungen relativ lang ist. Dazu kommt noch die Anlaufphase.

5.2.2. Szenario Kapazitätsauslastung

In diesem Szenario soll die Kapazität, die auf der Schnellstraße stromabwärts der Anschlussstelle zur Verfügung steht, für eine kurze Zeit voll ausgelastet werden. Bei dem so entstehenden instabilen Verkehrszustand wird es durch kleine Störungen beim Einfädeln von Fahrzeugen an der Anschlussstelle zu Stausituationen auf der Schnellstraße kommen. Hierbei ist es interessant festzustellen, wie die Zuflussregelung diese Störungen verringern kann bzw. wie schnell der Stau wieder abgebaut wird.

Zu Beginn des Untersuchungszeitraumes gibt es noch eine Phase, in der die Standardbelastung verwendet wird, um einen großen Vorlauf vor der hohen Belastung zu haben. Danach folgt die Phase der Auslastung, in der die gesamte Verkehrsnachfrage die angenommene Kapazität von 4400 $\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ erreicht. Schließlich folgt eine lange Phase mit Standardbelastung, um die Dynamik des Stauabbaus beobachten zu können. In Tabelle 5.1 ist die in der Simulation verwendete Verkehrsnachfrage aufgelistet.

Beginn [min]	Nachfrage Schnellstraße [$\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$]	Nachfrage Einfahrt [$\frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$]
0	3200	400
20	3800	600
60	3200	400

Tabelle 5.1.: Verkehrsnachfrage im Szenario Kapazitätsauslastung

Die gesamte Untersuchungsdauer beträgt 2 Stunden, die letzte Phase dauert also noch 1 Stunde.

5.2.3. Szenario Störfall

Dieses Szenario bildet die Situation eines starken Rückstaus nach, der von einer Störung an einem Querschnitt weiter stromabwärts ausgeht und eventuell bis über den Bereich der Anschlussstelle hinausreicht. Der Abstand des Querschnittes, von dem der Rückstau ausgeht, beträgt dabei 500 m von der Anschlussstelle. Die Nachfrage in diesem Szenario entspricht der Standardbelastung.

In der Simulation wird dieser Zustand durch eine sehr kurzzeitige Sperrung des linken Fahrstreifens über eine Länge von 20 m erreicht. In VISSIM lässt sich dies durch eine geeignete Routenentscheidung nachbilden, die für die Zeit der Fahrstreifenreduktion alle Fahrzeuge den Weg über die rechte Spur nehmen lässt.

Diese Routenentscheidung ist in den Untersuchungsminuten 25 bis 35 aktiv. Der gesamte Untersuchungszeitraum beträgt 120 Minuten, so dass noch mehr als 1 Stunde bleibt, in der der Stau sich wieder abbauen kann.

5.3. Implementation der Regelverfahren

Die Regler werden als VAP–Programme implementiert, die direkt als Steuerungsverfahren für die Lichtsignalanlage in VISSIM verwendet werden können, mit der die Zuflussregelung realisiert wird (Abschnitt 3.3.2 auf Seite 24). Zur Aufnahme von Verkehrsdaten können Detektoren aus VISSIM verwendet werden, siehe dazu Abschnitt 4.1 auf Seite 27.

5.3.1. Zuflussregelung als VAP–Programm

Die verwendete Programmstruktur für die Zuflussregler ist für die beiden Algorithmen gleich. Die eigentliche Berechnung der zu verwendenden Umlaufzeit findet im Unterprogramm `BerechneTakt` statt, in dem der jeweilige Algorithmus zur Berechnung der zulässigen Zuflussrate und der entsprechenden Umlaufzeit implementiert ist. Diese Routine wird in beiden Regelverfahren vom Hauptprogramm im Minutentakt aufgerufen. Das Hauptprogramm wird von VISSIM jede Sekunde ausgeführt. Hier wird die erste Signalgruppe der Lichtsignalanlage mit den entsprechenden VAP–Funktionen direkt gesteuert, um die berechnete Umlaufzeit wie in Tabelle 5.2 umzusetzen.

Signalbild	Dauer
Freigabe	2 s
Gelb	1 s
Rot	T_U - 3 s

Tabelle 5.2.: Umlauf des Signalgebers zur Zuflussregelung

Die Freigabe– und Gelbzeit wurde so gewählt, dass in VISSIM tatsächlich auch nur 1 Fahrzeug je Umlauf die Haltelinie passiert. In der Praxis kann das durch entsprechende Hinweisschilder erreicht werden, die den Autofahrer auf die Ein–Fahrzeug–je–Grün–Regelung hinweisen. Zusätzlich sollte sichergestellt werden, dass die Gelbzeit und die zulässige Geschwindigkeit zusammenpassen.

Diese Gesichtspunkte wurden hier nicht beachtet, da für diese Untersuchung nur die Einstellbarkeit eines bestimmten Zuflusses relevant ist. Dabei kann bei einer Rotzeit von 1 s ein maximaler Zufluss von $r_{max} = 900\ \frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ erreicht werden.

Der minimal einstellbare Zufluss wurde auf $r_{min} = 225\ \frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$ festgelegt, was einer Umlaufzeit von 16 s entspricht. Ein Wert dieser Größenordnung hat sich in früheren Untersuchungen als sinnvoll erwiesen, um die Einfahrt frei von Rückstau zu halten, aber dennoch eine gute Eingriffsmöglichkeit auf den Zufluss auf die Schnellstraße zu haben [Bog02], [ST01].

5.3.2. ALINEA–Zuflussregelung

Der ALINEA–Algorithmus wird nach Gleichung 2.3 auf Seite 9 implementiert. Hierbei wird der Reglerparameter $K_R = 66$ und der Sollbelegungsgrad $\hat{o} = 33$ % gewählt. Bei der im Simulationsmodell verwendeten Detektor– und Fahrzeuglänge entspricht dieser Belegungsgrad einer Verkehrsdichte von $33\frac{\text{Fhz}}{\text{km}}$. Die Zuflussrate im letzten Reglerintervall $r(k-1)$ wird durch einen Detektor an der Haltelinie gemessen und in der Berechnungsvorschrift verwendet.

Nach dieser Berechnung werden noch die Begrenzungen für die zulässige Zuflussrate angewandt, so dass der neue Wert zwischen der minimalen und der maximalen Zuflussrate liegt.

Eine Überstauung der Einfahrtrampe wird durch die Belegung des Staudetektors festgestellt. Falls hier der Wert von $o_{Staubeginn} = 0,7$ überschritten wird, wird die Anpassung des Reglers an den Rückstau–Zustand aktiv. Dieser Zustand wird erst wieder deaktiviert, wenn die Belegung des Staudetektors unter $o_{Stauende} = 0,5$ sinkt. Im Rückstau–Zustand wird weiterhin die zulässige Zuflussrate nach ALINEA berechnet, allerdings beträgt nun die minimale Zuflussrate $r'_{min} = 720\ \frac{\text{Fhz}}{\text{h}}$. Dadurch ist sichergestellt, dass die Rampe schnell geräumt werden kann.

Erweiterte PI–ALINEA–Zuflussregelung In dieser Variante des ALINEA–Algorithmus, die einem PI–Regler entspricht, wird die zulässige Zuflussrate für das nächste Reglerintervall nach Gleichung 2.6 auf Seite 12 berechnet. Dabei werden für die Reglerparameter die Werte $K_P = 15$ und $K_R = 40$ gewählt. Die oben beschriebenen Rahmenbedingungen für ALINEA bleiben erhalten.

5.3.3. Fuzzy–Zuflussregelung

Die Fuzzyzuflussregelung erfolgt in den in Abschnitt A auf Seite 61 erläuterten drei Schritten:

1. Fuzzyfizierung: Die Messwerte nach Tabelle 4.1 auf Seite 32 werden in linguistische Variablen umgewandelt.
2. Interferenz: Die Regelbasis aus Tabelle 2.1 auf Seite 13 wird auf die Eingangsvariablen angewandt.
3. Defuzzyfizierung: Der linguistische Wert für die zulässige Zuflussrate wird in einen numerischen Wert umgewandelt.

Die unscharfen Mengen, die für die Fuzzyfizierung und Defuzzyfizierung verwendet werden, sind in Abbildung 5.2 auf der nächsten Seite dargestellt. Dabei dienen die ersten sieben Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzyfizierung der Eingangsgrößen. Über die Zugehörigkeitsfunktion für die Zuflussverkehrsstärke wird der Reglerausgang nach der Interferenz defuzzyfiziert.

