

Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung
der Technischen Universität München

Netzbeeinflussung auf Autobahnen mit dynamischen Sollwerten im Entscheidungsalgorithmus

Andreas Poschinger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.- Ing. Karl Schikora
Prüfer der Dissertation:
1. Univ.-Prof. Dr./UCB Hartmut Keller
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart D. Kühne,
Universität Stuttgart

Die Dissertation wurde am 14.4.1999 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 05.07.1999 angenommen.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Erweiterung der Architektur von Steuerungsverfahren zur Verkehrsbeeinflussung vorgestellt, am Beispiel der Netzsteuerung auf Bundesautobahnen konkretisiert und programmtechnisch implementiert.

In Kapitel 1 werden die Zielsetzung der Arbeit sowie die Vorgehensweise vorgestellt.

Kapitel 2 beschreibt den Aufbau einer Netzsteuerung. Anhand der Architektur und eines Modells zur Systemzuverlässigkeit werden die einzelnen Bausteine der Netzsteuerung und deren Zusammenwirken systematisch und im Detail diskutiert. Wesentliches Ergebnis dieser Diskussion ist die Feststellung, daß die Bausteine soweit wie möglich voneinander unabhängig sein und stattdessen zur gegenseitigen Unterstützung verwendet werden sollen (Parallelschaltung). Nur Bausteine mit hoher Einzelgüte dürfen in Serie geschaltet werden. Dies erklärt den prinzipiellen Schwachpunkt klassischer prognosebasierter Verfahren, die auf voneinander abhängigen Modellen zur Zeitreihenprognose, Netzstrommodellierung und Verkehrsflußmodellierung aufbauen. Weitere Ergebnisse beinhalten Aussagen über die Verwendbarkeit von den einzelnen Bausteinen in Netzsteuerungsverfahren. Auf Basis der Diskussionsergebnisse wird eine erweiterte übertragbare Architektur für Steuerungsverfahren vorgestellt und am Beispiel der Netzsteuerung konkretisiert. Wesentliche Beiträge dieser Architektur sind die Erweiterung des Steuerungsmodells um einen Regler mittels dynamischer Sollwerte, der die erweiterte Nutzung von Realdaten erlaubt und den Anteil der Serienschaltung von Bausteinen beziehungsweise Modellen verringert, sowie eine Kombination der erweiterten Nutzung von Realdaten mit Modellwissen, das eine Parallelschaltung von Modellen implementiert und die Güte der Einzelverfahren steigert. Die Bausteine der Architektur werden in den nächsten Kapiteln detailliert beschrieben, wobei die Hauptbausteine des Verfahrens, nämlich das Verkehrsmodell, das Steuerungsmodell, die Implementierung und die (externe) Validierung als eigene logische Bausteine jeweils in einem eigenen Kapitel behandelt werden.

Im Kapitel 3 wird die Verkehrsflußmodellierung des Steuerungsverfahrens sowohl für die interne als auch die externe Bewertung entwickelt. Nach Erläuterung unterschiedlicher statischer Fundamentaldiagramme wird ein aus der Literatur bekanntes makroskopisches Verkehrsflußmodell diskutiert. Basierend auf der Diskussion des Modells im Kontext des gebundenen Verkehrs werden Modellterme der Geschwindigkeitsglei-

chung ersetzt und bisher statische Parameter als Funktionen des Verkehrskontextes dynamisiert. Das Ergebnis ist ein neues Verkehrsflußmodell, das in der Lage ist, den gebundenen Verkehr besonders qualitativ aber auch quantitativ besser zu modellieren. Zudem zeichnet sich das Modell dadurch aus, daß es in sich geschlossen ist und keine heuristische Randbedingungen benötigt. Nach der Klassifizierung und Beschreibung der netzhaften Verkehrsflußmodellierung und deren Erweiterung auf das neue Verkehrsflußmodell wird die aus der Literatur bereits bekannte Kalmanfilterung der Verkehrsflußmodelle beschrieben und um die zusätzliche Berücksichtigung des Netzaspektes beziehungsweise die Schätzung von Abbiegeraten ergänzt. Abschließend wird ein lernfähiger Neuro/Fuzzy-Approximator entwickelt, der zur Schätzung von Abbiegeraten als Funktion der Steuerungsvariablen eingesetzt wird. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang das Lernverfahren, bei dem die Fuzzymengen und Konklusionen beziehungsweise Inferenzen in einer Kaskadenstruktur anhand eines Fehlermaßes getrennt voneinander adaptiert werden. Die Modelle wurden anhand von Realdaten validiert und bewertet.

Im Kapitel 4 wird die Steuerungsmodellierung beschrieben. Nach einer Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bausteinen der Steuerungsarchitektur, insbesondere der Entscheidungsstufen des Algorithmus und Reglers, wird der Ansatz der dynamischen Sollwerte als grundlegendes neues Element des Steuerungsmodells beschrieben. Der im folgenden beschriebene Umleitungsalgorithmus, der auf Basis einer Klassifikation von Störungen und Betriebspunkteebenen entwickelt wird, nutzt dynamische Sollwerte als Ersatz für ein Prognoseverfahren mit dem Mehrwert geringerer Anforderungen an die Verkehrsmodellierung. Es werden mehrere Staulängen und Reisezeitkriterien, die auf Basis der Verkehrsflußmodellierung mit Kalmanfilterung berechnet werden, als Grundlage der Sollwertberechnung vorgestellt, und ihre Vor- und Nachteile erläutert. Der Ansatz der dynamischen Sollwerte wird zudem verwendet, um das neue Reglermodul an den Algorithmus anzukoppeln, der einen dynamischen Sollwert für die umzuleitende Fahrzeugmenge liefert. Als Mehrwert wird die erweiterte Nutzung von Realdaten zu Gunsten der Möglichkeit des Verzichts auf Modelle zur Abbiegeratenschätzung erreicht. In einem weiteren Schritt wird eine Abbiegeratenschätzung basierend auf dem Fuzzy/Neuro-Approximator der Verkehrsmodellierung in eine Parallelschaltung eingefügt. Anhand des Vergleichs der Optimierung und der dynamischen Sollwerte wird gezeigt, daß Optimierungsprobleme, die auf dynamische Sollwerte zurückgeführt werden können, ein eindeutiges globales Optimum besitzen. Es wird weiterhin gezeigt, daß dynamische Sollwerte in der Lage sind, das tatsächliche Optimum zu finden, während modellbasierte Optimierungen in der Regel nur ein durch Modellfehler verfälschtes Optimum erreichen. Die Kopplung der modellbasierten Optimierung mit den realdatenbasierten dynamischen Sollwerten in einer Parallelschaltung ermöglicht eine schnellere Konvergenz des Steuerungsverfahrens.

Im Kapitel 5 wird die softwaretechnische Implementierung des Steuerungsverfahrens beschrieben. Dabei wird auf sogenannte Entwurfsmuster als neue Methodik der In-

formatik zurückgegriffen, die auf das Problem des Steuerungsverfahrens angewendet werden. Die Verwaltung der unterschiedlichen Bausteine des Steuerungsverfahrens und der Datenmodule geschieht mittels eines selbstentwickelten Musters basierend auf der Verwendung des Stellvertreter-Musters. Das selbst entwickelte Muster entspricht in seiner Funktionalität einer statischen Ausprägung des Facetten-Musters. Die Daten werden dem Verkehrsnetz räumlich zugeordnet. Hierzu wurde ein Rahmen entwickelt, der Verkehrsnetze, Kanten, Subkanten, Segmente und Fahrzeuge zueinander in Beziehung setzt. Die Nutzung des Strategie-Musters zur Bildung von Klassenfamilien für die Elemente der räumlichen Datenzuordnung und der Bildung von Algorithmenfamilien vereinfachen deren Entwicklung. Die Nutzung des Vermittler-Musters erlaubt die Entkopplung von Algorithmen über definierte Datenschnittstellen; damit ist es möglich, den modularen Aufbau des Steuerungsverfahrens auch softwaretechnisch zu nutzen.

Kapitel 6 beschreibt die Anwendung und Validierung des Steuerungsverfahrens am Beispiel des Autobahnnetzes im Münchner Norden. Nach der Beschreibung des Testfeldes und seiner Potentiale wird ein Netzmodell entwickelt. Das Netzmodell dient als Basis der Verkehrsabbildung zur externen Bewertung des geschlossenen Regelkreises. Die Verkehrsabbildung greift auf Realdaten und eine Schätzung der Quelle-Zielmatrix zurück, die verwendet werden, um die im Kapitel 3 beschriebene netzhafte dynamische Verkehrsflußmodellierung unter Nutzung des neu entwickelten Verkehrsflußmodells zu speisen. Nach einer Beschreibung der Parametrisierung des Steuerungsverfahrens und eines Referenzszenariums der verkehrlichen Randbedingungen werden die Ergebnisse unterschiedlicher Konfigurationen des Steuerungsverfahrens gezeigt und die Tauglichkeit der Modelle bewiesen. Zudem konnten die Überlegungen zur Serien- und Parallelschaltung von Modulen auch in den Ergebnissen nachgewiesen werden.

Kapitel 7 beinhaltet eine Zusammenfassung der Arbeit mit einer stichwortartigen Zusammenfassung der neuen Beiträge sowie einen Ausblick auf mögliche zukünftige Weiterentwicklungen des Steuerungsverfahrens an sich, aber auch der in dieser vorliegenden Arbeit entwickelten Modelle.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Definition der Netzsteuerung	2
1.3	Zielstellung der Arbeit	2
1.4	Vorgehensweise und Vorschau	3
2	Entwicklung der Netzsteuerung	5
2.1	Vorgehensweise	5
2.2	Der Aufbau einer Netzsteuerung	5
2.3	Systemzuverlässigkeit	7
2.3.1	Einleitung	7
2.3.2	Reihen- und Parallelschaltung	7
2.3.3	Rechenbeispiele	8
2.3.4	Konsequenz	9
2.4	Die Steuerungstechnik	9
2.4.1	Die Sensorik	9
2.4.2	Die Aktorik	13
2.5	Das Steuerungsverfahren	16
2.5.1	Das Verkehrsmodell	16
2.5.2	Das Steuerungsmodell	25
2.6	Die Implementierung	30
2.6.1	Einleitung	30
2.6.2	Ansätze	30
2.6.3	Diskussion	31
2.6.4	Konsequenz	31
2.7	Validierung	32
2.7.1	Einleitung	32
2.7.2	Ansätze	33
2.7.3	Diskussion	34
2.7.4	Konsequenzen	34
2.8	Die Systemarchitektur der Netzsteuerung	35
2.8.1	Einleitung	35
2.8.2	Ansatz der dynamischen Sollwerte	35

2.8.3	Konkretisierung der Netzsteuerung	38
2.8.4	Architektur des Beobachters	40
2.8.5	Architektur des Algorithmus	41
2.8.6	Architektur des Reglers	41
2.8.7	Architektur der externen Bewertung	43
3	Die Verkehrsmodellierung für das Steuerungsverfahren	45
3.1	Einleitung	45
3.2	Fundamentaldiagramme	46
3.2.1	Motivation	46
3.2.2	Überblick	46
3.2.3	Diskussion ausgewählter Fundamentaldiagramme	49
3.3	Das makroskopische Verkehrsflußmodell	52
3.3.1	Einleitung	52
3.3.2	Das CREMER/PAYNE-Modell	53
3.3.3	Parametrisierung	55
3.3.4	Diskussion	57
3.3.5	Modellerweiterungen	59
3.3.6	Warteschlangenmodellierung	61
3.3.7	Modellvalidierung	62
3.4	Netzhafter Verkehrsflußmodellierung	69
3.4.1	Einleitung	69
3.4.2	Eindimensionale netzhafte Verkehrsflußmodellierung	70
3.4.3	Zweidimensionale netzhafte Verkehrsflußmodellierung	73
3.5	Kalmanfilterung des Verkehrsflußmodells	77
3.5.1	Einleitung	77
3.5.2	Systemtheoretischer Ansatz	78
3.5.3	Modellgleichungen	80
3.5.4	Linearisierung	81
3.5.5	Bewertung	82
3.6	Die Zustandsinitialisierung	86
3.6.1	Einleitung	86
3.6.2	Ansatz	86
3.6.3	Bewertung	87
3.7	Neuro/Fuzzy-Modellierung verkehrstechnischer Größen	89
3.7.1	Einleitung	89
3.7.2	Ansatz	90
3.7.3	Schätzung der Abbiegerate	96
3.7.4	Bewertung	97
3.7.5	Zusammenfassung	100
3.8	Zusammenfassung	100

4	Die Steuerungsmodellierung des Steuerungsverfahrens	101
4.1	Einleitung	101
4.2	Wirkungskette der Bestandteile	101
4.3	Dynamische Sollwerte	103
4.3.1	Einleitung	103
4.3.2	Sollwerte und Regler	104
4.3.3	Dynamische Sollwerte	104
4.4	Der Umleitungsalgorithmus	105
4.4.1	Ansatz	105
4.4.2	Zielsetzung	105
4.4.3	Klassifizierung von Störungen	106
4.4.4	Betriebszustände	109
4.4.5	Überlastungsvermeidung	111
4.4.6	Stauausgleichsalgorithmus	111
4.5	Der Umleitungsregler	120
4.5.1	Einleitung	120
4.5.2	Stelleingriffe	121
4.5.3	Schaltplanauswahl	121
4.5.4	Schaltplankorrektur	123
4.5.5	Kombinationen	126
4.5.6	Schaltzeitüberwachung	128
4.6	Dynamische Sollwertregelung versus Optimierung	128
4.6.1	Interpretation als Optimierungsaufgabe	128
4.6.2	Lösung der Optimierungsaufgabe	128
4.6.3	Integration der Optimierungsmethoden	129
4.7	Zusammenfassung	130
5	Softwaretechnische Implementierung des Steuerungsverfahrens	131
5.1	Einleitung	131
5.2	Entwurfsansätze	131
5.2.1	Untermodule	131
5.2.2	Räumlich-logische Datenverteilung	134
5.2.3	Klassenfamilien	135
5.2.4	Interne Datenschnittstellen	136
5.3	Zusammenfassung	137
6	Anwendung und Bewertung des Steuerungsverfahrens	139
6.1	Einleitung	139
6.2	Testfeld	140
6.2.1	Topologie	140
6.2.2	Netzmodell	144
6.3	Dynamische Simulation des Verkehrsablaufes im Testfeld	147
6.3.1	Ansatz	147

6.3.2	Realdaten	148
6.3.3	Schätzung der Kordonmatrix	148
6.3.4	Verkehrsflußmodell	149
6.4	Parametrisierung des Steuerungsverfahrens	150
6.4.1	Kalmanfilter	150
6.4.2	Abbiegeratenschätzung	151
6.4.3	Umleitungsalgorithmus	151
6.4.4	Umleitungsregler	151
6.5	Verkehrsszenarien als verkehrliche Randbedingungen	152
6.5.1	Einleitung	152
6.5.2	Überblick	152
6.5.3	Das Referenzszenarium	153
6.5.4	Zusammenfassung	154
6.6	Ergebnisse	154
6.6.1	Überblick	154
6.6.2	Die Konfigurationen	155
6.6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	167
6.7	Zusammenfassung der Bewertung	168
7	Zusammenfassung und Ausblick	171
A	Linearisierung des Modells	185
A.1	Ermittlung der Systemmatrix	185
A.1.1	Linearisierung des CREMER/PAYNE-Modells	185
A.1.2	Linearisierung des erweiterten Modells	186
A.1.3	Linearisierung der statischen Geschwindigkeit $V(k)$	188
A.1.4	Linearisierung am Knoten	188
A.2	Ermittlung der Meßmatrix	190
B	Die verwendeten Variablen	191

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Forschungsinstitute prognostizieren die zukünftige Verkehrsentwicklung anhand von Umfelddaten, wie zum Beispiel der Entwicklung der Bevölkerung und der Entwicklung der Wirtschaft (SHELL, 1997; RATZENBERGER ET AL., 1995). RATZENBERGER ET AL. (1995) geben die Entwicklung des Personenverkehrs für die Bundesrepublik Deutschland mit insgesamt 1152.8 *Mrd* Personenkilometern für das Jahr 2010 an, wobei allein 927.5 *Mrd* Personenkilometer auf den Individualverkehr entfallen. Für das Jahr 1990 waren 865.2 *Mrd* Personenkilometer ermittelt worden. Der Anstieg des Personenverkehrs ist rückläufig, beträgt aber zwischen 2005 und 2010 voraussichtlich noch immer circa 5.7%; dies entspricht circa 62.4 *Mrd* Personenkilometern. Der Anstieg des bezüglich des Straßenverkehrs interessanten Individualanteils beträgt 48.8 *Mrd* Personenkilometer; dies entspricht einem Anstieg von immerhin noch 5.5%.