Die verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen werden über bis zu drei Größen parametrisiert: Den linken Beginn des Anstiegs, den Hochpunkt, an dem die Funktion den Wert 1 erreicht, und das rechte Ende des absteigenden Armes. Falls die Funktion nicht zu beiden Seiten des Hochpunktes absteigt, wird der zugehörige Parameter nicht benötigt.

Aufgrund der Form der Zugehörigkeitsfunktionen lässt sich dieser Fuzzy–Regler mit geringem numerischen Aufwand implementieren. Dies ist für die Fuzzyfizierung und insbesondere für die Defuzzyfizierung relevant: Da die betrachteten Flächen sich aus Drei– und Rechtecken zusammensetzen, kann die Berechnung des Schwerpunktes mit den entsprechenden analytischen Formeln erfolgen, ohne dass numerisch integriert werden muss.

Bogenberger verwendet in seinem Verfahren zusätzlich eine genetische Optimierung für die unscharfen Mengen, durch die der Fuzzy–Regler auf die Situation an der jeweiligen Anschlussstelle eingestellt werden muss [Bog01]. Dieser Zusatz wurde hier nicht verwendet, da nur eine fiktive Anschlussstelle betrachtet wurde. Die Anwendung eines genetischen Algorithums stellt den Regler sehr genau auf eine spezielle Verkehrssituation ein, in dieser Arbeit sollen jedoch eher die generelle Auswirkungen eines Verfahrens untersucht werden. Die Ergebnisse sind bedingt vergleichbar, da auch für die ALINEA–Varianten keine Parameteroptimierung durchgeführt wurde.

5.4. Durchführung der Simulation

Die definierten Szenarien werden jeweils mit den Zuflussregelungsverfahren aus Tabelle 5.3 auf Seite 46 in mehreren Simulationsläufen simuliert. Die Ergebnisse werden von

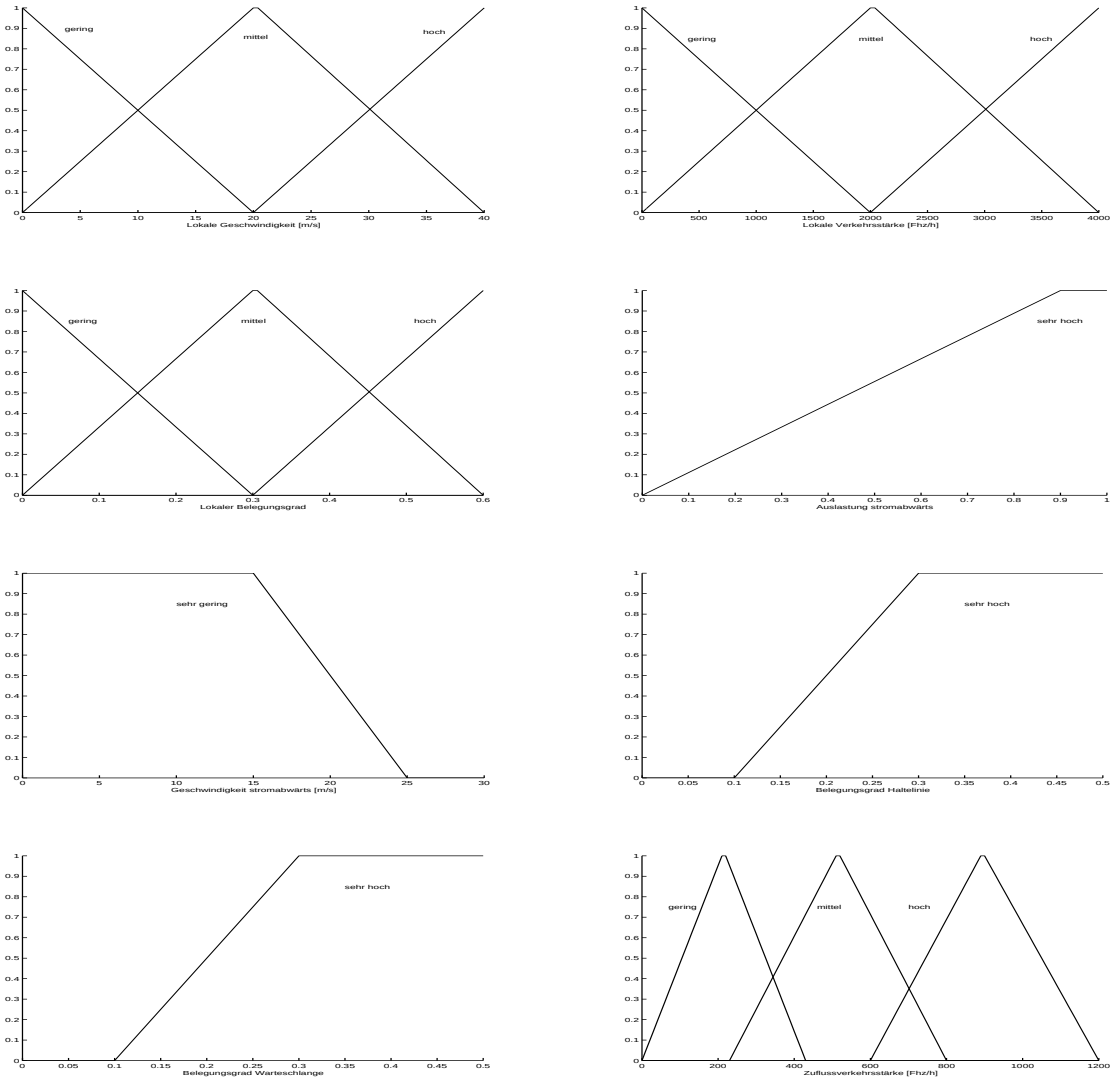


Abbildung 5.2.: Unscharfe Mengen für den Fuzzy–Zuflussregler

VISSIM in spezielle Dateien geschrieben, wobei für jedes Szenario und jeden Simulationslauf eigene Dateien angelegt werden. So ist nach der Simulation eine detaillierte Auswertung möglich.

Die Anzahl der Realisierungen eines Szenarios mit einem bestimmten Regelverfahren wurde auf $n = 20$ gesetzt. Die Konfidenzintervalle für den daraus berechneten Mittelwert sind mit den Ergebnissen angegeben. Die Abweichungen vom tatsächlichen Mittelwert sind bei den hier erhaltenen Ergebnissen klein genug, um zu statistisch signifikanten Aussagen zu kommen.

1.	keine Zuflussregelung
2.	ALINEA
3.	PI–ALINEA
4.	Fuzzy–Zuflussregelung nach Bogenberger

Tabelle 5.3.: Verwendete Verfahren für die Zuflussregelung

6. Auswertungen und Vergleich

6.1. Methodik der Auswertung

Die Auswertung der Simulationsergebnisse aus den verschiedenen Szenarien wurde über Skripte automatisch durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden aus den Ergebnissen der verschiedenen Realisierungen jeweils die relevanten Kenngrößen berechnet. Aus diesen Einzelwerten wurde für jede Kenngröße der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt.

In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der Auswertungen für die einzelnen Szenarien beschrieben. Die Tabellen für die Kenngrößen enthalten dabei die Mittelwerte der jeweiligen Kenngrößen und mit ± gekennzeichnet das jeweilige 95%–Konfidenzintervall für den tatsächlichen Mittelwert, das sich für eine Stichprobe mit 20 Elementen nach der folgenden Gleichung berechnen lässt (s.a. Abschnitt 3.2.3 auf Seite 21):

$$|\mu - \overline{x}| \leq 0.468s \tag{6.1}$$

Anhand des Bewertungsmaßstabes der Reisezeit können die einzelnen Realisierungen sortiert werden. Zur Veranschaulichung des Verkehrsablaufs werden Diagramme von Zeitverläufen verschiedener Verkehrsgrößen erstellt. Diese Diagramme wurden je nach Anwendungsfall aus den Ergebnissen verschiedener Simulationsläufe erstellt: entweder aus den Ergebnissen des Simulationslaufes mit der geringsten Reisezeit — die beste Simulation für den betrachteten Fall — oder aus dem Simulationslauf mit der Reisezeit, die dem Mittelwert aus allen Durchläufen am nächsten liegt — die mittlere Simulation.

Das Rauschen des Reglersignals wurde anhand des Simulationslaufes mit der geringsten Systemreisezeit ermittelt. Mit der zur Verfügung stehenden Software war eine Mittelwertbildung aus verschiedenen Simulationsläufen leider nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar.

6.2. Ergebnisse der einzelnen Szenarien

6.2.1. Ergebnisse des Szenarios Standardbelastung

Die Simulation mit der Standardbelastung führte zu den in Tabelle 6.1 auf der nächsten Seite aufgelisteten Kenngrößen.

Kenngröße	ungeregelt	ALINEA	PI–ALINEA	Fuzzy–Regler
Fahrzeuge gesamt	7144 ± 7.4	7144 ± 20.5	7141 ± 9.4	7140 ± 10.5
einfahrende Fahrzeuge	793 ± 5.0	793 ± 8.7	790 ± 4.2	789 ± 4.6
Systemreisezeit [Fhz h]	115.6 ± 0.7	117.8 ± 1.6	122.7 ± 0.8	123.4 ± 0.6
Wartezeit [Fhz h]	4.57 ± 0.1	6.3 ± 0.8	10.6 ± 0.4	11.91 ± 0.2
Reisegeschwindigkeit Schnellstraße [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$]	91.2 ± 0.2	90.8 ± 3.6	90.3 ± 1.8	90.7 ± 1.1
Wartezeit an Einfahrt je Fhz. [s]	20.7 ± 0.5	28.7 ± 0.7	48.5 ± 0.4	54.3 ± 0.3
Systemverkehrsleistung [Fhz km]	10560 ± 10	10560 ± 30	10550 ± 14	10550 ± 15
Maximale Warteschlangenlänge [m]	0	95.2 ± 41.8	125.8 ± 26	100.3 ± 10.3
Mittlere Warteschlangenlänge [m]	0	2.8 ± 2.1	4.9 ± 1.5	7.9 ± 0.8
Rauschen des Reglersignals [$\frac{1}{\text{min}}$]	—	0.0190	0.0158	0.0174

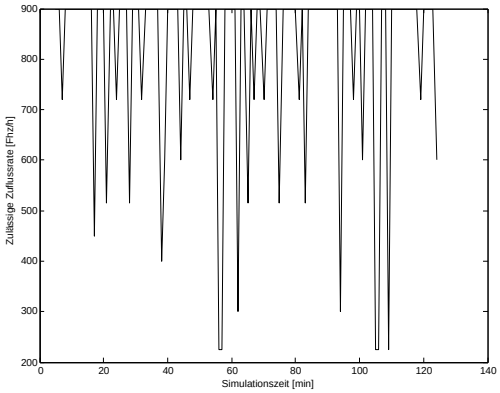
Tabelle 6.1.: Ergebnisse des Szenarios Standardbelastung

In diesem Szenario ergeben sich durch die Zuflussregelung keine Vorteile in der Reisezeit. Die zum Teil etwas höhere Reisezeit bei Zuflussregelung ergibt sich durch die längere Wartezeit für die Einfahrt. Die Reisegeschwindigkeit auf der Schnellstraße wird nicht beeinflusst.

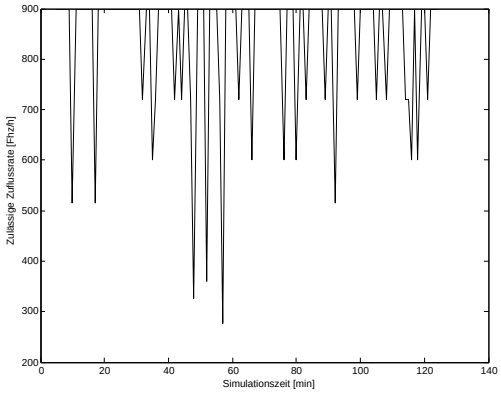
Im Vergleich der Regelungsverfahren schneidet ALINEA in der Systemreisezeit etwas besser ab als die beiden anderen Verfahren. Allerdings sieht man bereits an der Größe des Konfidenzintervalls, die proportional zur Standardabweichung der untersuchten Stichprobe ist, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Simulationsläufen bei ALINEA im Vergleich deutlich höher sind. PI–ALINEA ist also in diesem Szenario deutlich weniger anfällig gegenüber den zufälligen Schwankungen im Verkehrsablauf als die ursprüngliche Variante von ALINEA. Hier besteht vermutlich ein Zusammenhang dazu, dass ALINEA deutlich stärkere Schaltungen ausführt als die anderen Verfahren, wie am höheren Rauschwert zu erkennen ist.

Abbildung 6.1 auf der nächsten Seite zeigt die geschalteten zulässigen Zuflussraten für die verschiedenen Regler. Da die beiden ALINEA–Varianten für die hier betrachtete Belastung den Soll–Belegungsgrad nicht erreichen können, lassen sie meistens die maximal mögliche Zuflussrate zu. Zufällige Schwankungen führen zu kurzzeitig geringeren Zuflussraten. Mit der PI–Erweiterung treten diese Verringerungen seltener auf und sind von der Amplitude geringer. Die Fuzzy–Regelung verhält sich im Mittel konstant um die Zuflussrate, die durch die Zugehörigkeitsfunktionen und die Regelbasis der mittleren

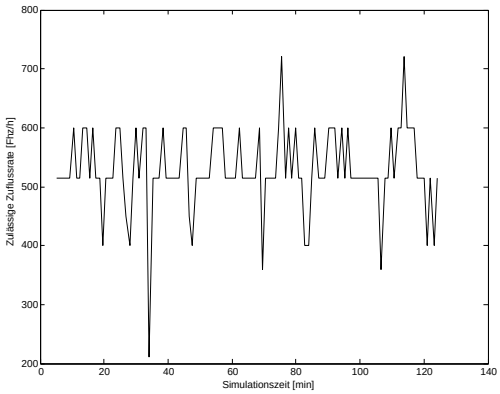
Vekehrssituation entspricht.



(a) ALINEA



(b) PI–ALINEA



(c) Fuzzy–Regler

Abbildung 6.1.: Zulässige Zuflussrate für das Szenario Standardbelastung

6.2.2. Ergebnisse des Szenarios Kapazitätsauslastung

Die Kenngrößen für dieses Szenario sind in Tabelle 6.2 auf der nächsten Seite aufgelistet.

Für dieses Szenario ergeben sich durch die Zuflussregelung leichte Verbesserungen in der Systemreisezeit, die durch ein Zurückhalten des zufließenden Verkehrs entstehen. Dieser muss dadurch höhere Wartezeiten an der Einfahrt auf sich nehmen. Ein damit einhergehender Effekt ist eine Erhöhung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit auf der

Kenngröße	ungeregelt	ALINEA	PI–ALINEA	Fuzzy–Regler
Fahrzeuge gesamt	7854 ± 15.8	7862 ± 10.5	7862 ± 11.8	7863 ± 10.6
einfahrende Fahrzeuge	925 ± 3.0	924.5 ± 3.1	925 ± 3.0	924 ± 2.8
Systemreisezeit [Fhz h]	175.3 ± 3.5	169.5 ± 4.4	169.4 ± 3.9	172.6 ± 4.7
Wartezeit [Fhz h]	6.2 ± 0.1	15.5 ± 1.1	16.1 ± 1.0	23.3 ± 1.1
Reisegeschwindigkeit Schnellstraße [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$]	65.6 ± 0.2	72.2 ± 4.3	72.5 ± 4.1	74.6 ± 4.4
Wartezeit an Einfahrt je Fhz. [s]	24.3 ± 1.4	60.5 ± 1.7	62.7 ± 1.4	91.0 ± 1.9
Systemverkehrsleistung [Fhz km]	11600 ± 23	11610 ± 15	11610 ± 17	11610 ± 15
Maximale Warteschlangenlänge [m]	0	251.3 ± 17.0	274.4 ± 13.9	313.1 ± 25.4
Mittlere Warteschlangenlänge [m]	0	26.3 ± 4.0	29.6 ± 3.8	59.18 ± 4.8
Rauschen des Reglersignals [$\frac{1}{\text{min}}$]	—	0.0249	0.0222	0.0179