Der Güterverkehr wird von 342.2 *Mrd* Tonnenkilometer im Jahr 1990 auf 525.9 *Mrd* Tonnenkilometer im Jahr 2010 steigen, wobei auf den Straßenverkehr 219.0 *Mrd* beziehungsweise 325.4 *Mrd* Tonnenkilometer entfallen. Der Anstieg des Straßengüterverkehrs fällt mit 6.2% höher aus als der des Personenverkehrs.

Mit der zunehmenden Industrialisierung können diese Werte nicht nur für die übrigen G7 Staaten, sondern analog, wenn auch zeitlich etwas versetzt, für die übrigen Industrie- und Schwellenstaaten angenommen werden.

Besonders in Ballungsräumen mit hohen Bevölkerungsdichten ist es oft nicht mehr möglich, die Verkehrsinfrastruktur mittels Erweiterung des Straßennetzes auszubauen. Auch umweltpolitische Aspekte wie die negativen Folgen der Landschaftsversiegelung oder die Verkehrsemissionen verlangen nach alternativen Ansätzen des Verkehrsmanagements, um die steigenden Verkehrsbelastungen zu bewältigen.

Neben der Verkehrsvermeidung durch zielgerichtete Siedlungs- und Strukturpolitik,

sowie der Verkehrsverlagerung auf alternative Verkehrsträger (insbesondere die Bahn) mittels verkehrs- und preispolitischen Vorgaben, kann der Ablauf des Straßenverkehrs durch intelligente Verkehrslenkung verbessert werden. Die Verkehrslenkung basiert auf der Verlagerung von Verkehrsströmen, der lokalen Erhöhung der Kapazität und der Vermeidung von Unfällen mittels Steuerungseingriffen.

Die dazu benötigten Verkehrsbeeinflussungsanlagen setzen intelligente Steuerungsverfahren ein, die unter dem Begriff Telematik (*Telekommunikation, Informatik*) zusammengefaßt werden.

1.2 Definition der Netzsteuerung

Die Netzsteuerung ist eine Ausprägung der Verkehrsbeeinflussungsanlagen insbesondere auf Autobahnen. Die Nutzung freier Kapazitäten und/oder die verträgliche Aufteilung des Verkehrsaufkommens im Straßennetz bilden die zugrundeliegende Leitstrategie. Basierend auf dem aktuellen Verkehrszustand werden Informationen weitergegeben, die es den Verkehrsteilnehmern ermöglichen, ihre Routenwahl dem gegebenen Verkehrszustand anzupassen. Dadurch können Reisezeiten und Betriebskosten reduziert werden. Die Betriebskosten beziehen sich in erster Linie auf die beteiligten Fahrzeuge. Es können zum Beispiel durch die Vermeidung von Unfällen auch Betriebskostenanteile der Infrastruktur gesenkt werden (PISCHNER ET AL., 1999). Die Grundvoraussetzung für die Anwendung der Netzsteuerung ist ein Straßennetz, das mehrere Verbindungen zwischen einem oder mehreren Entscheidungspunkten und jeweils einem oder mehreren Zielgebieten zur Verfügung stellt.

Das Wort Netzsteuerung wird in dieser Arbeit nur für Systeme verwendet, die auf „online“ Steuerungsverfahren basieren und dazu zur Laufzeit Daten erheben. Damit werden die statische Beschilderung des Straßennetzes, sowie statische individuelle Zielführungssysteme nicht als Netzsteuerung aufgefaßt.

Die Darstellung der Defizite aktueller Netzsteuerungen läßt sich kaum auf einen Schwerpunkt konzentrieren; die Mängel erstrecken sich von der Datenversorgung, den Verkehrs- und Steuerungsmodellen bis hin zum Stelleingriff. Der Stelleingriff übermittelt die Ergebnisse eines Steuerungsmodells an die Verkehrsteilnehmer. Die Technik basiert auf akustischer Ausgabe und visueller Ausgabe und wird in dieser Arbeit unter den Begriffen Ausgabetechnik und Aktorik zusammengefaßt.

1.3 Zielstellung der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist der Entwurf eines robusten Steuerungsverfahrens zur Netzsteuerung. Der Ansatz soll weitgehend unabhängig von der Art der Netztopologie, der Meßtechnik und auch der Ausgabetechnik sein. Dies stellt sicher, daß das Verfahren in

seiner Architektur und seinen Elementen in zukünftigen Verkehrsbeeinflussungsanlagen genutzt werden kann. Daraus wurde folgende Aufgabenstellung abgeleitet:

- Es muß ein Konzept entwickelt werden, das die Defizite bisheriger Netzsteuerungsverfahren vermeidet. Hierzu neu benötigte Teile müssen geschaffen, die Mängel bereits vorhandener Teile müssen korrigiert werden.
- Die Implementierung des Steuerungsverfahrens muß zum einen offen sein für zukünftige Erweiterungen, zum anderen soll auch der direkte Einsatz in einer Verkehrsbeeinflussungsanlage möglich sein. Es muß daher sowohl auf eine geeignete Struktur der Software, als auch auf rechentechnische Randbedingungen wie die benötigte Rechenzeit geachtet werden.
- Das Steuerungsverfahren muß geeignet validiert werden; hierbei ist auch auf die Rückkopplungseffekte im geschlossenen Regelkreis zu achten. Die Validierung wird am Beispiel des Autobahnnetzes München Nord durchgeführt. Der Netzumgriff der Verkehrslenkungsanlage München Nord besteht aus den Autobahnen A9, A92 und A99. Zudem ist ein untergeordnetes Landstraßen- und Bundesstraßennetz verfügbar, das zwar meßtechnisch nicht erfaßt, verkehrstechnisch aber dennoch eine wichtige Rolle spielt.

1.4 Vorgehensweise und Vorschau

Die Defizite bisheriger Ansätze werden anhand einer Analyse und Diskussion der Netzsteuerung verdeutlicht. Die Defizite werden in systematische und implementierungsspezifische unterschieden. Der Schwerpunkt der Diskussion liegt dabei bei den systematischen Defiziten der Teilmodelle.

Die Diskussion wird ergeben, daß die räumlich–zeitliche Modellierung des Verkehrsflusses mit makroskopischen fluidmechanischen Ansätzen keine wesentliche systematischen Mängel besitzt. Sie wird daher sowohl zur internen Bewertung der Verkehrssituation im Verfahren selbst als auch zur externen Bewertung des Verfahrens verwendet. Dazu wird ein dynamisches makroskopisches Verkehrsflußmodell gewählt, das sowohl die Kontinuumsgleichung als auch eine Beschleunigungsgleichung enthält. Dieses makroskopische Verkehrsablaufsmodell zweiter Ordnung wird in einem eigenem Kapitel diskutiert und erweitert. Die aus der Literatur bekannte Kalmanfilterung von makroskopischen Verkehrsablaufsmodellen (CREMER, 1979) wird um die Schätzung von Abbiegeraten ergänzt und auf das erweiterte Verkehrsablaufsmodell angewendet. Zudem wird die Schätzung von Verkehrsgrößen mittels eines fuzzy-neuronalen Netzes beschrieben.

Das eigentliche Steuerungsverfahren wird unter Nutzung der Verkehrsmodelle und unter Nutzung von Ansätzen der Regelungstechnik entwickelt. Es wird zunächst ein methodischer Ansatz zur Verringerung der systematischen Defizite beschrieben; dieser Ansatz ist so allgemein, daß er außer in der Netzsteuerung auch in Steuerungsverfahren

für andere Verkehrsbeeinflussungsanlagen wie zum Beispiel einer Liniensteuerungsanlage oder auch einer Lichtsignalanlage zum Einsatz kommen könnte. Dieser allgemeine Ansatz verzichtet zunächst auf Prognose und Optimierung aufgrund der Einschätzung deren Defizite; der Ansatz ist aber so offen, daß in den Teilmodellen des Steuerungsverfahrens, die in den anschließenden Abschnitten beschrieben werden, Prognose und Optimierung verwendet werden können, um diese zu verbessern.

Das Steuerungsverfahren besteht aus einer Vielzahl miteinander kommunizierender Verkehrsmodelle, Steuerungsmodelle und Datenmodelle. Aufgrund dieser Komplexität des Gesamtsystems wird Wert auf eine angemessene softwaretechnische Realisierung gelegt. Die softwaretechnische Realisierung des Verfahrens wird als Implementierung bezeichnet. Die allgemeingültigen und von Programmiersprachen unabhängigen Überlegungen werden ebenfalls in einem eigenen Kapitel beleuchtet. Mit Ausnahme gekennzeichnete Abschnitte wurden alle in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze implementiert. Die in der Arbeit enthaltenen Validierungen basieren jeweils auf der Implementierung der jeweiligen Verfahren.

Das Steuerungsverfahren wird anhand einer Simulation des geschlossenen Regelkreises auf das Autobahnteilnetz im Münchner Norden angewandt und bewertet. Die Ergebnisse der Simulation werden in einem eigenem Kapitel zusammengefaßt.

Kapitel 2

Entwicklung der Netzsteuerung

2.1 Vorgehensweise

Die Entwicklung der in dieser Arbeit beschriebenen Netzsteuerung basiert auf einer allgemeinen Architektur von Steuerungsverfahren. Dazu wird unter anderem auf die „Hinweise für Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (SIEGENER ET AL., 1992) zurückgegriffen. Diese wurden für Netzsteuerungen im Außerortsbereich entwickelt und können auf Netzsteuerungen im Innerortsbereich übertragen werden.

Zunächst wird der Aufbau eines Verfahrens zur Netzsteuerung definiert. Anschließend wird jeder Teilbaustein unter Angabe von Beispielen beschrieben und seine systematischen Defizite beleuchtet.

Darauf basierend wird die Architektur der in dieser Arbeit entwickelten Netzsteuerung erläutert.

2.2 Der Aufbau einer Netzsteuerung

Bild 2.1 zeigt den schematischen Aufbau eines Netzsteuerungssystems mit einer detaillierten Darstellung der für das Steuerungsverfahren wichtigen Teile. Ein System zur Netzsteuerung besteht im wesentlichen aus einem (verkehrstechnischen) Steuerungsverfahren und der (anlagentechnischen) Steuerungstechnik.

Die Steuerungstechnik umfaßt die Meßtechnik (Sensorik), die Ausgabetechnik (Aktorik) sowie die Datenverarbeitung und –übertragung als Fernwirktechnik. Die Sensorik und Aktorik stellen Rahmenbedingungen des Steuerungsverfahrens dar. Die Meßtechnik definiert die zur Verfügung stehenden Daten; die Ausgabetechnik definiert die Informationen, die vom Steuerungsverfahren an die Verkehrsteilnehmer weitergegeben werden können; diese bilden das mögliche Spektrum des Stelleingriffs.

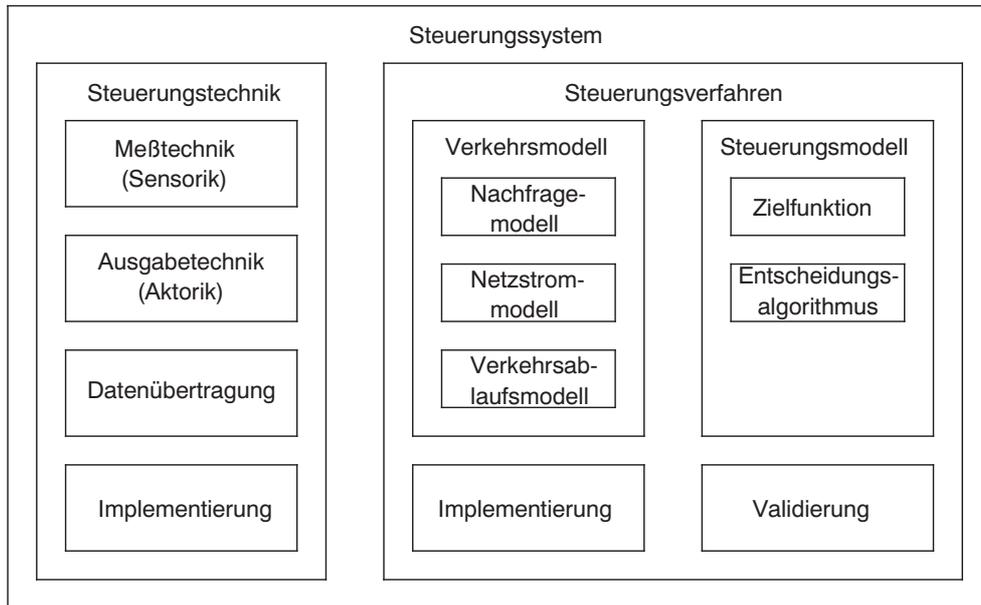


Abbildung 2.1: Aufbau eines Netzsteuerungssystems

Das Steuerungsverfahren besteht im Kern aus dem Verkehrsmodell und dem Steuerungsmodell. Das Verkehrsmodell dient zur räumlich–zeitlichen Abbildung des Verkehrs. Das Verkehrsmodell kann in die Teilmodelle Verkehrsnachfragemodell, Netzstrommodell und Verkehrsablaufmodell aufgespalten werden.

Das Steuerungsmodell besteht aus einem Entscheidungskriterium und einem Entscheidungsalgorithmus. Das Entscheidungskriterium bildet die verkehrlichen Steuerungsziele beziehungsweise Strategien mittels mathematischer Ausdrücken ab. Im Bereich der Netzsteuerung wird als Entscheidungskriterium oft eine Zielfunktion verwendet, die in einem Entscheidungsalgorithmus optimiert wird. Die im mathematischen Ausdruck des Entscheidungskriteriums beziehungsweise der Zielfunktion enthaltenen Variablen sind die Entscheidungsvariablen. Der Entscheidungsalgorithmus liefert unter Nutzung der Verkehrsmodelle die an die Verkehrsteilnehmer zu übertragende Information, die die Steuerungsvariable darstellt. Der Entscheidungsalgorithmus kann zum Beispiel aus der Auswertung von Schwellenwerttabellen oder der Optimierung einer Zielfunktion bestehen. Aus der Steuerungsvariablen ergeben sich die Wirkungen zum Beispiel als Zahl der umgeleiteten Fahrzeugen.

Neben den Verkehrsmodellen und Steuerungsmodellen bildet auch die Implementierung des Verfahrens einen wesentlichen Bestandteil des Steuerungsverfahrens. Die Güte der Implementierung trägt zur Güte des Gesamtsteuerungssystems genauso bei wie die Güte der verwendeten Modelle sowie auch die Güte der Steuerungstechnik.

Ebenso ist auch die Validierung ein logischer Bestandteil des Steuerungsverfahrens. Durch die Validierung kann die Anwendbarkeit des Verfahrens auf ein oder mehrere Testfelder unter Berücksichtigung bestimmter Szenarien getestet werden. Auf diese Weise können die Einsatzgrenzen des Verfahrens bestimmt werden. Dies kann in die Entscheidungslogik einer Rückfallebene einfließen.

2.3 Systemzuverlässigkeit

2.3.1 Einleitung

Aufgrund dieses Aufbaus (siehe Bild 2.1) lassen sich bereits einfache Überlegungen zur systematischen Ausfallwahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit eines Netzsteuerungssystems anstellen. Die Betrachtungen zur Zuverlässigkeit sollen helfen, die Problematik der Netzsteuerung qualitativ aufzudecken. Zu diesem Zweck wird angenommen, daß die Güte eines Modells mit dessen Zuverlässigkeit gleichgesetzt werden kann. Die Zuverlässigkeit Z ergibt sich aus der Ausfallwahrscheinlichkeit A zu:

$$Z = 1 - A \quad (2.1)$$

Die Zuverlässigkeit läßt sich im Zusammenhang der Netzsteuerung als der realisierte Anteil des theoretisch möglichen Nutzens interpretieren.

2.3.2 Reihen- und Parallelschaltung

Die Zuverlässigkeit eines Systems aus mehreren Teilmodulen, die voneinander abhängen

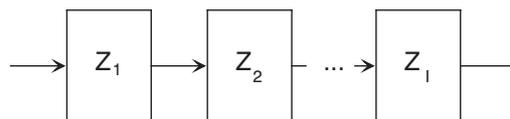


Abbildung 2.2: Modulreihenschaltung

(siehe Bild 2.2), ergibt sich zu

$$Z_{ges} = \prod_{i=1}^I Z_i \quad (2.2)$$

Die Zuverlässigkeit eines Systems, das sich auf mehrere Teilmodule abstützt, die voneinander unabhängig sind (siehe Bild 2.3), berechnet sich zu

$$Z_{ges} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - Z_i) \quad (2.3)$$

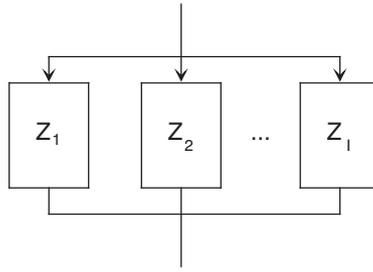


Abbildung 2.3: Modulparallelschaltung

Im Detail kann es sehr schwierig sein, ein Zuverlässigkeitsmodell eines bestimmten Steuerungsverfahrens zu entwerfen; das Zuverlässigkeitsmodell deckt sich nämlich nicht mit dem Signalfluß des systemtheoretischen Modells. Besitzt ein Verkehrsflußmodell zum Beispiel Eingangsgrößen aus Realdaten und einem Netzstrommodell, so stellen die Realdaten und das Netzstrommodell in der Regel keine Parallelschaltung, sondern eine Reihenschaltung (siehe unten) dar, da sie beide unterschiedliche Arten von Ergebnissen liefern. Erst wenn eine Umlegung der Verkehrsströme aus der Netzstrommodellierung verwendet wird, um eventuell ausgefallene Detektoren zu erkennen, können Teile der Realdaten und des Netzstrommodells aus der Reihenschaltung ausgelagert und in eine Parallelschaltung überführt werden.