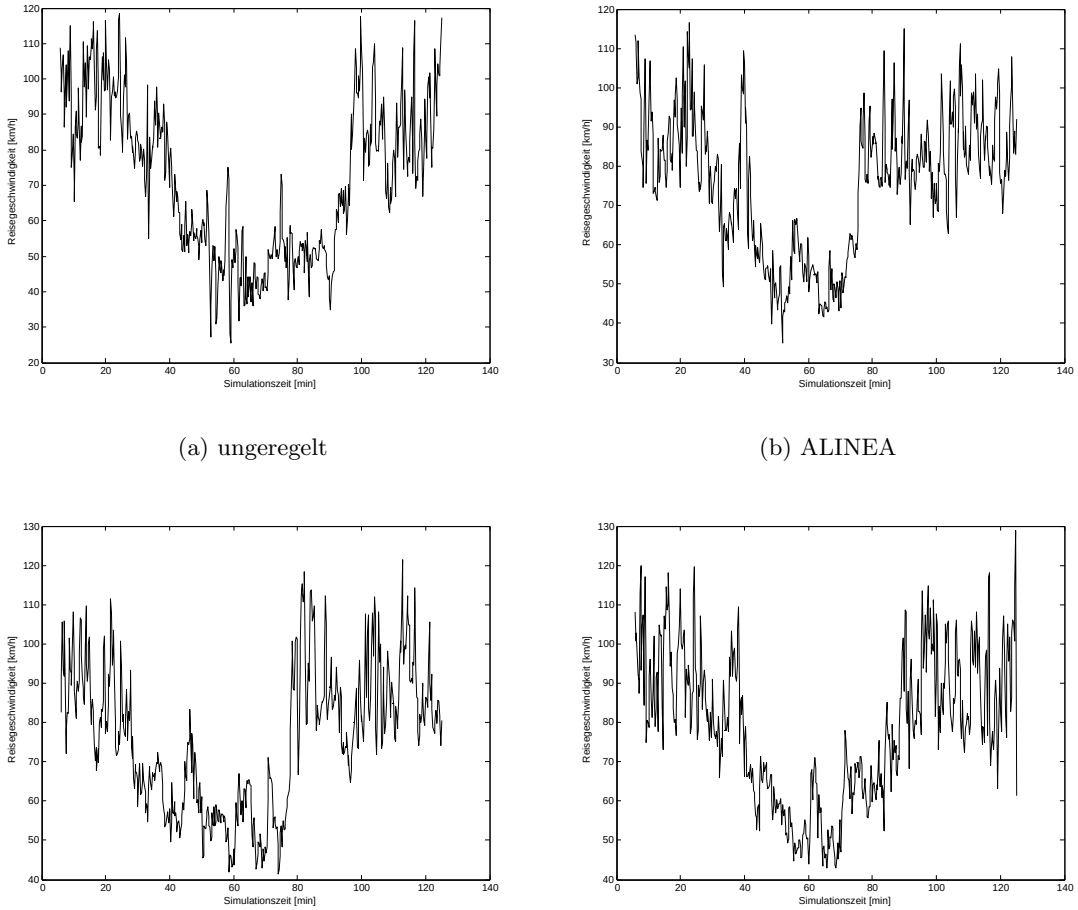
Tabelle 6.2.: Ergebnisse des Szenarios Kapazitätsauslastung

Schnellstraße von 7 – 9 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$. Dies gilt jedoch nur für den über die gesamte Untersuchungszeit gemittelten Wert. Die Zeitverläufe der erreichten Reisegeschwindigkeit des mittleren Simulationslaufes (Abbildung 6.2 auf der nächsten Seite) ergeben ein genaueres Bild: Während der Dauer der hohen Verkehrsnachfrage ist die Reisegeschwindigkeit auf der Schnellstraße für den geregelten Fall um ca. 10 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ höher als ohne Zuflussregelung. Für die restlichen Zeiten ergibt sich kein wesentlicher Unterschied, was nach den Ergebnissen aus dem Szenario Standardbelastung zu erwarten war.

Zusätzlich fällt hier auf, dass die Zeitdauer, in der der Verkehr beeinträchtigt ist, im ungeregelten Fall wesentlich länger ist als in den Fällen mit Zuflussregelung. Dieser Effekt soll in der Auswertung des Störfall–Szenarios noch genauer untersucht werden.

Der in der Einfahrt entstehende Rückstau nimmt in diesem Szenario für alle Regelverfahren einen sehr hohen maximalen Wert an. Dieser Maximalwert wird jedoch eventuell nur für eine sehr kurze Zeit erreicht. Die Zeitverläufe der jeweils in einer Minute – also gerade dem Reglertakt – maximalen Rückstaulängen erlauben hier eine differenzierte Betrachtung. Sie sind für eine mittlere Simulation in Abbildung 6.3 auf Seite 52 dargestellt.

Man erkennt, dass die beiden ALINEA–Varianten den Rückstau auch während der Zeit der hohen Verkehrsnachfrage immer wieder abbauen können. Dem Fuzzy–Regler dagegen gelingt dies in diesem Zeitraum nicht, sondern erst nach dem Rückgang der Verkehrsnachfrage auf die Standardbelastung. Die Rückstauvermeidung des Fuzzy–Reglers greift



(a) ungeregelt

(b) ALINEA

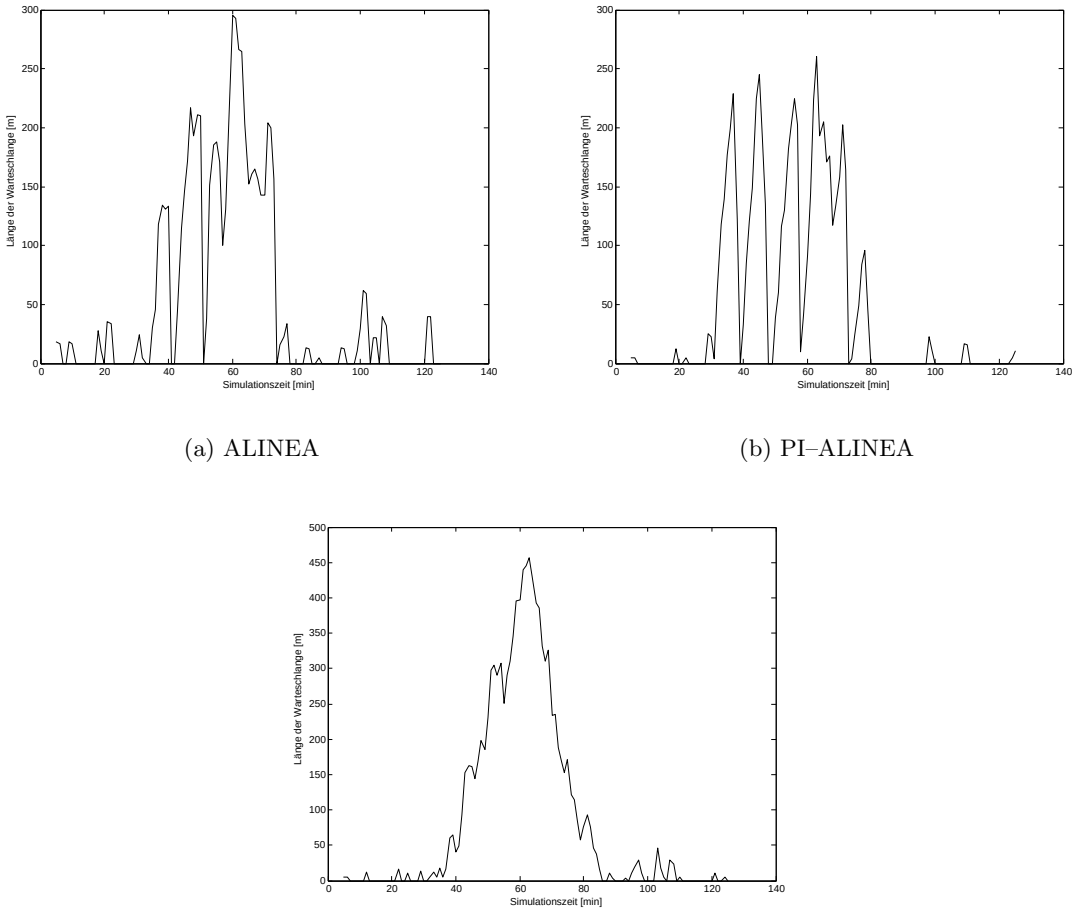
(c) PI–ALINEA

(d) Fuzzy–Regler

Abbildung 6.2.: Reisegeschwindigkeit auf der Schnellstraße im Szenario Kapazitätsauslastung

hier nicht stark genug ein. Dies liegt daran, dass für den Fuzzy–Regler das Ziel "Rückstau vermeiden" keine absolute Priorität besitzt. Mit einer Änderung der Gewichtung in der Regelbasis könnte man hier die Prioriäten noch etwas verlagern. Eine absolute Priorisierung ist jedoch mit Fuzzy–Prinzipien nicht möglich und müsste – wie bei ALINEA – in einer übergeordneten Entscheidungsebene implementiert werden.