Trotzdem liefert die Zuverlässigkeitsbetrachtung ein Instrumentarium, mit dem sich die Größenordnung der Unsicherheiten erfassen und erklären läßt.

2.3.3 Rechenbeispiele

Nimmt man an, daß die Zuverlässigkeit jedes Teilmoduls des Steuerungsverfahrens 0.95 beträgt, und daß die sieben Module des Steuerungsverfahrens voneinander abhängen ohne sich gegenseitig abzustützen (Reihenschaltung), so ergibt sich eine Zuverlässigkeit von

$$Z_{v,7} = 0.95^7 \approx 0.7 \quad . \quad (2.4)$$

Bei einer angenommenen Zuverlässigkeit („Genauigkeit“) eines Teilmoduls von 0.8 ergibt sich nur noch eine Zuverlässigkeit von

$$Z_{v,7} = 0.8^7 \approx 0.2 \quad . \quad (2.5)$$

Die Parallelschaltung von nur drei sich abstützenden Einzelmodulen mit einer Zuverlässigkeit von 0.8 liefert dagegen eine Gesamtzuverlässigkeit von

$$Z_{v,3} = 1 - (1 - 0.8)^3 = 0.992 \quad . \quad (2.6)$$

Die Parallelschaltung sieben Einzelmodulen mit einer Einzelzuverlässigkeit von 0.8 ergibt eine Gesamtzuverlässigkeit von

$$Z_{v,7} = 1 - (1 - 0.8)^7 \approx 1 \quad . \quad (2.7)$$

2.3.4 Konsequenz

Daraus lassen sich zwei allgemeine Forderungen ableiten:

- Die Module sollen soweit wie möglich voneinander unabhängig sein und sich gegenseitig zur Erhöhung ihrer Zuverlässigkeit abstützen (Parallelschaltung).
- Nur Module mit hoher Einzelzuverlässigkeit dürfen in Serie geschaltet werden.

Bei sieben Teilmodulen sollte jedes Modul eine Zuverlässigkeit von mindestens 0.9 aufweisen, um im schlechtesten Fall noch eine Gesamtzuverlässigkeit von annähernd 0.5 zu erreichen.

2.4 Die Steuerungstechnik

2.4.1 Die Sensorik

Ansätze

Die Datenerfassung (Sensorik) ist zu einem großen Teil unabhängig von dem darauf aufbauenden Steuerungssystem. Für die Netzsteuerung kann man daher auf ein breites Spektrum von relativ weit entwickelten Sensoren zurückgreifen. DITTRICH und KUSCHK (1997) liefern einen guten Überblick auf die am Markt befindliche Sensortechnik. Bild 2.4 zeigt einen Überblick der Datenerfassung. Die Datenerfassung wird zunächst in die straßenseitige kollektive und die fahrzeugseitige individuelle Datenerfassung eingeteilt. Beide Datenerfassungsprinzipien unterscheiden sich am datentechnischen Verhalten der Einzelfahrzeuge. Bei den kollektiven Erfassungssystemen verhalten sich die Einzelfahrzeuge passiv und übermitteln keine Daten. Bei den individuellen Erfassungssystemen verhalten sie sich aktiv als Datenlieferant.

Die Datenerfassung läßt sich verkehrstechnisch in querschnittsbezogen und abschnittsbezogen einteilen. Querschnittsbezogene Messungen wirken ausschließlich lokal in kurzen Streckenabschnitten mit einer Länge von wenigen Metern; abschnittsbezogene räumliche Aussagen über Verkehrsgrößen lassen sich nur durch die Korrelation benachbarter Meßreihen und Merkmalsfolgen gewinnen.

Kollektiv am Querschnitt erfaßte Kenngrößen sind:

- Verkehrsstärke oder Anzahl der Fahrzeuge (auch aufgeschlüsselt auf Fahrzeugklassen)
- mittlere Geschwindigkeit (auch aufgeschlüsselt auf Fahrzeugklassen)
- Fahrzeugklasse
- Zeitlücke

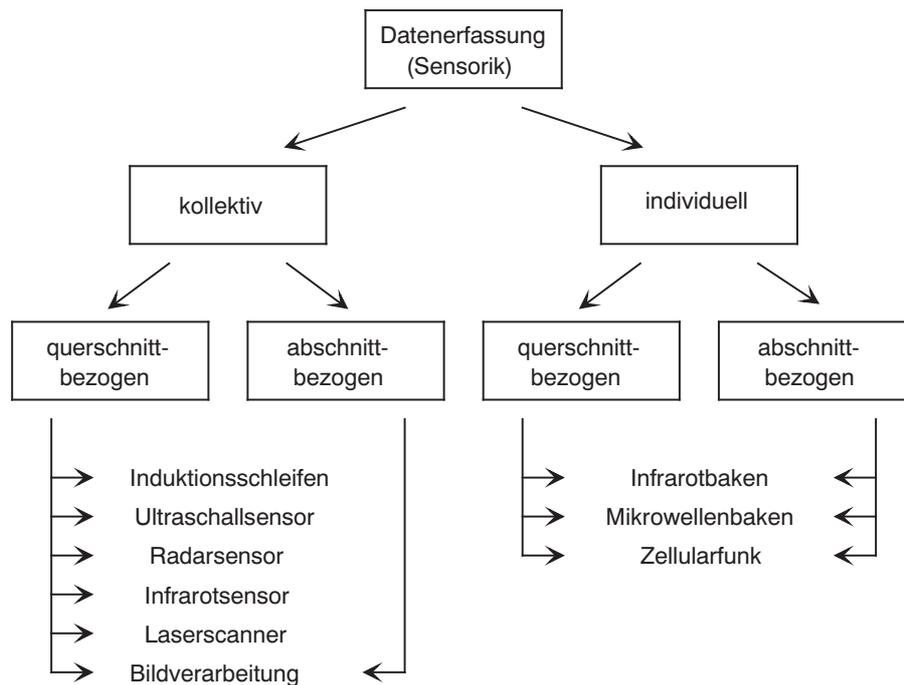


Abbildung 2.4: Klassifizierung der Sensorik

- Dichte oder Fahrzeugabstand (nur mit Bildverarbeitung)
- Belegungsgrad
- stehende Fahrzeuge

Die häufigsten querschnittsbezogenen Detektoren auf Bundesautobahnen sind Doppelinduktionsschleifen. Mittels Doppelinduktionsschleifen werden die Zahl der Fahrzeuge im Meßintervall und die mittlere Geschwindigkeit jeweils aufgeschlüsselt in mehrere Fahrzeugklassen sowie die Zeitlücken direkt erfaßt. Mit Ausnahme der Zeitlücken können diese Größen auch von allen anderen im Bild 2.4 aufgeführten Sensoren erfaßt werden. Mit Ausnahme der Verkehrsstärken sind für die Netzsteuerung nur abschnittsbezogene Größen relevant.

Andere rein querschnittsbezogene Meßverfahren können die Doppelinduktivschleife ersetzen und unter Umständen implementierungsspezifische Verbesserungen zum Beispiel im Bereich der Erstellungs- und Unterhaltskosten aber auch der konkreten Ausfallwahrscheinlichkeit bewirken; es sind allerdings im Bezug auf die Netzsteuerung keine wesentlichen verkehrstechnischen Verbesserungen aufgrund von neu gewonnenen Informationen zu erwarten.

Bildererkennung spielt derzeit in der automatischen Datenerfassung für Netzsteuerungen

noch keine wesentliche Rolle. Dies dürfte sich jedoch in den nächsten Jahren ändern. Besonders im Bereich der Störungsdetektion werden bereits jetzt Kameras zur Überwachung des Verkehrszustandes eingesetzt. Es gibt zahlreiche Forschungsaktivitäten zur automatischen Verkehrszustandserfassung durch Bilderkennung (MOBINET KONSORTIUM, 1998). Mittels Bilderkennung lassen sich sowohl querschnittsbezogene Messungen als auch abschnittsbezogene Messungen durchführen. Die maximal mögliche Abschnittslänge ist von der Aufstellhöhe der Kamera abhängig. Derzeit erreichbare Längen betragen unter 200 m und sind somit zur Ermittlung von streckenbezogenen Verkehrsdaten in Netzsteuerungen tendentiell zu kurz; bei einer angestrebten Auflösung von 200 m bräuchte man mindestens entweder alle 400 m eine Kamera oder alle 600 m zwei Kameras. Ein wesentliches Problem der Datenerfassung mittels Kamera wird der Einfluß der Witterungsbedingungen wie zum Beispiel Fahrbahnnässe (Spiegelung), Nebel oder Schneefall auf die Zuverlässigkeit der Messung darstellen.

Auf dem Markt befindliche Systeme können derzeit nur bedingt abschnittsbezogene Verkehrsgrößen ermitteln. Die wichtigsten meßbaren abschnittbezogenen Verkehrsgrößen sind:

- Stauausbreitung
- Fahrzeugdichte
- Fahrzeugposition
- Reisezeit

Die von einigen Systemen ermittelte mittlere Geschwindigkeit im Abschnitt kann nur bedingt als abschnittsbezogene Größe gerechnet werden, da sie über den örtlichen Verlauf der Geschwindigkeit keine Aussage trifft und so auf wesentliche Größen wie die Reisezeit nur ungenau rückschließen läßt. Aus diesen Gründen wird die Bilderkennung im Kontext der Netzsteuerung zu den querschnittsbezogenen Meßverfahren gerechnet.

Die Arbeiten KÜHNE ET AL. (1997) und KÜHNE ET AL. (1998) beschäftigen sich mit einer durch Korrelationsrechnung verbesserten Reisezeitberechnung aus querschnittbezogenen Meßgrößen, die auf der Wiedererkennung von Fahrzeugkolonnen beruht. Daneben wird an der automatischen „online“ Kennzeichenerfassung gearbeitet (NELSON, 1999), um auch netzbezogene Größen wie die Matrix der Verkehrsbeziehungen zu ermitteln. Die in der Zukunft erreichbaren Genauigkeiten sowie die zum Teil noch zu klärenden rechtlichen Aspekte werden entscheiden inwieweit diese Meßdaten in der Netzsteuerung verwendet werden können.

Die individuellen Meßverfahren sind noch nicht weit entwickelt. Ihre Anwendung beschränkt sich bisher im wesentlichen auf Feldteststudien. Die individuellen Meßverfahren beziehen ihre Daten aus fahrzeugseitigen Sensoren. Es können also insbesondere die

Geschwindigkeit sowie der Ort des Fahrzeugs bestimmt werden. Diese Größen können sowohl querschnittsbezogen oder abschnittsbezogen übertragen werden.

Diskussion

Die derzeit üblichen und erprobten Meßeinrichtungen erlauben nur querschnittsbezogene Messungen. Die räumliche Erfassung des Verkehrsablaufs kann durch ein dichtes Raster von Meßquerschnitten erfolgen, zum Beispiel im Abstand von unter 500 *m*. Ein dichtes Meßstellenraster ist in der Erstellung und im Unterhalt kostenintensiv und wird daher bei Alternativroutensteuerungen aufgrund der dabei üblichen Ausmaße des Netzumgriffs vermieden. Die räumliche Erfassung des Verkehrsablaufs muß daher auf Verkehrsmodelle mit den jeweiligen Schätzgenauigkeiten zurückgreifen.

Meßstellenausfälle sind häufige Ereignisse, da es in der Regel sehr viele Meßquerschnitte gibt. Bereits bei kleinen Netzen mit einer Gesamtlänge der richtungsbezogenen Strecken von circa 100 *km* (siehe zum Beispiel Abschnitt 6.2 mit den Bildern 6.1 und 6.3) sind dies schnell mehr als 150 Meßquerschnitte (inklusive Ein- und Ausfahrten sowie Rampen). Manchmal werden Anlagen insofern mit einer redundanten Querschnittserfassung ausgerüstet, als daß für die meisten Querschnitte durch Summen und Differenzbildung ein Ersatzwert aus Nachbarquerschnitten gebildet werden kann. Bei systematischem Ausfall mehrerer benachbarter Meßquerschnitte (zum Beispiel durch Ausfall eines Schaltkastens) kann keine Ersatzwertberechnung vorgenommen werden.

Weitere systematische Defizite ergeben sich aus Meßungenauigkeiten. Diese haben unterschiedlichste, oft implementierungsspezifische, hier nicht näher erläuterte Ursachen. Meßungenauigkeiten lassen sich durch Vergleich mit Ersatzwerten (redundante Information) ermitteln. Unter der Annahme, daß die Meßquerschnitte nicht redundante Informationen liefern und die Meßdatenerfassung von der Funktionsfähigkeit aller Meßquerschnitte in Form einer Reihenschaltung abhängt, würde sich bei einer Einzelzuverlässigkeit von 0.99 für das Beispiel mit 150 Meßquerschnitten eine Gesamtzuverlässigkeit der Meßdatenerfassung von nur

$$Z_m = 0.99^{150} \approx 0.22 \quad (2.8)$$

ergeben. Die Meßquerschnitte liefern allerdings oft teilweise redundante Informationen; viele Querschnitte können logisch entkoppelt betrachtet werden (keine Zusammenhänge in einer Reihen- oder Parallelschaltung, so daß sich eine mittlere Zuverlässigkeit ergibt. Können mehrere Querschnitte aufgrund redundanter Informationen in einer Parallelschaltung zusammengefaßt werden, so kann die Zuverlässigkeit erhöht werden. Bei drei redundanten Meßquerschnitten mit einer Einzelzuverlässigkeit von 0.9 ist theoretisch eine Zuverlässigkeit von

$$Z = 1 - (1 - 0.9)^3 = 0.999 \quad (2.9)$$

möglich. Bei dieser Überlegung ist allerdings zu beachten, daß Zusatzlogiken benötigt werden, deren Zuverlässigkeit in Reihenschaltung eingeht. Besitzt eine solche Logik zum

Beispiel eine Zuverlässigkeit von 0.9 oder weniger, so verschlechtert sich die Gesamtzuverlässigkeit auf einen Wert unter der Einzelzuverlässigkeit eines Meßquerschnitts von 0.9.

Individuelle Meßsysteme benötigen eine Mindestausstattungsrate der beteiligten Fahrzeuge. Neben den daraus entstehenden Kosten gibt es auch noch die Kosten der Informationsübertragung. Die individuellen Meßsysteme unter Nutzung des Zellularfunks würden ab einer gewissen Ausstattung der Fahrzeuge aber eine allgemeine Erfassung der Meßdaten zulassen und wäre nicht mehr auf kleine Teilnetze beschränkt. Abhängig vom Ausstattungsgrad können viele redundante Informationen gesammelt werden. Unter Nutzung dieser redundanten Informationen könnte eine sehr hohe Zuverlässigkeit erreicht werden.

Konsequenz

In den allermeisten Verkehrsbeeinflussungsanlagen werden Induktionsmeßschleifen, in neueren Anlagen daneben auch Radarsensoren in Überkopftechnik eingesetzt, die beide querschnittsbezogene Daten liefern. (VIA BERATENDE INGENIEURE, 1999). Die Technologie der Querschnittserfassung wird daher als Randbedingung auch dem neu zu entwickelnden Steuerungsverfahren zugrundegelegt. Das Steuerungsverfahren benötigt somit ein geeignetes Verkehrsmodell zur Modellierung des räumlichen Verkehrszustandes aus Querschnittsmessungen.

Die Meßergebnisse müssen möglichst so in das Steuerungsverfahren eingehen, daß sich keine Reihenschaltung der Einzelmeßquerschnitte bezüglich der Zuverlässigkeit ergibt.

2.4.2 Die Aktorik

Ansätze

Die Netzsteuerung kann hauptsächlich nur auf spezialisierte Aktorik beziehungsweise Ausgabetechniken zurückgreifen. Die Aktorik ist die Informationsübertragung zum Verkehrsteilnehmer, in der Regelungstechnik auch als Stelleingriff und in der Verkehrstechnik als Steuerungsvariable bezeichnet. Bild 2.5 zeigt einen Überblick. Die Klassifizierung der Aktorik wird oft unter Vernachlässigung der Sensorik auf die Netzsteuerung selbst übertragen und auf diese bezogen. Dieser Sprachgebrauch wird auch in dieser Arbeit verwendet, ohne aber auf die explizite Unterscheidung zwischen der Sensorik und Aktorik verzichten zu wollen. Die Aktorik läßt sich in kollektiv und individuell einteilen. Kollektive Netzsteuerungen nutzen variabel einstellbare Informationstafeln, deren Information allen Verkehrsteilnehmern zugänglich ist. Die Informationstafeln geben Umleitungsempfehlungen in Form von Wegweisung beziehungsweise der Angabe von Zielorten und/oder Informationen über den Verkehrszustand. Die Zielorte werden entweder additiv, also zusätzlich zur statischen Beschilderung, oder substitutiv, also anstatt der statischen Beschilderung angezeigt. Oft wird die Angabe von Zielorten

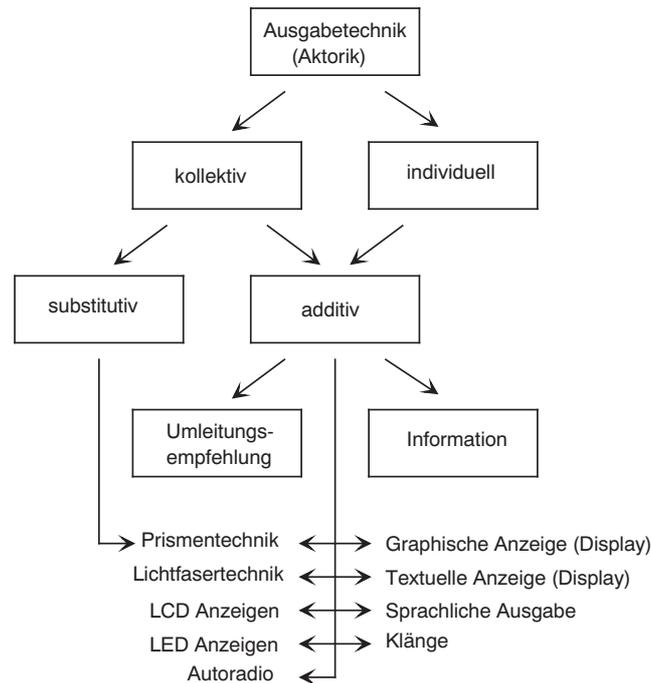


Abbildung 2.5: Klassifizierung der Aktorik zur Verkehrslenkung

mit einer meist nur minimalen Information über den Verkehrszustand als Begründung kombiniert.

In älteren Anlagen werden in der Regel drehbare Prismen eingesetzt (KLÖFKORN ET AL., 1991), die drei verschiedene Anzeigen pro Prisma erlauben. In neueren Anlagen werden neben den Prismen auch freiprogrammierbare Anzeigen in LCD Technik (Flüssigkristall) (VIA BERATENDE INGENIEURE, 1999) verwendet. Daneben ist auf dem Markt auch Lichtfasertechnik und LED Technik (Leuchtdioden) verfügbar. Die Ausgabefläche ist prinzipiell immer beschränkt, so daß gleichzeitig nur eine begrenzte Information übertragen werden kann; aufgrund der beschränkten menschlichen Wahrnehmungsfähigkeit ist dies auch sinnvoll.

Individuelle Netzsteuerungen übermitteln die Informationen direkt in entsprechend ausgerüstete Fahrzeuge. Die für (dynamische) individuelle Netzsteuerungen benötigten Ausgabetechniken sind weit entwickelt. Neben Displays mit graphischer Darstellung der Verkehrs- und Wegeinformation wird vor allem Sprache als Ausgabemedium genutzt. Auch individuelle Netzsteuerungen können vom Ansatz her sowohl Umleitungsempfehlungen als auch Verkehrszustandsinformationen übertragen. Dem Nachteil, daß die in ein Einzelfahrzeug ausgegebene Information nicht zuletzt wegen der Aufnahmefähigkeit der Verkehrsteilnehmer an Grenzen stößt, steht der Vorteil gegenüber, daß in jedes Fahrzeug andere Informationen übertragen werden können. Damit können die ausge-

gebenen Informationen und damit auch das Ergebnis des Steuerungsverfahrens an die jeweiligen Bedürfnisse des Fahrers angepaßt werden.

Diskussion

Der Stelleingriff der Netzsteuerung hat nur Empfehlungscharakter. Die Befolungsraten können begrenzt geschätzt werden und schwanken erheblich (SACHSE, 1998). Die Wirkung der Beeinflussung ist unsicher.

Das Hauptdefizit der kollektiven Beschilderung ist, daß nur wenig unterschiedliche Information übertragen werden kann. Unter Verwendung von dreiseitigen Prismen gibt es an einem Autobahnkreuz zum Beispiel maximal neun Möglichkeiten, wenn jeweils ein Prisma verwendet wird, um die Zielorte anzuzeigen. De facto gibt es zumindest im Bezug auf ortskundige Fahrer zunächst sogar nur vier verschiedene Möglichkeiten, da die beiden umleitbaren Querschnitte an einem Autobahnkreuz entweder umgeleitet werden können oder nicht. Erst unter Berücksichtigung der speziellen Netztopologie können durch geschickte Informationsverschlüsselung mehrere Zielströme separat angesprochen werden. Unter Nutzung der Ortskenntnis geschieht dies durch Angabe der Verkehrszustände geeigneter Netzausschnitte. Auf diese Weise lassen sich die erweiterten Anzeigemöglichkeiten von frei programmierbaren Tafeln nutzen. Die Information einer kollektiven Netzsteuerung kann nicht jedem Fahrer individuell angepaßt werden. Jede übertragene Information muß daher für alle Verkehrsteilnehmer plausibel sein; die Sinnhaftigkeit der Nutzung unterschiedlicher Kombinationen von Zielströmen ist aus dieser Sicht fragwürdig.

Individuelle Informationsübertragung verlangt auch fahrzeugseitige Investitionen. Zusammen mit den Kosten der eigentlichen Informationsübertragung behindert dies ihre Verbreitung. Solche Systeme lassen interessante Erweiterungen der Verfahren zur Netzsteuerung zu.

Konsequenz

In dieser Arbeit wird von einer begrenzten Möglichkeit der Informationsübertragung ausgegangen. Diese orientiert sich an einer additiven Beschilderung mit einer begrenzten Anzahl von Zielplänen. Die Zielpläne ergeben sich aus Kombinationen der angezeigten Zielorte und Zusatzinformation an den verschiedenen Standpunkten der Informationstafeln. Unterschiedliche Zielpläne besitzen in der Regel unterschiedliche Wirkungen in Form der Zahl der umgeleiteten Fahrzeuge; sie können sich aber auch an Nebenwirkungen, wie zum Beispiel die Auswirkung von Verflechtungsvorgängen, unterscheiden. Das Verfahren wird so ausgelegt, daß eine größere Anzahl von Beeinflussungsalternativen, die sich in ihrer Wirkung jeweils unterscheiden, genutzt werden können. Die Zielpläne werden über ihre Wirkung relativ zueinander abstrahiert, so daß das Steuerungsverfahren auch mit der Weitergabe reiner Verkehrsinformationen arbeiten kann, wenn diese nach dem gleichen Kriterium zu Zielplänen abstrahiert werden können.

2.5 Das Steuerungsverfahren

2.5.1 Das Verkehrsmodell

Die Bestandteile

Das Verkehrsmodell eines Systems zur Verkehrslenkung (siehe Bild 2.1) besteht im wesentlichen aus den Teilen

- Nachfragemodellierung,
- Netzstrommodellierung und
- Verkehrsablaufsmodellierung,

die sich auf unterschiedlichen Ebenen der Verkehrsmodellierung befinden. Als Nachfragemodellierung wird in dieser Arbeit die Berechnung von Verkehrsgrößen an den Netzgrenzen bezeichnet, um die zukünftige Verkehrssituation an den Grenzen des Netzumgriffs vorhersagen zu können. Es wird nur benötigt, wenn neben dem aktuellen Verkehrszustand auch die zukünftige Entwicklung geschätzt werden soll.

Die Netzstrommodellierung berechnet die Verteilung der aktuellen oder zukünftigen Verkehrsströme im Netzumgriff. Die Netzstrommodellierung basiert entweder direkt auf den Ergebnissen der Nachfragemodellierung oder wird gegebenenfalls mit diesen verrechnet. Die Netzstrommodelle werden im Gesamtmodell verwendet, um die netzbezogenen Abläufe an Knoten zu modellieren.

Die Verkehrsablaufsmodellierung gibt detaillierte Auskunft über die räumlich – zeitliche Verkehrslage und Entwicklung an allen Orten des Netzumgriffs und greift dabei zur Modellierung der netzbezogenen Vorgänge am Knoten auf die Netzstrommodellierung zurück. Die Verkehrsablaufsmodellierung wird in dieser Arbeit bildlich auch als Verkehrsflußmodellierung bezeichnet.

Das Nachfragemodell

Ansätze Das Nachfragemodell schätzt die zeitliche Entwicklung der Verkehrsgrößen am Querschnitt. Es kommen vom Ansatz her immer Zeitreihenverfahren zur Anwendung. Diese reichen von einfacher Trendprognose bis hin zu Ansätzen unter Nutzung eines Kalman Filters. Die Verfahren können von historischen Ganglinien unterstützt werden. JANKO (1994) beschäftigt sich ausführlich mit diesen Arbeiten. Die Prognosegüte ist abhängig von der Zahl der prognostizierten Zeitschritte. Die Zeitschrittweite ist gleichzeitig die minimale Aggregationstiefe. JANKO (1994) gibt typische relative Fehler mit 0.3 bei vier prognostizierten Zeitschritten an, was einer Prognosegüte von 0.7 gleichgesetzt werden kann.

Diskussion Die Modellierung am Querschnitt ist systematisch mit großen Unsicherheiten behaftet. Schnelle Schwankungen können nur bei kleinen Aggregationsschrittweiten prognostiziert werden. Dann ergeben sich aber auch nur kleine Prognosehorizonte, die für die Netzsteuerung und die bisher verwendeten optimierenden Steuerungsmodelle nicht mehr ausreichend sind. Bestimmte unregelmäßige Ereignisse („Ausreißer“) können in der Praxis nicht prognostiziert werden. Querschnittsprognosen könnten teilweise durch Vergrößerung des Netzumgriffs vermieden werden, indem auf Daten stromaufwärts zurückgegriffen wird - aufgrund der entstehenden Kosten für Meßtechnik wird dies noch selten realisiert.

Die Prognosegüte des Nachfragemodells entspricht prinzipiell seiner Systemzuverlässigkeit. Diese Beziehung gilt allerdings nur dann, wenn die Aggregationstiefe geeignet gewählt wird.

Konsequenz Auf Nachfragemodelle wird hier aufgrund der zu erwartenden geringen Systemzuverlässigkeit so weit wie möglich verzichtet. Bei einer Systemzuverlässigkeit der Prognose von 0.7 beziehungsweise 0.95 für die übrigen Module ergäbe sich eine Gesamtzuverlässigkeit von

$$Z_v = 0.7 * \prod_{i=1}^6 0.95 \approx 0.51 \quad (2.10)$$

Setzt man für den schlechtesten Fall eine Zuverlässigkeit von 0.9 für die übrigen Module an, so ergibt sich eine Zuverlässigkeit von nur

$$Z_v = 0.7 * \prod_{i=1}^6 0.9 \approx 0.37 \quad (2.11)$$

Die Nachfragemodelle sollten mit großer Sorgfalt entwickelt und implementiert werden, wenn auf sie zum Beispiel aufgrund einer Reisezeitberechnung unter Berücksichtigung der Dynamik nicht verzichtet werden kann; dabei sollte auch bedacht werden, inwieweit die Systemzuverlässigkeit durch geeignete Verwendung der Prognoseergebnisse erhöht werden kann.

Die Netzstrommodellierung

Definitionen Die Netzstrommodellierung dient zur netzhaften Erfassung des Verkehrsgeschehens. Das Ergebnis der Netzstrommodellierung besteht im allgemeinen aus Netzstrommatrizen, die die Verkehrsbeziehungen zwischen bestimmten Punkten angeben. Die Netzstrommatrizen können nach KELLER (1988) in drei Arten unterschieden werden (siehe Bild 2.6):

- Die Quelle-Zielmatrix liefert die Verkehrsströme zwischen den wirklichen Quellen i und Zielen j , die außerhalb des Netzumgriffes liegen.

- Die Kordonmatrix liefert die Verkehrsströme zwischen den Ein- und Ausfahrten k und l des Netzumgriffes.
- Eine Knotenpunktmatrix liefert die Verkehrsströme zwischen m und n an einem Knotenpunkt; dies entspricht Abbiegeraten.

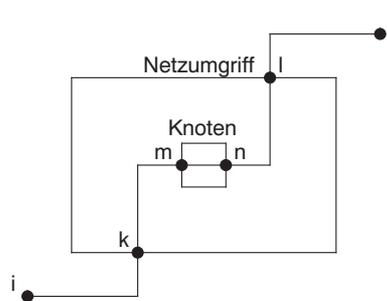


Abbildung 2.6: Arten der Netzstrombeschreibung (nach KELLER (1988))

Die Verkehrsstrominformationen werden zwingend benötigt, um die Effekte der Netzsteuerung zu modellieren. Aus der Kordonmatrix können die Knotenmatrizen mittels eines Umlegungsmodells und einer Akzeptanzratenschätzung ermittelt werden. Die Akzeptanzratenschätzung dient zur kordonmatrixbasierten Modellierung einer Netzsteuerung.

Netztypen Bevor auf die unterschiedlichen Ansätze der Netzstrommodellierung näher eingegangen wird, werden zunächst die unterschiedlichen Netztypen diskutiert; diese stellen unterschiedliche Anforderungen an die Netzstrommodellierung. Unter dem “Netz“ wird dabei das Netz des Systemumgriffs, also die örtlichen Ausdehnungen des Netzsteuerungssystems verstanden.

Der Systemumgriff einer Netzsteuerungsanlage kann zwei verschiedene Ausdehnungen bezüglich der alternativ nutzbaren Routen besitzen. Die Ausdehnung der datentechnischen Erfassung ist manchmal kleiner als die Ausdehnung der tatsächlichen Wirkungen. Dies ist meist dann der Fall, wenn mehrere Straßenklassen mit unterschiedlicher Beobachtbarkeit beteiligt sind und diese unter Umständen auch unterschiedlichen Institutionen unterstehen. Im Netz (a) in Bild 2.7 werden beide Alternativrouten erfaßt; die Wirkungen sind beobachtbar. Im Netz (b) sind Teile der Alternativrouten nicht erfaßt. Entsprechend schlecht können die Wirkungen in diesen Bereichen erfaßt werden. Beispiele hierfür sind in Deutschland das Netz Dernbach Koblenz sowie das Netz Saarbrücken. Bei beiden Netzen gibt es Alternativroutenpaare, die in ihrer datentechnischen Erfassung nicht am selben Ort enden. Im Netz (c) des Bildes 2.7 können die Verkehrsteilnehmer auf eine „regulär“ erfaßte Alternativroute und ein untergeordnetes nicht erfaßtes Straßennetz zurückgreifen. Ein Beispiel dafür ist das Netz München

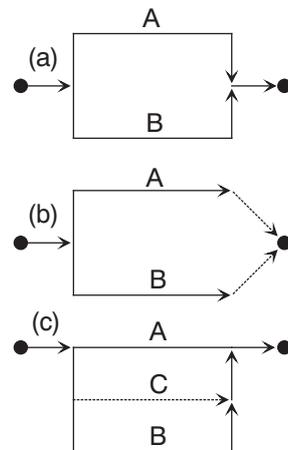


Abbildung 2.7: Netztypen

Nord. Dies erschwert die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens, da nicht nur über die nicht erfaßten Bereiche nur schwerlich Aussagen getroffen werden können, sondern auch die Wirkung eines Netzsteuerungseingriffs bezüglich der Stromaufteilung in der Regel nicht gut vorhergesagt werden kann.

Der Netzumgriff kann unterschiedlich komplex gewählt werden (siehe Bild 2.8). Einfache

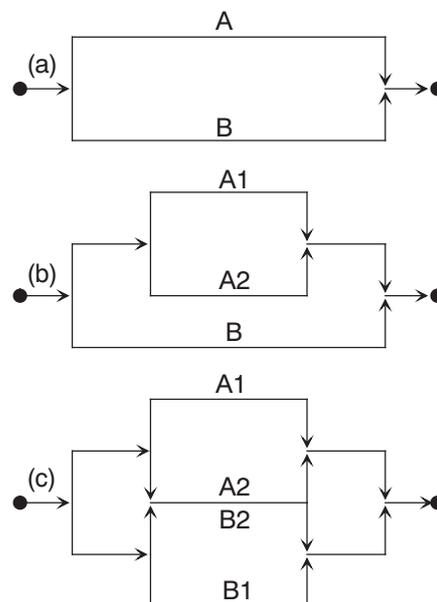


Abbildung 2.8: Komplexitätsstufen der Netze

che Netze (a) bestehen aus einem Alternativroutenpaar. Komplexere Netze bestehen

aus mehreren Alternativroutenpaaren (b), die unter Umständen auch Teilabschnitte gemeinsam nutzen (c). Die Verfahren sollten so weit wie möglich von der Netztopologie unabhängig sein.