Die Größe des Konfidenzintervalls für die Mittelwerte — und damit die Standardabweichung der Ergebnisse für die einzelnen Simulationsläufe — ist in diesem Szenario für alle Zuflussregelungs–Verfahren etwa gleich. Die Beobachtung aus dem Szenario Standardbelastung, in dem PI–ALINEA zu deutlich geringeren Unterschieden in den einzelnen Simulationsläufen führte, wiederholt sich hier nicht. Die Anzahl der Schaltungen im



(a) ALINEA

(b) PI–ALINEA

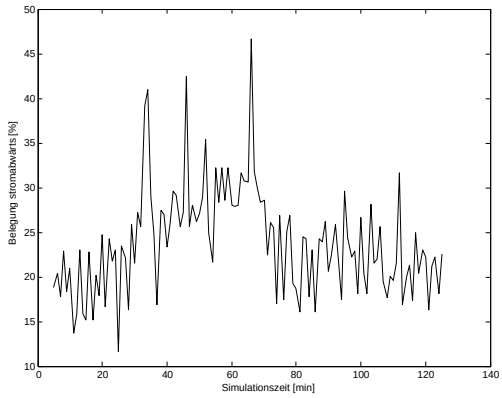
(c) Fuzzy–Regler

Abbildung 6.3.: Maximale Rückstaulängen im Szenario Kapazitätsauslastung

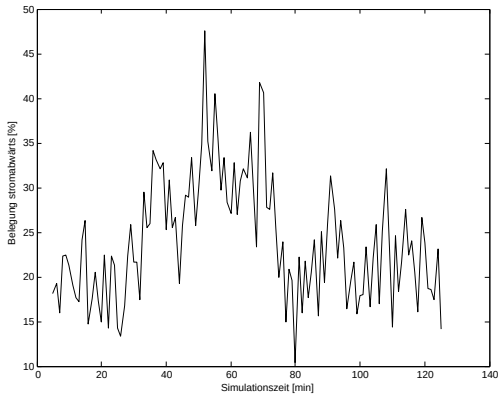
Reglersignal, also der Rauschwert des Stellsignals, ist bei ALINEA allerdings wieder etwas höher als bei PI–ALINEA. Da die beiden ALINEA–Varianten mehr Schaltungen ausführen müssen, um den Rückstau abzubauen, ist der Rauschwert des Fuzzy–Reglers hier nicht direkt vergleichbar.

Für die Untersuchung der ALINEA–Varianten ist hier noch eine Betrachtung der Regelgröße Belegungsgrad interessant. Die Zeitverläufe für jeweils zwei Simulationen sind in Abbildung 6.4 auf der nächsten Seite dargestellt. Für beide Simulationen ist aus diesen Zeitverläufen zu erkennen, dass PI–ALINEA etwas besser auf den Sollwert von 33 % einschwingt als die ursprüngliche ALINEA–Variante, wie es aus der Regelungstheorie auch zu erwarten war. Der Belegungsgrad ist allerdings stark verrauscht, so dass die hier gewonnenen Ergebnisse nur als Indizien für ein schwächeres Überschwingen der PI–

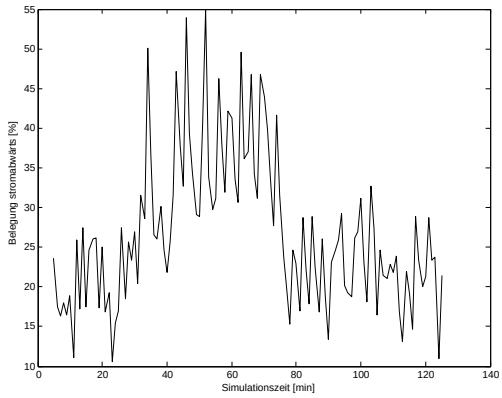
Erweiterung von ALINEA zu verstehen sind. Für eine genauere Aussage wären noch weitere Untersuchungen zu diesem Punkt nötig.



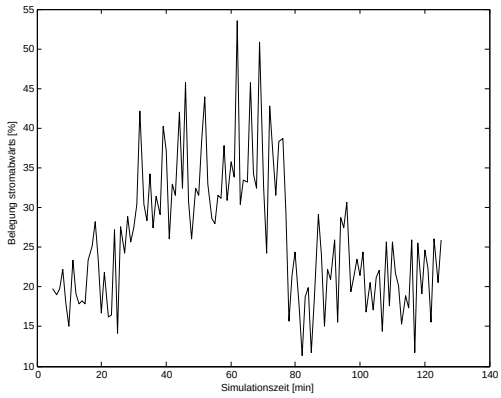
(a) ALINEA bei bester Reisezeit



(b) PI–ALINEA bei bester Reisezeit



(c) ALINEA bei mittlerer Reisezeit



(d) PI–ALINEA bei mittlerer Reisezeit

Abbildung 6.4.: Belegungsgrad stromabwärts bei ALINEA–Zuflussregelung

6.2.3. Ergebnisse des Störfall–Szenarios

Tabelle 6.3 auf der nächsten Seite zeigt die Kenngrößen, die sich beim Störfall–Szenario ergeben.

Die Systemreisezeit ist hier für alle Verfahren etwa gleich hoch. Die Zuflussregelung erreicht mit allen Verfahren eine höhere mittlere Geschwindigkeit auf der Schnellstraße, die in der Summe durch eine höhere Wartezeit an der Einfahrt ausgeglichen wird. Die

Kenngröße	ungeregelt	ALINEA	PI–ALINEA	Fuzzy–Regler
Fahrzeuge gesamt	6771 ± 6.0	6758 ± 11.6	6758 ± 10.9	6768 ± 11.5
einfahrende Fahrzeuge	793 ± 5.0	792 ± 4.2	792 ± 4.2	791 ± 4.1
Systemreisezeit [Fhz h]	156.6 ± 1.8	156.4 ± 2.1	156.1 ± 2.5	157.1 ± 2.3
Wartezeit [Fhz h]	6.3 ± 0.3	12.9 ± 0.6	13.4 ± 0.7	12.6 ± 0.8
Reisegeschwindigkeit Schnellstraße [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$]	63.6 ± 1.4	66.5 ± 2.7	66.9 ± 3.5	66.2 ± 3.8
Wartezeit an Einfahrt je Fhz. [s]	28.8 ± 0.7	58.8 ± 0.8	61.0 ± 0.9	57.3 ± 0.8
Systemverkehrsleistung [Fhz km]	9998 ± 8.8	9978 ± 17	9978 ± 16	9994 ± 16
Maximale Warteschlangenlänge [m]	0	206.0 ± 9.7	208.6 ± 9.9	174.9 ± 25.2
Mittlere Warteschlangenlänge [m]	0	21.0 ± 2.1	23.3 ± 2.8	18.6 ± 3.3
Rauschen des Reglersignals [$\frac{1}{\text{min}}$]	—	0.0216	0.0213	0.0175

Tabelle 6.3.: Ergebnisse des Störfall–Szenarios

Rückstaulängen bleiben bei allen Verfahren begrenzt. In diesem Szenario schafft es auch die Fuzzy–Zuflussregelung, den Rückstau in Grenzen zu halten.

Besonders interessant ist in diesem Szenario, wie lange es dauert, bis der durch die Störung aufgebaute Rückstau wieder abgebaut ist. Tabelle 6.4 zeigt die Mittelwerte der Zeitdauer, für die der Verkehrsablauf auf der Schnellstraße gestört ist, zusammen mit den jeweiligen 95 %–Konfidenzintervallen für den Mittelwert. Die Störung wird hier dadurch definiert, dass auf der Schnellstraße über einen längeren Zeitraum keine Reisegeschwindigkeit über 80 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ erreicht wird — zum Vergleich: im Szenario Standardbelastung war die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit 90 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