Ein Ansatz ist, auf einem abstrakten Verkehrsmodell aufzubauen, unter dem die Komplexität des Netzes verborgen wird. Dieser Ansatz ist bei nicht ausreichender Modellgüte als problematisch einzustufen; allein schon wegen der Netzstrommodellierung wird im Rahmen dieser Arbeit davon abgesehen.

Ein weiterer Ansatz ist die Unterteilung eines komplexen Netzes in elementare Teilnetze (KELLER ET AL., 1995); dieser Weg wird in dieser Arbeit gewählt.

Netze können zudem an ihrer räumlichen Ausdehnung unterschieden werden. Die räumliche Ausdehnung bezieht sich hierbei auf die Länge der Routen. Netze mit langen Routen besitzen naturgemäß große Reisezeitanteile, die als Totzeit in das Prozeßmodell eingehen und stärker streuen können als bei Netzen mit geringen Reisezeiten. Totzeiten können in Steuerungssystemen berücksichtigt werden, soweit sie bekannt sind.

Das Braess'sche Paradoxon (BRAESS, 1968) zeigt, daß ein um eine neue Route erweitertes Netz größere Reisezeiten verursachen kann als das ursprüngliche Netz. Analog dazu kann die Nutzung zusätzlicher lokal begrenzter Kapazitäten durch die Netzsteuerung ebenfalls solche Effekte bewirken.

Ansätze Die aktuelle Quelle-Zielmatrix kann nicht ermittelt werden, da die entsprechenden Informationen nicht vorliegen; für diesen Zweck müßte auch der stehende Verkehr außerhalb des Netzumgriffs erfaßbar sein. Die Kordonmatrix kann aus Meßdaten geschätzt werden.

Die Schätzung der Kordonmatrix basiert auf einem unterbestimmten Gleichungssystem zur Bilanzierung der Ströme. Die fehlende Information kann entweder unter Verwendung (statischer) informationstheoretischer Verfahren (z.B. Entropiemaximierung, VAN ZUYLEN und WILLUMSEN (1980)) oder durch Zeitreihenanalyse auch unter Nutzung dynamischer Modellansätze (z.B. CREMER und KELLER (1987)) ergänzt werden. Manche Verfahren kombinieren beide Ansätze (z.B. KELLER und PLOSS (1987)). Die Kordonmatrix könnte unter Anwendung von Bilderkennung über die Fahrzeugkennzeichen auch gemessen werden. Die Akzeptanzraten können nicht direkt gemessen werden, sondern müssen unter Einrechnung der Kordonmatrix berechnet oder a priori geschätzt werden. Aus den Akzeptanzraten und der Kordonmatrix können die Wirkungen der Netzsteuerung an den Knoten modelliert werden; es ergeben sich schaltungsabhängige Knotenmatrizen.

Die direkte Schätzung der Knotenmatrizen als Funktion vom Stelleingriff beruht meistens auf der Annahme konstanter Werte in Abhängigkeit von Faktoren wie dem Stell-

eingriff; die Eichung erfolgt offline. Auch mittels Zeitreihenanalyse kann die Wirkung der Netzsteuerung unter Berücksichtigung historischer Daten geschätzt werden. Wie bei der Verkehrsnachfragemodellierung sind auch hier unterschiedlichste Verfahren einsetzbar. Die Zuverlässigkeit kann damit analog zur Nachfragemodellierung mit 0.7 angenommen werden. Die Knotenmatrizen können an Autobahnkreuzen oft direkt gemessen werden.

Diskussion

Defizite der Schätzansätze Die Ermittlung der Kordonmatrix basiert immer auf einer Extrapolation der vorhandenen Information; Information wird hinzugefügt. Dies bedeutet, daß nur wahrscheinliche Lösungen, aber keine absoluten ermittelt werden können. Die aktuelle Kordonmatrix kann daher nicht zweifelsfrei bestimmt werden. Es ist zu beachten, daß es zwischen der tatsächlichen Gültigkeit der Kordonmatrix an den Netzeinfahrten und der Matrixmessung oder Schätzung einen Zeitversatz von der Größe der maximalen Reisezeit im Netz und der verwendeten Aggregationsschrittweite gibt. Die Anwendung zusätzlicher Zeitreihenverfahren zur Schätzung zukünftiger Kordonmatrizen oder ihrer Abhängigkeit von dem Stelleingriff ergibt weitere Unsicherheiten.

Es ist wahrscheinlich, daß die zeitliche Entwicklung der Wegewahl und Akzeptanz ähnlichen Gesetzen gehorcht wie die der Verkehrsnachfrage. Die Schätzung der Akzeptanzraten hängt zusätzlich von den Ergebnissen der Kordonschätzung ab und unterliegt damit noch größeren Unsicherheiten. Die Untersuchungen in SACHSE (1998) bestätigen die Größenordnung der Prognoseunsicherheit bei der Schätzung von Abbiegeraten.

Die Schätzung zukünftiger Knotenmatrizen als Funktion der übertragenen Information verursacht ebenfalls vergleichsweise große Ungenauigkeiten, da nur Zeitreihenanalysen und historische Daten verwendet werden können. Allerdings können die aktuellen Abbiegeraten sehr gut aus Querschnittsmessungen bestimmt werden.

Bezugsfall der Verkehrsbeziehungen Die Ergebnisse der Netzstrommodellierung verwenden die Randbedingungen, die während der Schätzung gültig waren. Eine wesentliche Änderung der Randbedingung erfolgt durch die an die Verkehrsteilnehmer weitergegebene Information. Für die Anwendung der Kordonmatrix in der Netzsteuerung verwendet man gewöhnlich die auf den Nullfall bezogene Schätzung. Diese geht davon aus, daß keine Information an die Verkehrsteilnehmer weitergegeben wird beziehungsweise keine Fahrzeuge umgeleitet werden. Diese auf den Nullfall bezogene Matrix muß also gegebenenfalls aus einer nicht für den Nullfall geschätzten Matrix ermittelt werden. Auf dieses Problem wird in den einschlägigen Forschungsarbeiten nicht eingegangen. Viele eingesetzte Verfahren besitzen keine Matrixschätzung. Manche Verfahren verwenden historisch ermittelte Abbiegeraten. Eine „online“ Matrixschätzung wird in

beinahe keinem Verfahren eingesetzt. Ausnahmen davon bilden die Verkehrsbeeinflussungsanlage Turin (BIORA ET AL., 1998) und die Forschungsarbeit VARIA (SACHSE, 1998).

Änderung der Verkehrsbeziehungen Untersuchungen am Testnetz München Nord haben ergeben, daß sich die Kordonmatrizen eines betrachteten Netzumgriffs ändern, wenn eine Umleitungsempfehlung gegeben wird (SACHSE, 1998). Dies liegt hauptsächlich daran, daß die Verkehrsteilnehmer das im Netzumgriff nicht enthaltene untergeordnete Straßennetz und damit andere Ausfahrten des Autobahnnetzes benutzen als ohne Umleitungsempfehlung (vergleiche Bild 2.7, Netz (c)). Auch dieses Problem wird in der bisherigen internationalen Literatur nicht diskutiert. Weiterhin kann auch eine tatsächliche Änderung der Wegeketten nicht ausgeschlossen werden, insbesondere wenn künftig auch eine individuelle Zielführung mit der Änderung der Wegeketten als Steuerungsstrategie betrachtet wird.

Streuung der Wirkung Untersuchungen am Autobahnnetz München Nord ergaben eine große Streuung der Wirkung in Form von Abbiegeraten beziehungsweise Knotenmatrizen zwischen 5% und 40% (KRUX ET AL., 1997). Die Knotenmatrix kann daher als Funktion der Steuerungsvariablen nicht zuverlässig geschätzt werden. Dies gilt analog auch für die Akzeptanzraten bei auf den Nullfall (keine Verkehrsbeeinflussung) bezogenen Knotenmatrizen.

Konsequenz Die Netzmodellierung ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Lediglich die aktuellen Knotenmatrizen können meßwertbasiert ermittelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher angestrebt sowohl auf die Quelle–Zielmatrix als auch auf die Kordonmatrix verzichten zu können. Die Netzstrommodellierung des Verfahrens sollte sich im wesentlichen auf die Ermittlung der Knotenmatrizen beschränken können. Das Steuerungsverfahren wird soweit offen gehalten, daß eine in Zukunft eventuell mit entsprechender Zuverlässigkeit meßbare oder schätzbare Kordonmatrix in die Modelle einfließen kann.

Die Verkehrsflußmodellierung

Definition Die Verkehrsflußmodellierung dient zur räumlich–zeitlichen Abbildung des Verkehrs zwischen den Netzknoten. An den Knoten muß auf die Verkehrsstrommodelle zurückgegriffen werden. Die Verkehrsflußmodelle können zum Teil die Ergebnisse der Netzstrommodellierung direkt verwenden. Auf diese Weise ist es möglich, auch die netzhaften Wirkungen räumlich zu simulieren. Während bei der Netzstrommodellierung die Aufteilung der Verkehrsströme an den Knoten im Vordergrund steht, ist das Hauptanliegen der Verkehrsflußmodellierung, den eigentlichen Verkehrsablauf zu modellieren. Dazu gehört neben der Modellierung des Verkehrsablaufes auf streckenförmigen Abschnitten auch die Modellierung des Verkehrsablaufes an Knoten bezüglich ihrer Wirkungen auf die Kapazität der Strecken. Dies gilt insbesondere für die Modellierung

der Verflechtungsvorgänge. Die Verkehrsflußmodellierung kann zur Beobachtung des Istzustandes genauso benutzt werden wie zur Prognose.

Ansätze Es gibt ein weites Spektrum von Verkehrsflußmodellen. Bild 2.9 gibt einen Überblick. Die Verkehrsflußmodelle lassen sich bezüglich der Aggregation der model-

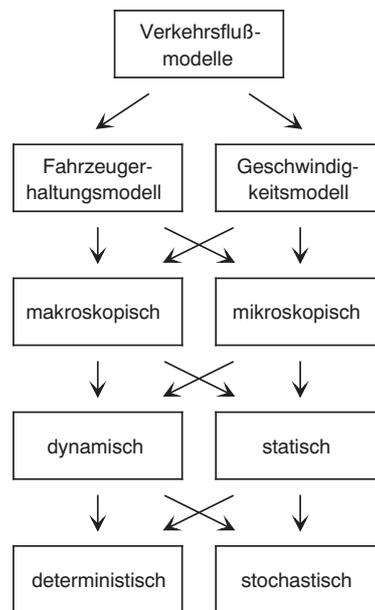


Abbildung 2.9: Klassifizierung der Verkehrsflußmodelle

lierten Zustandsgrößen in mikroskopisch (Einzelfahrzeuge) und makroskopisch (Fahrzeugkollektive) einteilen. Diese Unterteilung kann getrennt für die Modellierung der Geschwindigkeit beziehungsweise Beschleunigung und die Modellierung der Fahrzeugerhaltung beziehungsweise der Fahrzeugbewegung durchgeführt werden.

Der Grundgedanke der Theorie der kinematischen Wellen (LIGHTHILL und WHITHAM, 1955a) und der makroskopischen Modelle ist die Beschreibung des Verkehrs in orts- und zeitabhängigen makroskopischen Verkehrskenngrößen wie die Geschwindigkeit, die Verkehrsdichte oder den Verkehrsfluß. Eine Modellgleichung läßt sich aus der „Massenerhaltung“ beziehungsweise der Fahrzeugerhaltung ableiten. Diese Kontinuitätsgleichung betrachtet die Bilanz der zeitlichen Änderung der Fahrzeugdichte und der räumlichen Änderung des Flusses. Verlassen einen Abschnitt im Mittel mehr Fahrzeuge als hinzukommen, so verringert sich die Verkehrsdichte im Abschnitt und umgekehrt. Die Geschwindigkeit wird entweder direkt aus dem Fundamentaldiagramm oder mit zusätzlicher Berücksichtigung der dynamischen Effekte berechnet. Die Theorie der kinematischen Wellen wird teilweise auch in realisierten Anlagen zur Netzsteuerung verwendet (KAYSER ET AL., 1986).

Den mikroskopischen Modellen (REUSCHEL, 1950; WIEDEMANN, 1974; LUDMANN, 1998) liegt das Abstandsverhalten von Einzelfahrzeugen zugrunde, das über dynamische Wechselwirkungen modelliert wird. Die mikroskopischen Modelle sind bei in der Regel hohem Rechenaufwand sehr fein auflösend. Dieser Detaillierungsgrad wird bei Netzsteuerungen nicht benötigt.

Neben rein mikroskopischen (z.B. PELOPS; LUDMANN (1998)) und rein makroskopischen Modellen (z.B. SIMONE; CREMER (1979); MEISSNER und BÖKER (1997)) gibt es sogenannte mesoskopische Modelle. Hierbei können zwei Hauptarten unterschieden werden, je nachdem, ob die Fahrzeughaltung makroskopisch und die Geschwindigkeitsgleichung mikroskopisch (z.B. PAKSIM; GRAU und BARCELO (1992)) oder umgekehrt (z.B. ANIMAL; KATES (1995)) simuliert werden. Die Modelle können zudem daran unterschieden werden, ob sie dynamische (SIMONE, PELOPS) oder statische Modellgleichungen (z.B. LIGHTHILL und WHITHAM (1955b); RICHARDS (1956)) verwenden. Die Modelle können zudem rein deterministisch sein, oder auch stochastische Anteile besitzen.

Die Modellfehler der Verkehrsflußmodelle schwanken je nach Anwendung. Die Modellfehler werden in der Literatur (CREMER, 1979; KATES, 1995, 1994) mit weniger als 10% angegeben, wenn nur der augenblickliche Verkehrszustand zwischen zwei Meßquerschnitten geschätzt werden soll. Die Prognosegenauigkeit hängt wie bei der Zeitreihenanalyse von der Zahl der prognostizierten Zeitschritte ab. Durch die Verwendung des Modellwissens liefert die Prognose mittels Verkehrsflußmodellierung unter Nutzung von Meßschleifen stromaufwärts jedoch bessere Ergebnisse als die Zeitreihenprognose (SACHSE, 1998).

Diskussion

Anfangsbedingungen Die Verkehrsflußmodelle müssen beim Start der Berechnung initialisiert werden. Hierzu muß auf ein geeignetes Verfahren wie zum Beispiel eine Querschnittsinterpolation zurückgegriffen werden, wenn nur querschnittbezogene Meßdaten verfügbar sind. Eine weitere Alternative neben der Querschnittsinterpolation ist die fortwährende Berechnung des Verkehrszustandes, so daß nur bei Systemstart initialisiert werden muß, nicht aber bei einer neuen Berechnung des Stelleingriffes. Die Initialisierung hat einen erheblichen Einfluß auf die Modellergebnisse, insbesondere, wenn diese in einer Prognose nicht durch Meßdaten gestützt sind. Auf das Initialisierungsverfahren kann verzichtet werden, wenn auf räumlich erfaßte Meßdaten zurückgegriffen werden kann.

Modellgenauigkeiten Es werden wie bei der Netzstrommodellierung ebenfalls neue Informationen berechnet, aber unter wesentlich enger definierten Randbedingungen. Dadurch können geringere Modellfehler erwartet werden. Die Modellfehler

integrieren sich bei ungestützter Simulation auf, so daß Langzeitprognosen als problematisch eingestuft werden müssen. Für Prognosen werden abhängig vom Netzumgriff an den Netzrändern die sehr kritischen querschnittsbezogenen Verkehrsnachfragemodelle benötigt, die die prognostizierten Verkehrsdaten an den Netzgrenzen liefern.

Konsequenz Die Verkehrsflußmodelle besitzen eine hohe systematische Bestimmtheit (CREMER, 1979; KATES, 1995, 1994). Kurzzeitprognosen und räumliche Schätzungen des Verkehrsflusses können auch mit einfachen Modellen sehr genau – im Vergleich zu Netzmodellen – durchgeführt werden. Ungestützte Prognosen sollten vermieden werden, insbesondere dann, wenn auf Verkehrsnachfragemodelle zurückgegriffen werden muß (SACHSE, 1998). Die örtliche Modellierung des Verkehrsflusses kann bei geeigneten Meßdaten als unkritisch und damit als geeignet eingestuft werden, querschnittsbezogene Meßdaten räumlich zu interpolieren (CREMER, 1979).