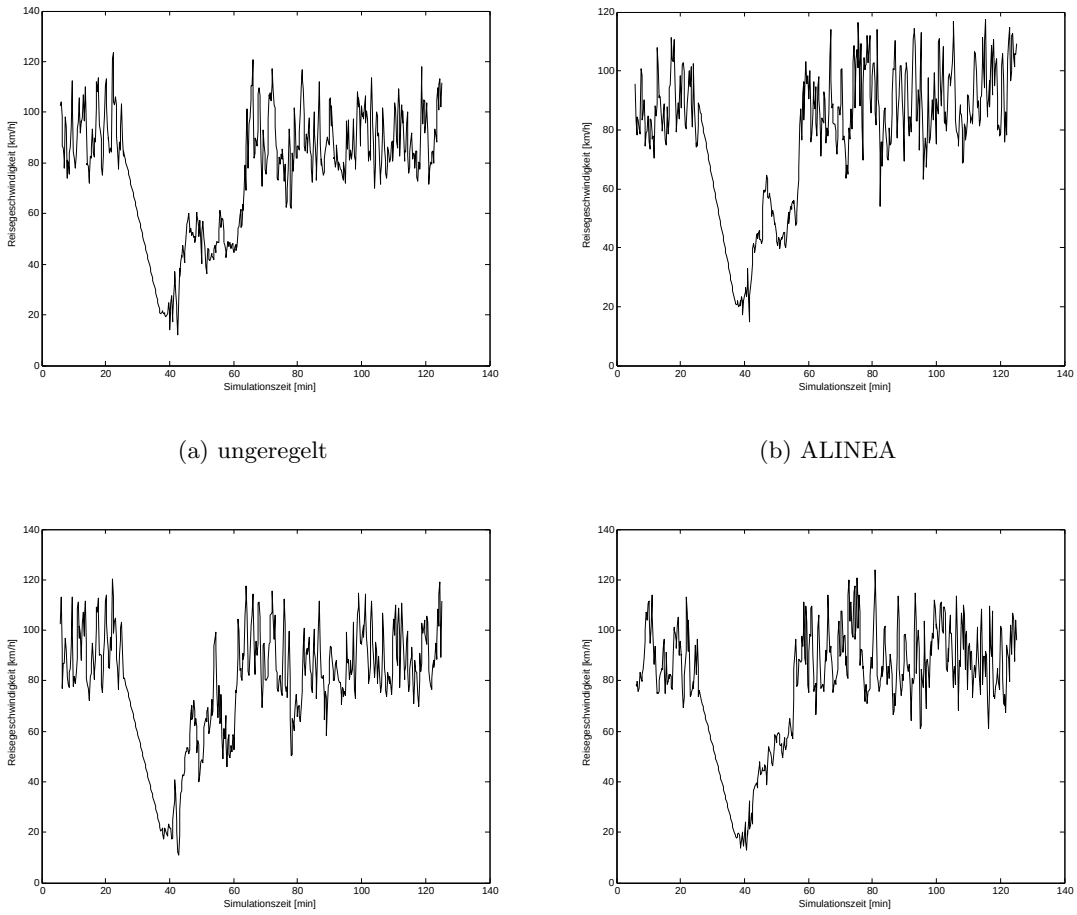
Regelverfahren	Staudauer [min]
ohne Regler	42.7 ± 2.9
ALINEA	37.8 ± 2.5
PI–ALINEA	37.0 ± 3.0
Fuzzy–Regler	37.8 ± 2.8

Tabelle 6.4.: Mittlere Dauer der Verkehrsstörung im Störfall–Szenario

Durch die Zuflussregelung wird der Stau um ca. 12 % schneller abgebaut als ohne Regelung. Hierbei sind alle verwendeten Algorithmen etwa gleichwertig. Diese Verbesserung

wird durch ein Zurückhalten des zufließenden Verkehrs erreicht. Für die hier gewählte Verkehrsnachfrage gleichen sich die Verbesserungen für den durchgehenden Verkehr und die Verschlechterungen für den zufließenden Verkehr jedoch noch aus.

Eine weitere positive Auswirkung ist aus den Zeitverläufen der Reisegeschwindigkeit über die Schnellstraße ersichtlich, die in Abbildung 6.5 für die beste Simulation dargestellt sind. Hier ist zu erkennen, dass während des Abbaus des Rückstaus im Zeitintervall von Simulationsminute 40 bis ca. 60 die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit über die Schnellstraße um ca. 5 – 10 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ höher ist als im ungeregelten Fall. Dieses Ergebnis passt zu den Beobachtungen aus dem Szenario Kapazitätsauslastung.



(a) ungeregelt

(b) ALINEA

(c) PI–ALINEA

(d) Fuzzy–Regler

Abbildung 6.5.: Reisegeschwindigkeit auf der Schnellstraße im Störfall–Szenario

6.3. Bewertung der Ergebnisse

6.3.1. Wirksamkeit der Zuflussregelung

Das Szenario Standardbelastung hat gezeigt, dass für geringe bis mittlere Verkehrsnachfragen keine positiven Auswirkungen der Zuflussregelung zu erwarten sind. Die Störungen durch den zufließenden Verkehr wirken sich hier nicht stark genug auf den Verkehrsfluss auf der Schnellstraße aus, um diesen deutlich zu stören.

Anders ist die Situation bei einer hohen Verkehrsnachfrage: Das Szenario Kapazitätsauslastung hat gezeigt, dass in dieser Situation die Verkehrsqualität durch die Zuflussregelung insgesamt verbessert wird. Hier ist natürlich zu bedenken, dass diese Verbesserungen dennoch eine höhere Wartezeit für den zufließenden Verkehr bedeuten. In der Summe überwiegen jedoch die positiven Auswirkungen.

Die hohe Verkehrsnachfrage war im Szenario Kapazitätsauslastung nur für ein Drittel des Untersuchungszeitraumes aktiv. Da die Zeitgewinne im zuflussgeregelten Fall während der Zeit der hohen Nachfrage entstehen, kann man vermuten, dass bei einer längeren Dauer der hohen Nachfrage der Vorteil der Zuflussregelung noch deutlicher sichtbar wird. Eine weitere Verbesserung ist bei mehr Fahrstreifen auf der Schnellstraße zu erwarten. Damit wird auch eine höhere Verkehrsnachfrage über die Schnellstraße bestehen, und das Gewicht des durch die Zuflussregelung bevorteiligten Verkehrsstroms in der Berechnung der Gesamtreisezeit nimmt zu. Bogenberger etwa erreicht in seinen Szenarien eine Reduktion in der Gesamtreisezeit von über 20 % durch die Zuflussregelung [Bog01].

Im Störfall–Szenario war die Gesamtreisezeit im geregelten Fall etwa gleich hoch wie im ungeregelten Fall. Die genauere Untersuchung zeigte, dass der Rückstau mit einer zuflussgeregelten Einfahrt schneller abgebaut werden kann als ohne Zuflussregelung. Auch hier kann man annehmen, dass bei einer höheren als der hier gewählten Verkehrsnachfrage die durch die Zuflussregelung gewonnen Zeiten auf der Schnellstraßen die Wartezeiten an der Einfahrt überwiegen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Zuflussregelung bei einer hohen Verkehrsnachfrage zu einer besseren Qualität des Verkehrsablaufes im Bereich der Anschlussstellen führt. Dieser Gesamtvorteil wird jedoch durch eine Benachteiligung des zufliessenden Verkehrs erreicht. Je nach der speziellen Konstellation im Schnellstraßennetz und der indivuellen Route eines jeden Verkehrsteilnehmers kann eine Zuflussregelung sowohl zu einer Reduktion als auch einer Erhöhung der Reisezeit führen. In der Summe über alle Verkehrsteilnehmer überwiegen jedoch bei einer insgesamt hohen Verkehrsnachfrage die Verringerungen der Reisezeit.

6.3.2. Vergleich der verwendeten Regelverfahren

Mit den beiden ALINEA–Verfahren, der ursprünglichen Variante und der PI–Erweiterung, erhält man in den Szenarien Kapazitätsauslastung und Störfall in etwa die selben Ergebnisse für die Systemreisezeit. Das Bewertungsmaß für das Rauschen im Stellsignal des Reglers war bei PI–ALINEA etwas besser, allerdings gilt dies hauptsächlich für das Szenario Standardbelastung, in dem PI–ALINEA in der Reisezeit etwas schlechter abschnitt. Im Störfall–Szenario ist praktisch kein Unterschied mehr festzustellen, ein kleiner Unterschied besteht noch im Szenario Kapazitätsauslastung.

Dieses Rauschmaß kann natürlich nicht das maßgebende Qualitätsmerkmal sein. Einen kleinen positiven Effekt kann man in einem niedrigeren Rauschmaß dennoch vermuten: Dem Autofahrer wird signalisiert, dass der Regler "weiß, was er tut" und nicht in jedem Rechentakt umschaltet. Genaue Aussagen hierzu können jedoch mit den vorhandenen Daten nicht gemacht werden.

Wenn man dann zusätzlich bedenkt, dass die Standardabweichung in den Simulationsergebnissen für die Szenarien Kapazitätsauslastung und Störfall für beide Varianten etwa gleich groß war, stellt man keine wesentliche Verbesserung durch die PI–Erweiterung fest. Der Verkehrsfluss wird durch sie nicht wesentlich stabiler im Vergleich zur ursprünglichen ALINEA–Variante. Beide Verfahren verhalten sich in etwa gleich gegenüber den zufälligen Schwankungen im Verkehrsgeschehen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen für die einzelnen Simulationsläufe führen.