2.5.2 Das Steuerungsmodell

Die Bestandteile

Das Steuerungsmodell besteht aus einem Steuerungskriterium und dem Entscheidungsalgorithmus. Das Steuerungskriterium ist die mathematische Beschreibung der verkehrlichen Ziele. Der Entscheidungsalgorithmus erfüllt das Steuerungskriterium unter Nutzung der Verkehrsmodelle und berechnet so die Steuerungsvariable. Die Steuerungsvariable führt zu primären Wirkungen wie der Menge der ungeleiteten Fahrzeuge; diese wiederum verursachen sekundäre Wirkungen wie die Größe der Reisezeit.

Das Entscheidungskriterium

Ansätze Im Entscheidungskriterium kann eine Berechnungsvorschrift und eine Entscheidungsvorschrift (siehe Bild 2.10) unterschieden werden. Die Berechnungsvorschrift

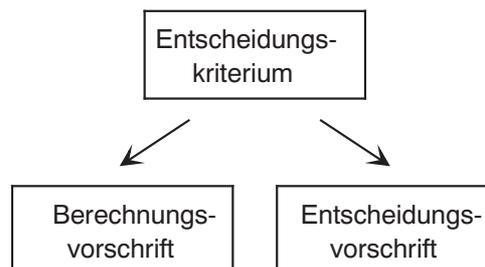


Abbildung 2.10: Die logischen Bestandteile der Zielfunktion

gibt vor, auf welche Weise aus den Ergebnissen des Verkehrsmodells die einzelnen Bewertungskriterien des Entscheidungskriteriums berechnet werden. Das Bewertungskriterium kann aus beliebigen aggregierten Verkehrsgrößen bestehen. Typische Bewertungskriterien sind der „Level of Service“ einer Strecke oder die Reisezeit einer Route.

Das Entscheidungskriterium dient zur Umsetzung der verkehrlichen Zielsetzungen. Eine verkehrliche Zielsetzung könnte zum Beispiel die Vermeidung von gebundenem Verkehr („Stau“) auf einem bestimmten Netzabschnitt sein. Das Entscheidungskriterium beinhaltet auch eine Entscheidungsvorschrift, auf welche Art die Berechnungsvorschrift beziehungsweise die Bewertungskriterien angewendet werden sollen. Hierbei gibt es in den bisherigen Ansätzen zur Netzsteuerung zwei häufige Vorgehensweisen:

- Es werden Schwellenwerte für die Entscheidungskriterien angegeben, ab denen ein bestimmter Stelleingriff vorgenommen werden soll (PTV, 1993; POSCHINGER ET AL., 1997b; POSCHINGER, 1997). Eine Erweiterung dieses Ansatzes ist die Nutzung von Fuzzy Control und Expertensystemen.
- Die Entscheidungskriterien sollen in einer Zielfunktion optimiert, also entweder maximiert oder minimiert werden; oft wird nur ein Entscheidungskriterium verwendet.

Die dritte Vorgehensweise ist weit seltener anzutreffen:

- Die Entscheidungskriterien werden als Sollwerte aufgefaßt; die Entscheidungsvorschrift gibt an, wie aus den Soll- und Istwerten sowie deren Differenzen der Stelleingriff ermittelt wird. PAPAGEORGIOU ET AL. (1990) beschreiben die Anwendung von Sollwerten zur Zuflußdosierung. Die Verwendung von Sollwerten zur Anwendung in Netzsteuerungen findet sich zum ersten Mal in einer Diplomarbeit (WOLFF, 1990), ohne aber den methodischen Ansatz zu erkennen und auszuformulieren. Vielmehr wurde festgestellt, daß es in der Netzsteuerung keine als Sollwerte geeignete Größen gibt.

Die Festlegung der Entscheidungskriterien kann zwei unterschiedlichen Steuerungsvorgaben folgen: das Systemoptimum und das Nutzeroptimum (WARDROP, 1952).

Systemoptimum versus Nutzeroptimum Das Systemoptimum (WARDROP, 1952) versucht die im Netzumgriff entstehenden Gesamtkosten zu optimieren. Dies können zum Beispiel summierte Reisezeiten sein; der Begriff der „Kosten“ wird im folgenden unabhängig von einer Monetarisierung abstrakt verwendet. Das Systemoptimum steht für die öffentliche Hand im Vordergrund, da es volkswirtschaftlich relevant ist. Das Systemoptimum führt bei Netzsteuerungen in der Regel zu höheren Kosten für diejenigen Verkehrsteilnehmer, die anstelle ihrer bevorzugten Hauptroute eine Alternativroute nutzen. Aufgrund der bisher nicht ausreichend erforschten Auswirkungen von verkehrlichen Zielsetzungen auf die Akzeptanz kann das tatsächliche Systemoptimum nicht ermittelt werden.

Beim Nutzeroptimum werden die Kosten des einzelnen Individuums optimiert. Dies bewirkt einen Ausgleich der Reisezeiten auf den Alternativrouten, da den Verkehrsteilnehmern immer die schnellere Route empfohlen wird.

Diskussion Die Netzsteuerung hat nur empfehlenden Charakter. Die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer ist daher entscheidend. Unter der Annahme, daß das Systemoptimum keine Akzeptanz finden würde, gibt es keine Wirkung, und das Systemoptimum führt sich ad absurdum. Aus dieser Überlegung stellt das Nutzeroptimum eine gute Näherung für das Systemoptimum dar, da nur in diesem Fall mit hohen Akzeptanzen gerechnet werden kann.

Die Vorgabe von Schwellenwerten erfordert einen hohen Kalibrierungsaufwand. Schwellenwerte setzen zudem ein bestimmtes Systemverhalten voraus. Die Schwellenwerte müssen angepaßt werden, wenn sich das Systemverhalten ändert. Schnelle Änderungen des Systemverhaltens, zum Beispiel bei Auftreten unterschiedlicher Stautypen, können nur schwer berücksichtigt werden. Diese systematischen Defizite gelten auch für erweiterte Ansätze unter Nutzung von Fuzzy Reglern und Expertensystemen.

Die Nutzung von Bewertungskriterien, die eine Prognose benötigen (zum Beispiel Reisezeiten), ist kritisch im Hinblick auf die Modellunsicherheiten und der damit sinkenden Zuverlässigkeit. Wird das Entscheidungskriterium zusätzlich optimiert, so müssen in der Regel noch längere Prognoseintervalle mit den entsprechenden Unsicherheiten gewählt werden.

Die Sollwerte (z.B. die Dichte eines Abschnitts in PAPAGEORGIU ET AL. (1990)) wurden bisher statisch vorgegeben; sie sind daher nicht an die entsprechenden Verkehrsverhältnisse angepaßt.

Konsequenz Es darf nur in Ausnahmefällen vom Nutzeroptimum abgewichen werden. Prognosen schaden, wenn die Zuverlässigkeit der Verkehrsmodelle aufgrund der Prognose so stark abnimmt, daß der Zuverlässigkeitsgewinn der Entscheidungskriterien aufgrund der besseren Abbildung der verkehrlichen Ziele dies nicht mehr ausgleichen kann. Die Vorgabe von Schwellenwerten ist aufgrund des Kalibrierungsaufwandes ebenfalls nicht gut geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das Konzept der Sollwerte weiterverfolgt. Dieser Ansatz wird unter Beachtung der verkehrstechnischen Erfordernissen methodisiert und durch die Nutzung *dynamischer* Sollwerte erweitert. Es ergibt sich ein geringer Parametrisierungsaufwand, wenn die Algorithmen zur Berechnung der Sollwerte geeignet gewählt werden.

Der Entscheidungsalgorithmus

Ansätze Der Entscheidungsalgorithmus setzt die als Entscheidungskriterien formulierten Vorschriften in den Stelleingriff um. Der Entscheidungsalgorithmus besteht aus einer einfachen Schwellenwertabfrage, wenn in der Zielfunktion das Konzept der Schwellenwerte verwendet wird. Der Entscheidungsalgorithmus muß neben der Auswertung der Berechnungsvorschrift für das Entscheidungskriterium und dem Schwellenwertvergleich als Entscheidungsvorschrift auch noch eine Überwachung der Stelleingriffe vor-

nehmen, um zum Beispiel unplausible Abfolgen von Stelleingriffen zu vermeiden (PTV, 1993).

Der Entscheidungsalgorithmus kann ein weites Spektrum von Optimierungsansätzen umfassen, wenn als Entscheidungskriterium eine zu optimierende Zielfunktion verwendet wird. Bei Netzsteuerungen wird meist davon ausgegangen, daß der Stelleingriff während des Prognosehorizonts konstant bleibt (zum Beispiel CREMER ET AL. (1993); SACHSE (1998)), und eine Abfolge von Stelleingriffen nicht berücksichtigt wird. In diesem Fall reduziert sich das Optimierungsproblem auf eine geringe Zahl von diskreten Stelleingriffen. Jeder Stelleingriff, also jede Änderung der Steuerungsvariablen wird mittels der Zielfunktion bewertet. Der bezüglich der Zielfunktion beziehungsweise des Entscheidungskriteriums beste Stelleingriff wird gewählt. Eine zusätzliche Logik stellt die Plausibilität sicher. Diese Vorgehensweise findet sich neben der Schwellenwertabfrage häufig bei implementierten Anlagen (z.B. KLÖFKORN ET AL. (1991)).

Da der Stelleingriff meist in wesentlich kürzeren Abständen als dem Prognoseintervall geändert werden kann, bietet es sich jedoch an, die Optimierung für eine Abfolge von Stelleingriffen durchzuführen. Das Optimierungsproblem besteht dann aus einer hohen Zahl von Kombinationsmöglichkeiten. In einem Beispiel mit einer möglichen Änderung des Stelleingriffs alle 5 *min* und einem Prognoseintervall von 30 *min* kann während eines Prognoseintervalls der Stelleingriff sechs mal geändert werden. Dies ergibt bei fünf möglichen Stelleingriffen für ein Alternativroutenpaar bereits $5^6 = 15625$ Möglichkeiten. Gewöhnlich reicht die Rechenleistung nicht aus um alle Kombinationen zu testen. Es muß daher auf einen heuristisch- numerischen Optimierungsalgorithmus zurückgegriffen werden; dieser Ansatz wird im Bereich der Netzsteuerung nur in Forschungsarbeiten verfolgt (MESSMER, 1994).

Die Optimierung selbst kann offline und online erfolgen. Die offline Optimierung erfordert die Speicherung der Stelleingriffe als Funktion des Verkehrszustandes (CREMER, 1979) und stellt damit eine Kombination des Konzepts der Schwellenwerte mit dem Konzept der Optimierung dar. Die offline Optimierung wird zum Beispiel im System OPERA (MORIN ET AL., 1994) genutzt. Offline Optimierungen können als Expertensysteme interpretiert werden. Die online Optimierung berechnet den Stelleingriff „online“ zum aktuell gemessenen Schaltzustand. Die Echtzeitfähigkeit des Steuerungsverfahrens muß dabei berücksichtigt werden. Ansätze zur Kombination der online und offline Optimierung sind bei Netzsteuerungen noch nicht bekannt.

Die Einhaltung von Sollwerten gelingt durch die Verwendung von Reglern. In den wenigen bisherigen Arbeiten wurden ausschließlich lineare Regler verwendet (WOLFF, 1990; PAPAGEORGIOU ET AL., 1990), obwohl der Verkehr ein nichtlineares und auch zeitvariantes System darstellt.

Diskussion Das Hauptdefizit der Schwellenwerte ist der hohe Parametrisierungsaufwand. In den Parametrisierungsaufwand geht das Produkt aus der Zahl der Steuerkriterien und der im Mittel verwendeten Schwellenwerte pro Kriterium ein. Die Zahl der Steuerkriterien ist in der Regel proportional zur Zahl der Meßquerschnitte eines Netzes.

Die Optimierung eines Entscheidungskriteriums unter Annahme eines über den Prognosehorizont konstant gehaltenen Stelleingriffs liefert vom Ansatz her, auch ohne Berücksichtigung der Modellunsicherheiten, nur ein suboptimales Ergebnis. Der für den Berechnungsabschnitt eigentlich optimale Stelleingriff wird in der Regel nicht ermittelt, da für den gesamten Prognosehorizont ein anderer Stelleingriff im Mittel optimal ist. Die Optimierung von Steuereingriffsabfolgen bedingt einen heuristisch- numerischen Optimierungsalgorithmus wie das Gradientenabstiegsverfahren. Damit kann prinzipiell nicht sichergestellt werden, daß das globale Optimum gefunden wird. Alle Ansätze zur Optimierung greifen auf die Verkehrsmodelle zurück. Sie benötigen insbesondere eine detaillierte Netzstrommodellierung, um direkt den Stelleingriff liefern zu können.

Die Regelung von Sollwerten wurde bisher noch nicht ausreichend untersucht. Es wurde insbesondere auch nicht geprüft, inwieweit die Zuverlässigkeit erhöht werden kann, wenn die Verkehrsmodelle mit einem Entscheidungsalgorithmus, der auf dynamischen Sollwerten und der Nutzung der Regelfehler aufbaut, gekoppelt werden.

Konsequenz Der Schwellenwert- beziehungsweise Expertensystemansatz könnte durch Berücksichtigung der Zeitvarianzen des Verkehrs weiterentwickelt werden; er würde aber dann immer noch einen systematisch hohen Parametrisierungsaufwand besitzen. Die Nachteile der Optimierung in Form der durch Prognose geringen Zuverlässigkeit der Modelle lassen es sinnvoll erscheinen, Ansätze zu verfolgen, die ohne Prognose auskommen. Zugleich ist die Verwendung von Sollwerten in der Zielfunktion beziehungsweise die Verwendung von Reglern im Entscheidungsalgorithmus bisher nur am Rande erforscht. In dieser Arbeit wird daher angestrebt, die Benutzung von Sollwerten weiter zu entwickeln und dynamische Sollwerte zu verwenden.

Die Abhängigkeit des Entscheidungsalgorithmus von den Netzstrommodellen sollte reduziert werden. Hierzu wird in der Arbeit die Basisarchitektur der Steuerungsverfahren erweitert; Sollwerte und Regler haben auch daran entscheidenden Anteil. Nicht nur die Bewertungskriterien beziehungsweise die ihnen zugrundeliegenden Verkehrsgrößen selbst, sondern auch andere Größen, beispielsweise die aktuellen Wirkungen der Steuerungsvariablen, können durch diesen Ansatz berücksichtigt und beeinflußt werden.

2.6 Die Implementierung

2.6.1 Einleitung

Die Implementierung ist die Umsetzung der Steuerungsmodelle in ein Programm, das auf einem Rechner ausgeführt werden kann; sie ist damit Teil des Steuerungsverfahrens. Neben der eigentlichen Erzeugung der Quelltexte in einer gewählten Programmiersprache beinhaltet sie auch das Design der Software. Die Steuerungsmodelle müssen geeignet gegliedert werden. Die Kommunikation, also der Datenaustausch und die Synchronisierung zwischen den Modulen, muß definiert werden. Ein Steuerungsverfahren ist ein komplexes System aus Teilmodellen, das durch eine Strukturierung in überschaubare Teilbereiche gegliedert werden kann.

Die Implementierung trägt zur Gesamtzuverlässigkeit eines Steuerungsverfahrens bei. Es muß daher auf eine möglichst fehlerfreie Implementierung geachtet werden. Die Implementierung wird bei der Beschreibung eines Steuerungsverfahrens oft ausgeklammert, obwohl sie ein wesentlicher Teil davon ist.

Häufig wird unter Implementierung der Aufbau der Hardware im Sinne der Anlagentechnik verstanden; die Anlagentechnik gehört zur Steuerungstechnik und nicht zum Steuerungsverfahren, auf das sich diese Arbeit konzentriert.

2.6.2 Ansätze

Es gibt ein weites Spektrum an Literatur mit welchen Ansätzen komplexe Systeme als Software umgesetzt werden können (BUSCHMANN ET AL., 1996; GAMMA ET AL., 1996; STROUSTRUP, 1994). Die Modularisierung kann durch Unterteilung in Einzelprogramme erfolgen. Ein Programm kann in den meisten Programmiersprachen auch intern in Module unterteilt werden. Es gibt prozedurale und objektorientierte Programmiersprachen. Seit neuerer Zeit liefert die Informatik programmiersprachenunabhängige Verfahren oder zumindest Ansätze mit welcher Vorgehensweise man eine geeignete Softwaregliederung erhält.

Auch die Implementierung besitzt einen sehr hohen Einfluß auf die Zuverlässigkeit des Systems. Jedes Modul (siehe Bild 2.11) besteht als Detaillierung der bisherigen Überlegungen nicht nur aus dem eigentlichen Modell (Z_{mod}), sondern zusätzlich aus der Implementierung des Modells (Z_{impl}), einer Dateneingabeschicht (Z_{in}) und einer Datenausgabeschicht (Z_{out}). Unter Annahme der Teilzuverlässigkeiten zu $Z_{mod} = 0.95$, $Z_{impl} = 0.95$, $Z_{in} = 0.98$ und $Z_{out} = 0.98$ ergibt sich eine Modulzuverlässigkeit Z_{mges} zu $Z_{mges} \approx 0.87$.

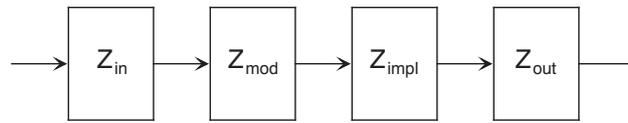


Abbildung 2.11: Zusammensetzung eines Moduls

2.6.3 Diskussion

Das Auftreten von Flüchtigkeitsfehler bei der Programmerstellung, wie zum Beispiel falsche Typkonvertierungen oder der Zugriff auf ungültige Speicherbereiche, können durch geeignete Werkzeuge abgefangen werden. Der Funktionsumfang solcher Werkzeuge hängt von der Programmiersprache und der in ihr erlaubten Konstrukte ab.

Eine ungeeignete, womöglich unsystematische Softwaregliederung, erschwert nicht nur die Entwicklung des Systems, sondern auch dessen Wartung. Die Software beziehungsweise ihre Handhabung neigt ab einer kritischen Masse aufgrund einer schweren Überschaubarkeit zu vielen Problemen. Diese beinhalten, daß der Entwicklungsaufwand überproportional steigt, die Fehler nicht mehr beseitigt werden können, Änderungen nicht mehr möglich sind und so weiter. Diese Problematik wird oft mit dem Schlagwort „Softwarekrise“ beschrieben. Eine personell getrennte Verantwortung für die Entwicklung der Algorithmen und deren Umsetzung verschärft dieses Problem. Je besser allerdings die Strukturierung der Software ist, umso größer kann sie werden bis die kritische Masse erreicht wird. Das in der Praxis verwendete V-Modell (Vorgehensmodell) gibt keine Hilfestellung bei der Erstellung des Softwaredesigns; es regelt lediglich das Vorgehen, insbesondere das organisatorische und institutionelle Vorgehen zur Erstellung der Software (DRÖSCHEL und HEUSER, 1998).

2.6.4 Konsequenz

Der Implementierung des Verfahrens muß große Aufmerksamkeit gewidmet werden. Flüchtigkeitsfehler können durch die Wahl einer geeigneten Programmiersprache und geeigneter Übersetzungswerkzeuge eingeschränkt werden. Die Typsicherheit der Programmiersprache sollte als Minimalvoraussetzung gesehen werden. Eine automatische Überwachung der Speicherverwaltung ist ebenfalls sehr nützlich.

Die Strukturierung der Software muß geeignet gewählt werden. Neben der Kapselung der Teilmodelle, die schon in den vorangegangenen Abschnitten strukturiert beschrieben wurde, ist dies auch die Organisation der Daten, zum Beispiel in Bezug auf ihre örtliche Zugehörigkeit im Netz. Dadurch könnte die Zuverlässigkeit der Dateneingabe- und Datenausgabeschichten verbessert werden. Eine Mehrfachverwendung von Softwareteilen könnte mit der damit oft verbundenen besseren Validierung die Zuverlässigkeit erhöhen. Steuerungsverfahren können meist erweitert und verbessert werden; im

Interesse geringer (Folge-) Kosten sollte daher auch die Möglichkeit für zukünftige Erweiterungen berücksichtigt werden.

Durch die Entwicklung eines systematischen Aufbaus der Software können auch die Personen, die die Modelle entwerfen, in die Softwareentwicklung eingebunden werden. Die Programmierkenntnisse, die für die Implementierung eines Teilmodells im Rahmen der Gesamtsoftware benötigt werden, müssen allerdings gering gehalten werden, da aufgrund der benötigten Übung in der Regel nur Vollzeitprogrammierer die Konstrukte der jeweiligen Programmiersprache im Detail beherrschen können. Die algorithmusrelevanten Softwareteile können so effizient umgesetzt und getestet werden.

Im Rahmen der Arbeit wird ein systematischer Ansatz zur Strukturierung der Software entwickelt und in einem eigenen Kapitel erläutert.

2.7 Validierung

2.7.1 Einleitung

Die meisten komplexen technischen Systeme mit hoher Anforderung an die Verfügbarkeit werden mit einer genauen Angabe des erlaubten Einsatzbereiches, sowie oft auch mit einer Angabe der Ausfallwahrscheinlichkeiten geliefert. Diese Daten werden durch Tests und Berechnungen ermittelt. Die als Validierung bezeichnete Überprüfung ist somit von entscheidender Bedeutung für die Anwendbarkeit eines technischen Systems. Die Validierung wird deshalb ebenfalls als wesentlicher, wenn auch nur logischer, Bestandteil des Steuerungsverfahrens betrachtet.

Die Validierung ist die (Algorithmen-) externe Bewertung, während das Verkehrsmodell des Steuerungsverfahrens als interne Bewertung verwendet wird. Prinzipiell müssen auch die für die externe und interne Bewertung verwendeten Verkehrsmodelle validiert werden. Die externe Bewertung kann sowohl anhand von Feldtests als auch mittels Simulationen erfolgen. Hierbei ist zu beachten, daß die Ergebnisse nicht nur von den Modellen, sondern auch von deren Implementierungen abhängen. Die Zuordnung der Ergebnisse zu den Modellen wird vereinfacht, wenn die Implementierung über Schnittstellen verfügt, an denen konsistente Datensätze abgegriffen werden können.

Die Validierung der Implementierung könnte nur dann losgelöst von der Validierung der Modelle betrachtet werden, wenn die Implementierungen eine Zuverlässigkeit von $Z_{impl} = 1$ erreichen würden. Tatsächlich wird man beide Validierungen immer gemeinsam betrachten müssen; selbst Programmabstürze können neben einem Programmierfehler auch algorithmische Ursachen haben, wie zum Beispiel eine Variable, durch die dividiert wird, und die unvorhergesehen zu null wird.

Es können im wesentlichen drei Punkte validiert werden:

- Die softwaretechnische Stabilität ist gegeben, wenn es zu keinen unkontrollierten Programmabstürzen kommt.
- Die systemtechnische Stabilität ist gegeben, wenn die Verstärkung der Rückkoppelung des Steuerungsverfahrens negatives Vorzeichen besitzt und sich keine aufschaukelnden Regelschwingungen ergeben. Zu diesem Punkt gehört im Zusammenhang der Netzsteuerung auch sicherzustellen, daß die Befolgsraten nicht absinken. Die systemtheoretische Stabilität kann manchmal abhängig vom betrachteten System analytisch untersucht werden; Verfahren hierzu finden sich zum Beispiel in SCHMIDT, G. (1987) und in SLOTINE und LEE (1991).
- Nach Sicherstellung der Stabilität eines Steuerungsverfahrens kann dieses bezüglich seiner Güte und seines zu erwartenden Nutzens bewertet und optimiert werden.

Die Validierung dient zunächst der Erhöhung der Zuverlässigkeit der übrigen Module des Steuerungsverfahrens. Die Zuverlässigkeit dieser Module kann nur im Rahmen der durchgeführten Tests geschätzt werden. Die Zuverlässigkeit der Validierung modelliert den Fall, daß ein bisher nicht validierter Betriebszustand eintritt.

2.7.2 Ansätze

Bewertung durch Feldtest

Das Verfahren kann am realen Verkehrsnetz getestet werden. Dies geschieht in der Regel in mehreren Schritten:

- Die Erfassung des Nullzustandes dokumentiert die Ausgangslage, um die Änderungen durch die Stelleingriffe erfassen und bewerten zu können.
- Das Verfahren wird zunächst im offenen Regelkreis getestet; die vom Verfahren vorgeschlagenen Stelleingriffe werden nicht sichtbar gemacht. Damit kann die prinzipielle Plausibilität des Verfahrens getestet werden. Der Test des offenen Regelkreises kann zeitgleich zur Erfassung des Nullzustandes erfolgen.
- Das Verfahren wird im geschlossenen Regelkreis getestet. Die Stelleingriffe werden sichtbar gemacht. Dieser Test berücksichtigt damit die Rückwirkung der Stelleingriffe auf das System. Der Test muß überwacht erfolgen, um bei instabilem Verhalten die Stelleingriffe unsichtbar zu machen.
- Es wird ein mit–ohne Vergleich durchgeführt. Auf dieser Basis kann eine Berechnung der Kosten und Nutzen durchgeführt werden. Bezüglich der Aussagefähigkeit dieser Untersuchung ist zu beachten, daß sie ebenfalls den Problemen der Datenerhebung und Modelltechnik unterliegt.

Derzeit ist von keinem Verfahren zur Netzsteuerung gesichert bekannt, alle Schritte mit Erfolg passiert zu haben. In der Literatur werden einige wenige erfolgreiche Testläufe

beschrieben (KAYSER ET AL., 1986). Dies kann aber noch nicht als Validierung anerkannt werden. Einige einfache Verfahren (PTV, 1993) laufen so weit bekannt stabil; allerdings scheint es für diese keine Wirkungsanalyse zu geben.

Simulative Bewertung

Das Verfahren kann auch simulativ erprobt werden. Hierzu muß ein Verkehrsmodell verfügbar sein. Die verwendeten Modelle sollten so weit wie möglich von den im Verfahren verwendeten Modellen unabhängig sein. Die Auswirkungen von Modellungenauigkeiten können durch Quervergleich zwischen den Modellen der internen Bewertung und denen der externen Bewertung berücksichtigt und quantifiziert werden.

Die Simulation erlaubt die Bewertung des offenen und geschlossenen Regelkreises. Das Verfahren kann somit schon im Entwicklungsstadium mit vergleichsweise geringem Aufwand getestet und verbessert werden. Abhängig von der gewählten Simulation können auch Teilmodelle des Verfahrens für sich getestet werden. Auf diese Weise kann zum Beispiel das Steuerungsmodell bewertet werden unter der Annahme, daß das Verkehrsmodell fehlerfrei ist. Dies ermöglicht eine vereinfachte und auch genauere Interpretation der Ergebnisse.

2.7.3 Diskussion

Die Durchführung eines Feldtests ist aufwendig. Feldtests können daher während der Entwicklung eines Steuerungsverfahrens nicht in beliebiger Zahl genutzt werden. Die Durchführung eines Feldtests ist zudem mit Risiken verbunden, wenn das Steuerungsverfahren versagen kann. Letztlich kann auf einen Feldtest aber nicht verzichtet werden, da eine simulative Validierung wegen der Modellunsicherheiten nur einen phänomenologisch qualitativen Charakter hat. Insbesondere die Validierung der Steuerungstechnik, die nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, kann nur durch Feldtests erfolgen. Die Technik, etwa die Wirkung der Stelleingriffe, kann aber in weiten Teilen durch manuelle Eingriffe ohne das Steuerungsverfahren validiert werden.

Die simulative Bewertung des geschlossenen Regelkreises ist ebenfalls aufwendig, wenn auch nicht so aufwendig wie ein Feldtest. Das verwendete Modell muß in der Lage sein, den Stelleingriff zu modellieren. Das Modell und das Verfahren müssen gekoppelt werden, so daß die Wirkung des Verfahrens „online“ berechnet werden kann.

2.7.4 Konsequenzen

Der Verkehr ist aufgrund seiner Nichtlinearitäten, seines Totzeitverhaltens und seiner hohen systemtheoretischen Ordnung ein sehr komplexer Prozeß, der sich einer analytischen Handhabung unter Nutzung von Entwurfs- und Stabilitätskriterien weitgehend verschließt. Auf die simulative Validierung des geschlossenen Regelkreises kann daher

bei der Entwicklung eines Verfahrens zur Alternativroutensteuerung kaum verzichtet werden.

Es wird angestrebt, daß ein zukünftiger Feldtest im wesentlichen nur aus einer Inbetriebnahme bestehen wird, bei der die Feinjustierung eventuell vorhandener Parameter des Verfahrens vorgenommen wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine intensive simulative Validierung des zu entwickelnden Verfahrens angestrebt. Das Hauptaugenmerk wird auf der Sicherstellung der softwaretechnischen und systemdynamischen Stabilität des Regelkreises liegen.

2.8 Die Systemarchitektur der Netzsteuerung

2.8.1 Einleitung

Auf Basis der Diskussion der Netzsteuerung wird ein neues Verfahren zur Netzsteuerung entwickelt, dessen Architektur anhand von einfachen Signalflußplänen dargestellt wird. Die Zusammenhänge der in den darauf folgenden Kapiteln beschriebenen Verkehrsmodelle und Steuerungsmodelle werden verdeutlicht.

Es wird zunächst der Ansatz der dynamischen Sollwerte allgemein vorgestellt; dieser Ansatz wird am Beispiel der Netzsteuerung detailliert. In diesem Rahmen wird auch die simulative Validierung in Form von Signalflußplänen gezeigt.

2.8.2 Ansatz der dynamischen Sollwerte

Klassische Struktur der Steuerungsverfahren

Bild 2.12 zeigt die bisherige Struktur von Steuerungsverfahren in Form eines einfachen Signalflußplans. Die Zustände der Teilsysteme sind in diesen Plänen nicht aufgelöst

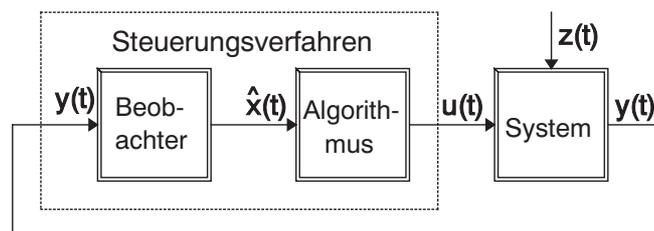


Abbildung 2.12: Bisherige Basisarchitektur von Steuerungsverfahren (SIEGENER ET AL., 1992)

und werden im Zustandsvektor \mathbf{x} zusammengefaßt. Da physikalische Systeme immer Verzögerungsverhalten besitzen, ist in einer zeitdiskreten Darstellung der Meßvektor $\mathbf{y}(n) = \mathbf{y}(\mathbf{u}(n-1))$ eine Funktion der Steuerungsvariablen des letzten Zeitschritts. Die

Meßgrößen \mathbf{y} und die geschätzten Zustände $\hat{\mathbf{x}}$ sowie die geschätzten Zustände $\hat{\mathbf{x}}$ und der Steuervektor \mathbf{u} können auch zeitgleich voneinander abhängen. Ein Verkehrsmodell berechnet den geschätzten Verkehrszustand $\hat{\mathbf{x}}$ als Funktion der Meßgrößen \mathbf{y} . Der Verkehrszustandsvektor kann auch prognostizierte Verkehrsgrößen beziehungsweise Entscheidungsvariablen beinhalten. Die Verkehrsgrößen können je nach Modellvorstellung zum Beispiel die

- mittlere Geschwindigkeiten und Dichten (makroskopisches Modell), oder die
- Geschwindigkeiten und die Orte von Einzelfahrzeugen (mikroskopisches Modell), oder
- Staulängen (Warteschlangenmodelle), und/oder
- Aufteilungsraten bezüglich Quellen und Zielen

sein. Ein Steuerungsmodell berechnet auf Basis des Verkehrszustandes \mathbf{x} direkt den Vektor \mathbf{u} von Steuerungsvariablen. Die Steuerungsvariablen können zum Beispiel

- der Schaltzustand einer Wechselwegweisungsanlage,
- die Geschwindigkeitsbeschränkungen einer Linienbeeinflussungsanlage und/oder
- Grünzeiten einer Lichtsignalanlage

sein. Das System entspricht einem Straßennetz. Die Störgrößen \mathbf{z} modellieren äußere Einflüsse, die nicht beeinflußt werden können; neben Umweltfaktoren, wie zum Beispiel das Wetter, gehört hierzu in der Regel auch die Verkehrsnachfrage an den Grenzen des Netzumgriffes.