Ein Unterschied konnte jedoch im Führungsfolgeverhalten für das Szenario Kapazitätsauslastung festgestellt werden: PI–ALINEA kann hier dem Sollwert für den Belegungsgrad besser folgen. Somit ist PI–ALINEA aus regelungstechnischem Blickwinkel besser. Dies hat jedoch keine oder nur sehr geringe Auswirkungen auf die verkehrstechnisch relevanten Ergebnisse wie die Reisezeit. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Modellierung des Verkehrsflusses sehr vereinfacht vorgenommen wurde, indem ein optimaler Belegungsgrad auf der Schnellstraße einer optimalen Gesamtreisezeit im System gleichgesetzt wurde. Damit können die klassichen Methoden der Regelungstechnik zwar verwendet werden, führen jedoch nicht zu ähnlich guten Ergebnissen wie in anderen Anwendungsbereichen mit einer genaueren Modellierung der Regelstrecke.

Die ungenaue Kenntnis der Regelstrecke führt zur Anwendung von Soft–Computing–Methoden wie dem Fuzzy–Regler nach Bogenberger. Dieser brachte in den Szenarien Kapazitätsauslastung und Störfall zwar Verbesserungen, konnte jedoch nur im Störfall–Szenario mit den ALINEA–Varianten mithalten. Für das Szenario Kapazitätsauslastung führten beide ALINEA–Varianten zu deutlich besseren Ergebnissen in der Systemreisezeit. Ein Grund dafür liegt natürlich in der fehlenden genetischen Optimierung des Fuzzy–Reglers, allerdings wurde auch für den ALINEA–Algorithmus keine Parameteroptimierung verwendet. Daraus kann man schließen, dass ein erfolgreicher Einsatz des Fuzzy–Regler deutlich mehr Aufwand erfordert als ALINEA — nicht nur was die zusätzlich benötigten Messungen betrifft.

Die Ergebnisse aus dem Störfall–Szenario legen nahe, dass die Stärken des Fuzzy–Reglers vor allem im Umgang mit ungewöhnlichen Verkehrssituationen liegen. Der Fuzzy–Regler führt hier zwar zu einer leicht höheren Reisezeit, in den anderen Kriterien ist er dafür etwas besser als ALINEA: Der Rückstau auf der Einfahrtsrampe ist kürzer und die Wartezeit an der Einfahrt ist ebenfalls geringer. Auch das Rauschen des Reglersignals ist deutlich geringer als bei den beiden ALINEA–Varianten.

Die ALINEA–Zuflussregelung erwartet prinzipiell feste Rahmenbedingungen für eine wirksame Regelung: Der Verkehr sollte fließen und der Belegungsgrad auch unter dem Störeinfluss der Verkehrsnachfrage über die Schnellstraße im Bereich des gewählten Sollbelegungsgrades liegen. Falls diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, wird die ALINEA–Regelung im regelungstechnischen Sinne unwirksam, da der Sollbelegungsgrad wegen der begrenzten Eingriffsmöglichkeiten nicht eingestellt werden kann.

Dieses Problem tritt bei der Fuzzy–Regelung nicht auf, sie bietet aufgrund ihrer komplexeren Struktur die Möglichkeit, auch deutlich unterschiedliche Verkehrssituationen zu erfassen und zu beeinflussen. Die Ergebnisse für die Rückstaulängen im Szenario Kapazitätsauslastung zeigen jedoch die Grenzen. Hier hat die Fuzzy–Regelung Schwierigkeiten, unterschiedliche Ziele mit einem festen Parametersatz zu erreichen. Für eine absolute Priorisierung sind — wie auch bei einem klassischen Regler — übergeordnete Umschaltmechanismen notwendig.

7. Fazit

In dieser Arbeit wurden zwei Verfahren zur Zuflussregelung mit unterschiedlichen Hintergründen einander gegenübergestellt: ALINEA, der klassische Ansatz aus der Regelungstechnik, und der Fuzzy–Regler nach Bogenberger, der insbesondere mit der genetischen Optimierung auf einem massiven Einsatz von Soft–Computing–Methoden beruht.

Durch die Zuflussregelung ergaben sich in den untersuchten Szenarien bei freiem Verkehrsfluss nur bei einer hohen Verkehrsnachfrage Vorteile in der Reisezeit. Allerdings zeigte die Zuflussregelung auch bei einem Störfall ihr Potential, den entstehenden Stau schneller aufzulösen, als es ohne Zuflussregelung möglich wäre.

Die gewonnenen Ergebnisse zeigten einen Vorteil der ALINEA–Regelung gegenüber dem Fuzzy–Regler in der Reduktion der Reisezeit. Allerdings können diese Ergebnisse nicht verallgemeinert werden. In dieser Arbeit wurden nur drei verschieden Verkehrssituationen untersucht, und der Vorteil der ALINEA–Regelung war nur für die Kapazitätsauslastung deutlich. Das Standardszenario wird hierbei nicht betrachtet, da dort die Zuflussregelung insgesamt nicht gut abschnitt.

In der Regelungstechnik ist normalerweise für einen guten Reglerentwurf ein gutes Modell der Regelstrecke notwendig. Modellunsicherheiten können bei robusten Entwürfen berücksichtigt werden, allerdings ist bei einer Abweichung vom nominellen Modell eine verminderte Regelgüte zu erwarten. Für die Regelstrecke der Zuflussregelung stehen zwar Modelle zur Verfügung, allerdings wurden diese nur wenig im Entwurf der Regler genutzt.

Damit sind mit den Ansätzen der klassischen Regelungstheorie zwar zufriedenstellende, jedoch keineswegs optimale Ergebnisse zu erwarten. Einen anderen Weg geht die Fuzzy–Zuflussregelung: Über die Soft–Computing–Methoden wird Expertenwissen und Rechenleistung in den Reglerentwurf eingebracht. Über die Optimalität der Regelgüte können jedoch auch nur sehr ungenaue Aussagen gemacht werden.

In dieser Untersuchung zeigten beide Ansätze, dass sie je nach Verkehrssituation positive Auswirkungen haben können. Obwohl der ALINEA–Algorithmus etwas überlegen war, zeigt auch die Fuzzy–Regelung in bestimmten Situationen ihren Vorteil, wie etwa im Störfall–Szenario. Zusätzlich muss auch der deutlich geringere Aufwand bei der Installation des ALINEA–Algorithmus beachtet werden.

Für hochbelastete Anschlussstellen an Schnellstraßen kann man eine Zuflussregelung auf jeden Fall empfehlen. Je nach typischen Verkehrsbelastungen, die hierbei auftreten,

muss dann das Regelungsverfahren ausgewählt werden. Dafür ist eine allgemeingültige Aussage schwierig. Das ALINEA–Verfahren ist einfach anzuwenden und liefert gute Ergebnisse. Bei entsprechenden Belastungsfällen kann es sinnvoll sein, den Einsatz des Fuzzy–Reglers zu prüfen.

Weiterführende Untersuchungen erscheinen im Bereich eines besseren Einsatzes von Verkehrsmodellen für eine optimale Zuflussregelung interessant. Hier könnten Verfahren aus den beiden Ansätzen Regelungstheorie und Soft–Computing getestet und verglichen werden. Bogenberger geht einen entsprechenden Schritt mit *genetic fuzzy online* [Bog01]. Hierbei werden die unscharfen Mengen des Fuzzy–Reglers für einen bestimmten Zeithorizont auf Basis der prognostizierten Verkehrsbelastungen durch einen genetischen Algorithmus optimiert. Damit erzielt er gute Ergebnisse. Aus dem Hintergrund der klassischen Regelungstechnik gibt es Ideen für eine *model predictive control* Strategie, wie sie etwa in [HDH01] dargestellt ist. Ein Vergleich der beiden Ansätze steht noch aus.

A. Grundlagen der Fuzzy–Methoden

Ein Fuzzy–Regler arbeitet üblicherweise in 3 Schritten:

1. Fuzzyfizierung
2. Interferenz
3. Defuzzyfizierung

Bei der Fuzzyfizierung werden die numerischen Eingangsgrößen des Reglers in linguistische Variablen umgewandelt, die durch sprachliche Terme wie z.B. *klein* oder *groß* beschrieben werden können. Dies geschieht durch unscharfe Mengen, für die jedem Element x ein Zugehörigkeitsgrad $\mu(x)$ zugeordnet wird, wobei $0 \leq \mu(x) \leq 1$.

Für jeden möglichen Term, den die linguistische Variable annehmen kann, wird eine unscharfe Menge auf Basis der möglichen numerischen Eingangswerte definiert. Indem für einen konkreten Eingangswert die Zugehörigkeit zu diesen unscharfen Mengen bestimmt wird, kann für eine linguistische Variable die entsprechende Zugehörigkeit des numerischen Wertes zu den möglichen sprachlichen Termen bestimmt werden.

Das Vorgehen ist in Abbildung A.1 auf der nächsten Seite veranschaulicht. Für eine Messung des Belegungsgrades von 0.26 wird durch die Zugehörigkeitsfunktionen für jeden sprachlichen Term der Zugehörigkeitsgrad μ bestimmt. In diesem Beispiel ist $\mu = 0.13$ für den Term *gering* und $\mu = 0.87$ für den Term *mittel*.

Nachdem alle Eingangsgrößen als linguistische Variablen bekannt sind, wird mit der Wissensbasis des Fuzzy–Reglers die Inferenz durchgeführt. Die Wissensbasis enthält die sprachlichen Regeln, nach denen der Regler operieren soll. Dies sind Ausdrücke, wie sie beispielhaft in Listing A.1 dargestellt sind.

WENN *linguistische Eingangsvariable* den Wert *Term A* hat
DANN Setze *linguistische Ausgangsvariable* auf den Wert *Term B*

Listing A.1: Fuzzy–Regel für die Interferenz

In der Interferenz werden alle Regeln angewendet, die die Wissensbasis enthält. Falls die `WENN`–Vorraussetzung der Regel mit einem Zugehörigkeitsgrad von $\mu > 0$ zutrifft, wird

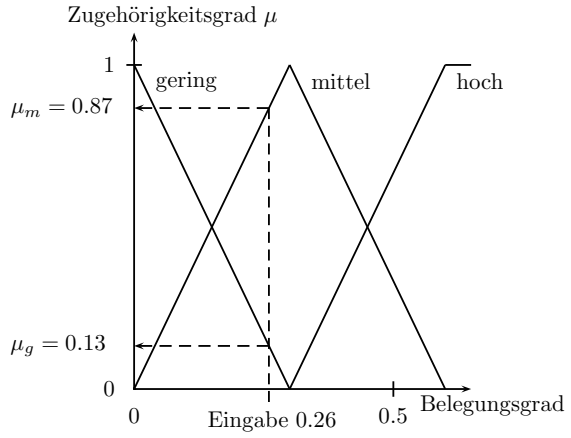


Abbildung A.1.: Fuzzyfizierung einer numerischen Größe

der entsprechende Zugehörigkeitsgrad der Ausgangsvariable ebenfalls auf diesen Wert μ gesetzt.

Wenn es mehrere Regeln in der Wissensbasis gibt, die im `DANN`–Teil dieselbe Variable und denselben Term enthalten, gibt es i.A. verschiedene Werte für den entsprechenden Zugehörigkeitsgrad. Der gültige Wert wird in der Interferenz bei einer `UND`–Verknüpfung der Regeln über einen Fuzzy–`UND`–Operator bestimmt, entsprechendes gilt bei einer `ODER`–Verknüpfung der Regeln. Hinweise zur Wahl der Fuzzy–Operatoren findet man in [Zim93, S. 15–28].

Nachdem nun für die Ausgangsvariablen zu jedem möglichen Term ein Zugehörigkeitsgrad berechnet worden ist, wird in der Defuzzyfizierung zu jeder Ausgangsvariable ein passender numerischer Ausgangswert ermittelt. Dieser kann etwa mit der *Center–of–Area* Methode berechnet werden, bei dem der Flächenschwerpunkt der Zugehörigkeitsfunktion ermittelt wird. Den numerischen Ausgangswert erhält man dann durch Projektion des Schwerpunktes auf die numerische Achse. Eine Variante ist die *Center–of–Gravity* Methode, bei der mehrfach überdeckte Flächen entsprechend mehrfach in die Schwerpunktsberechnung eingehen.

B. Regelungstechnisches Glossar

Regelfehler Abweichung der Regelgröße vom Sollwert.

Stellgröße Der vom Regler einstellbare Eingang des Systems.

Störgröße Ein vom Regler nicht beeinflussbarer Eingang des Systems.

Regelstrecke Das zu regelnde System bzw. dessen Übertragungsverhalten von der Stellgröße des Regler zur Regelgröße.

Durchgangsfrequenz Die Frequenz, aber der das Eingangssignal durch ein System um mehr als 3 dB gedämpft wird.

P–Regler Der einfachste lineare Reglertyp. Der Regelfehler wird mit einer Konstanten multipliziert als Stellgröße verwendet.

I–Regler Ein linearer Reglertyp. Der Regelfehler wird aufintegriert und mit einem konstanten Faktor multipliziert auf den Eingang der Regelstrecke gegeben.

PI–Regler Eine Kombination aus P–Regler und PI–Regler.

model predictive control Ein Reglerentwurfsverfahren, bei dem mit dem bekannten Modell der Regelstrecke versucht wird, einen optimalen Stellgrößenverlauf zu finden.

Literaturverzeichnis

[Bog01] Bogenberger, Klaus: *Adaptive Fuzzy Systems for Traffic Responsive and Coordinated Ramp Metering*, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München, Diss., 2001

[Bog02] Bogenberger, Klaus: Adaptive Zuflussregelung mit genetischen Fuzzy-Algorithmen. In: *Straßenverkehrstechnik* 3 (2002), S. 117–126

[BZ04] Brilon, Werner ; Zurlinden, Hendrik: Kapazität von Straßen als Zufallsgrösse. In: *Straßenverkehrstechnik* 4 (2004), S. 164–172

[CF87] Cremer, M. ; Fleischmann, S.: *Entwicklung eines regelungstechnischen Konzepts zum verkehrsabhängigen Einsatz von Wechselverkehrszeichen und Zufahrtsdosierungen in Schnellstrassennetzen.* Bundesministerium für Verkehr, 1987 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 505)

[Cre79] Cremer, Michael ; Syrbe, M. (Hrsg.) ; Thoma, M. (Hrsg.): *Der Verkehrsfluss auf Schnellstraßen. Modelle, Überwachung, Regelung.* Springer, 1979 (Fachberichte Messen - Steuern - Regeln 3)

[For01] Forschungsgesellschaft für Straßen– und Verkehrswesen: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.* 2001

[Fri04a] Friedrich, Markus. *Mikroskopische Verkehrsflusssimulation.* Vorlesungsskript, Universität Stuttgart. 2004

[Fri04b] Friedrich, Markus. *Verkehrstechnik und Verkehrsleittechnik.* Vorlesungsskript, Universität Stuttgart. 2004

[Föl00] Föllinger, Otto: *Laplace–, Fourier– und z-Transformation.* 7. Auflage. Hüthig Verlag Heidelberg, 2000

[HDH01] Hegyi, A. ; De Schutter, B. ; Hellendoorn, H.: Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed control. In: *Proceedings of the 1st European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their implementation on Smart Adaptive Systems (EUNITE 2001).* Tenerife, Spain, Dezember 2001, S. 260–272

[Leu88] Leutzbach, Wilhelm: *Introduction to the Theory of Traffic Flow.* Springer-Verlag, 1988

[LS87] LAPIERRE, Rudolf (Hrsg.) ; STEIERWALD, Gerd (Hrsg.): *Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band I: Grundlagen und Technologien der Verkehrsleittechnik.* Springer, 1987

[Lun01] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 1.* 3. Auflage. Springer Verlag, 2001

[PHSM97] PAPAGEORGIOU, M. ; HADJ-SALEM, H. ; MIDDELHAM, F.: ALINEA Local Ramp Metering. Summary of Field Results. In: *Transportation Research Record* (1997), Nr. 1603, S. 90–98

[PTV03a] PTV Planung Transport Verkehr AG: *Benutzerhandbuch VISSIM.* 2003

[PTV03b] PTV Planung Transport Verkehr AG: *Benutzerhandbuch VISSIM. Anhang A: Zusatzmodul VAP.* 2003

[RW00] RÅDE, L. ; WESTERGREEN, B.: *Springers Mathematische Formeln.* 3. Springer, 2000

[ST01] STÖCKER, Konrad ; TRUPAT, Stefan: *Der Einfluss einer Zuflussregelung an Anschlussstellen auf die Verbesserung des Verkehrsflusses auf Autobahnen.* Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2001 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 802)

[Weg99] WEGENER, Marco: *Verkehrsbeeinflussung durch Zuflussdosierung*, Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, RWTH Aachen, Studienarbeit, 1999

[Wie74] WIEDEMANN, Rainer: *Simulation des Straßenverkehrsflusses.* Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974

[Zim93] ZIMMERMANN, Hans-Jürgen (Hrsg.): *Fuzzy Technologien. Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale.* VDI-Verlag GmbH, 1993