Erweiterte Basisarchitektur

Bild 2.13 zeigt die Erweiterung der Basisarchitektur unter Nutzung dynamischer Sollwerte. Das Steuerungsverfahren besteht aus drei Basismodulen:

- Der Beobachter rekonstruiert den aktuellen Verkehrszustand. Er dient damit der Meßdatenaufbereitung.
- Der Algorithmus erzeugt *dynamische Sollwerte* $\mathbf{s}(t)$ für verkehrstechnische Größen, die am besten meßbar, zumindest aber beobachtbar beziehungsweise schätzbar sind; die Güte der Beobachtbarkeit sollte nicht unter 95% liegen. Im Algorithmus können unterschiedlichste Ansätze verwendet werden:
 - heuristische Ansätze
 - Ansätze aus der klassischen Regelungstechnik
 - Ansätze aus der Optimierung

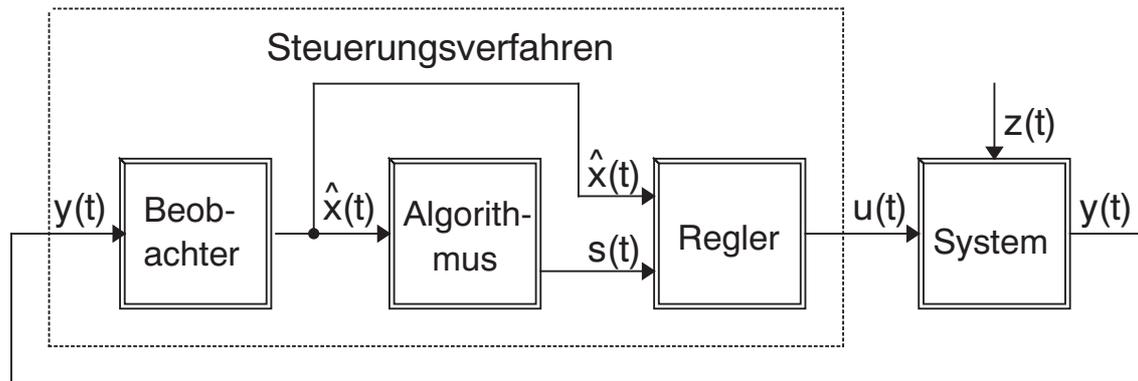


Abbildung 2.13: Erweiterung des Steuerungsverfahrens auf Basis dynamischer Sollwerte

– Kombinationen unterschiedlicher Ansätze

- Im Regler wird die Differenz zwischen den Sollwerten und den gemessenen beziehungsweise beobachteten Größen benutzt, um die Steuerungsvariablen geeignet zu variieren. Der Regelfehler kann dabei sowohl an den Beobachter als auch an den Algorithmus zurückgeführt werden, um den Beobachter beziehungsweise den Algorithmus an ein sich änderndes Systemverhalten adaptieren zu können. Für den Regler eignen sich insbesondere Ansätze aus der linearen und nichtlinearen Regelungstechnik.

Der Algorithmus und der Regler bilden zusammen ein erweitertes Steuerungsmodell. Die Steuerungsvariablen wirken über die Steuerungstechnologie der Verkehrsbeeinflussungsanlage auf die Regelstrecke beziehungsweise das Straßennetz. Damit ist ein geschlossener Regelkreis gegeben.

Dieses Konzept wird am Beispiel der Wechselwegweisung entwickelt und in einem Prototypen unter Nutzung von Simulationen umgesetzt.

Erweiterungen

Aus der Basisarchitektur können auch komplexere und mächtigere Architekturen geschaffen werden, wenn man mehrere Instanzen dieser drei Modultypen kombiniert. So kann zum Beispiel ein Beobachtermodul für zwei Beeinflussungssysteme verwendet werden (siehe Bild 2.14), so daß es je zwei Algorithmus- und Reglermodule, aber nur ein Beobachtermodul gibt. Desweiteren kann ein Beeinflussungssystem Zustandsdaten von einem anderen System beziehen; in diesem Fall gibt es von jeder Modulart zwei Module; allerdings ist der Umgriff des Beobachtermodul des einen Systems in diesem Fall kleiner, da das System teilweise die Ergebnisse von einem anderen Beobachtermodul verwenden kann.

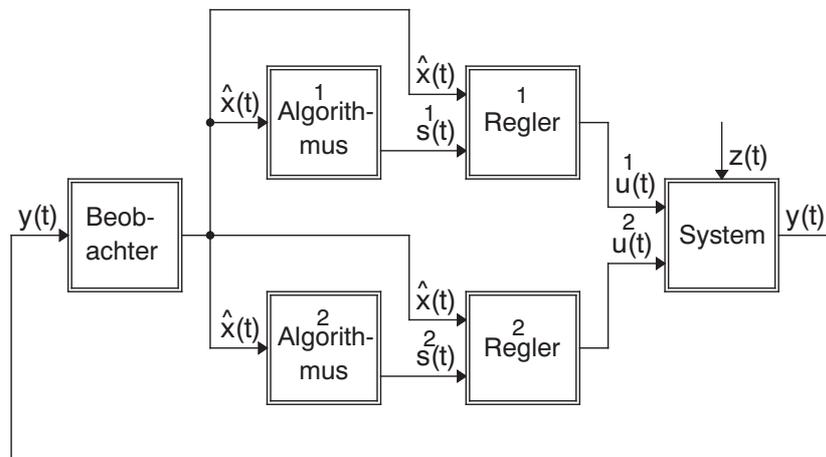


Abbildung 2.14: Parallelstruktur

Es ist auch möglich, die Ausgänge von Algorithmusmodulen als Eingänge für weitere Algorithmusmodule zu verwenden (siehe Bild 2.15). Aus regelungstechnischer Sicht er-

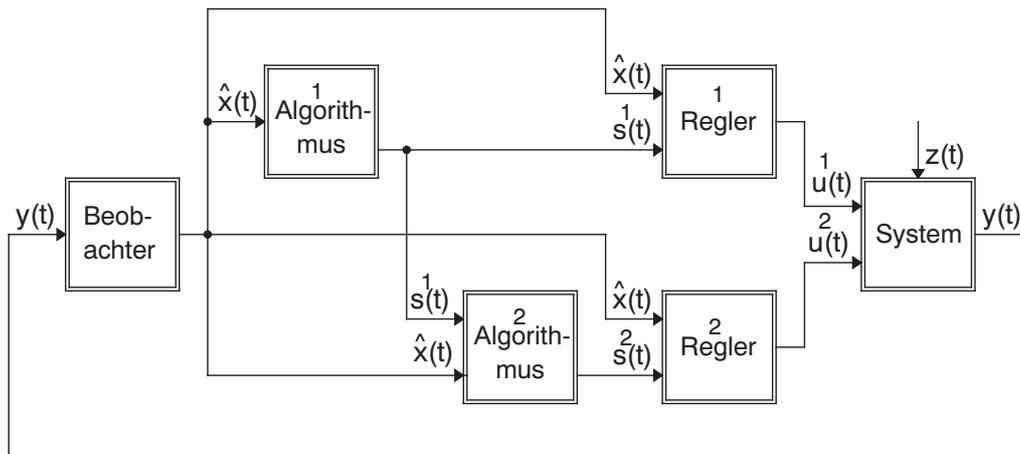


Abbildung 2.15: Kaskadenstruktur

gibt sich daraus eine Kaskadenstruktur. Aus der Sicht der Systemarchitektur bezeichnet man diese Struktur als ein subsidiäres System.

2.8.3 Konkretisierung der Netzsteuerung

Die Systemarchitektur wird für ein Autobahnnetz entworfen, das aus zwei Alternativrouten besteht. Bild 2.16 zeigt eine abstrakte Form des Netzes. Zur Verkehrsbeeinflussung können zum Beispiel Wechselwegweisung, variable Geschwindigkeitsbeschränkung und Zuflußdosierung verwendet werden (CREMER und FLEISCHMANN,

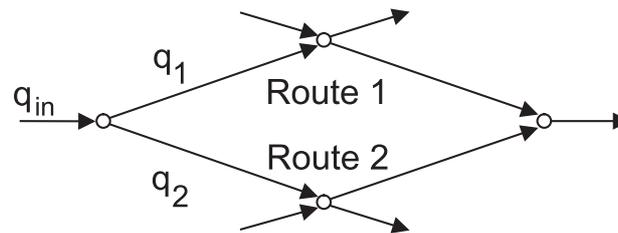


Abbildung 2.16: Netzschema

1987). Unter diesen Randbedingungen wird die Systemarchitektur gemäß dem Bild 2.17 gewählt. Das Gesamtbeeinflussungssystem besteht aus folgenden Komponenten:

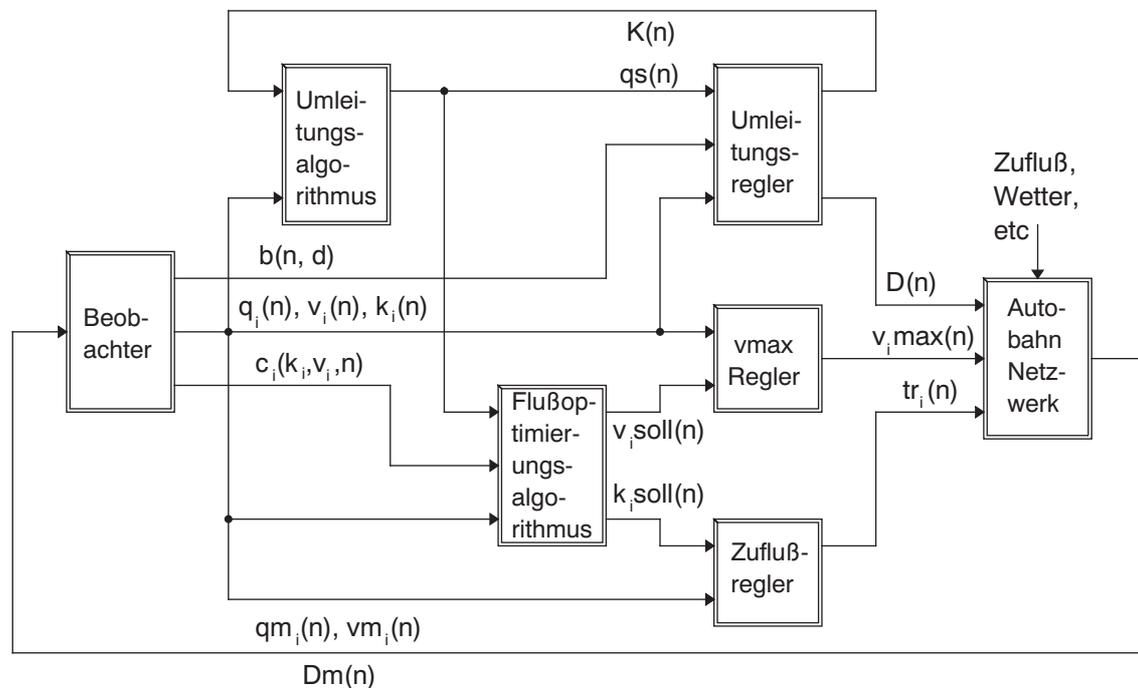


Abbildung 2.17: Architektur eines integrierten Regelungskonzepts

- Der Beobachter ermittelt den aktuellen Verkehrszustand; auf Prognose, insbesondere Ganglinienprognose, und die Schätzung der Kordonmatrix wird aufgrund den Überlegungen zur Zuverlässigkeit weitgehend verzichtet.
- Der Umleitungsalgorithmus ermittelt auf Basis eines Entscheidungskriteriums unter Nutzung des Beobachters einen Sollwert für die umzuleitende Fahrzeugmenge.
- Der Umleitungsregler liefert den Schaltplan, mit dem der Sollwert erfüllt wird.

- Die Flußoptimierungsalgorithmen liefern Sollwerte für die abschnittbezogenen Geschwindigkeiten und Dichten. Dabei kann die Information des Umleitungsalgorithmusses von Nutzen sein, um den zu ermittelnden Sollwertverlauf dynamisch an eine sprungförmig sich ändernde Belastung anzupassen (Sollwerttrajektorien). Überlegungen zu diesem Thema in einem anderen Kontext finden sich zum Beispiel bei HOCHSTÄDTER und CREMER (1997).
- Die Geschwindigkeitsregler liefern die zu schaltenden Höchstgeschwindigkeiten.
- Die Zuflußregler liefern die Freigabezeiten für die Lichtsignalanlagen auf den Rampen, um kurzzeitige abschnittsbezogene Schwankungen der Verkehrsdichte auszugleichen.

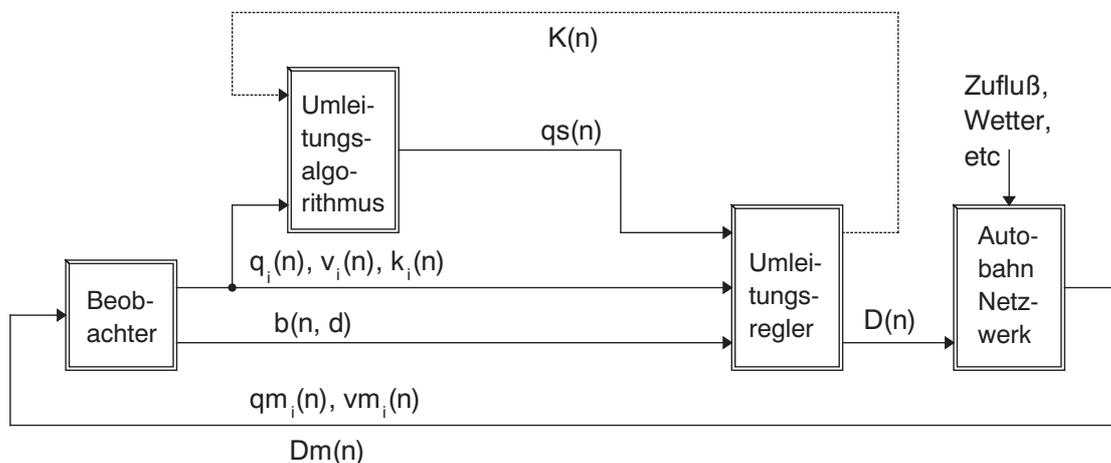


Abbildung 2.18: Architektur der Alternativroutensteuerung

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Ausarbeitung der für die Alternativroutensteuerung benötigten Module (siehe Bild 2.18), die als *pars pro toto* in dieser Arbeit auch als Netzsteuerung bezeichnet wird.

2.8.4 Architektur des Beobachters

Die Architektur des Beobachters ist in Bild 2.19 dargestellt. Neben einer Realdatenkopplung und -aufbereitung besteht der Beobachter aus einem Verkehrsmodell mit Kalmanfilterung zur Schätzung des aktuellen Zustands und einem auf Fuzzyregeln und neuronalen Netzen basierendem Approximator zur Ganglinienprognose. Für die Wechselwegweisung werden sowohl linienbezogene als auch netzbezogene Verkehrszustände benötigt. Die linienbezogenen Verkehrszustände sind abschnittsbezogene Geschwindigkeiten und Dichten. Die netzbezogenen Größen sind Abbiegeraten und gegebenenfalls auch kordonbezogene Quelle-Zielbeziehungen und Akzeptanzraten.

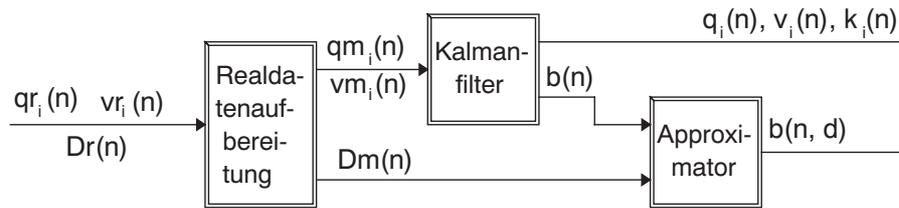


Abbildung 2.19: Architektur des Beobachters

Im Sinne eines gesamtheitlichen Ansatzes ist es nützlich, wenn die Zustandsbeobachtung auch von der Geschwindigkeitsbeeinflussung und Zuflußdosierung verwendet werden kann. Der Kalmanfilteransatz, der bereits mit Erfolg zur Störfallerkennung eingesetzt wird (CREMER und SCHÜTT, 1990), wird hier um die Schätzung der aktuellen Abbiegeraten erweitert und stellt den Kern der Verkehrsmodellierung zur internen Bewertung dar.

Die vom Approximator durchgeführte Ganglinienprognose dient zur Schätzung der Abbiegerate in Abhängigkeit von dem gewählten Schaltplan; sie ermöglicht die Schätzung der Wirkung einer Schaltung bevor sie geschaltet wurde. Die Abbiegeratenschätzung wird neben dem Regelfehler als zusätzliche Störgrößenaufschaltung in der Regelung des umgeleiteten Verkehrsflusses verwendet. Die Schätzfehler der Ganglinienprognose werden von dem Regler mit Hilfe des Regelfehlers ausgeglichen, so daß eine Parallelschaltung bezüglich der Zuverlässigkeit entsteht.

2.8.5 Architektur des Algorithmus

Bild 2.20 zeigt die Architektur des Umleitungsalgorithmus. Es werden drei Betriebsmodi unterschieden. Keine Umleitung ist ein trivialer Betriebsmodus, der keine eigenen Algorithmen besitzt. Mittels der Netzsteuerung können Überlastungen vermieden werden, wenn ausreichende Kapazitätsreserven gegeben sind und das Nutzeroptimum erfüllt ist; dieser Betriebsmodus ist meist nur bei besonderen nicht wiederkehrenden Ereignissen, zum Beispiel bei Störungen, Großveranstaltungen und Unfällen, relevant. Im Fall einer Überlastung des Gesamtnetzes kann der Verkehr verträglich verteilt werden; dies geschieht durch den Stauausgleichsalgorithmus. Eine Arbeitsbereichsauswahl bestimmt anhand der Ergebnisse der Bereiche Überlastungsvermeidung und Stauausgleich den aktuellen Betriebszustand.

2.8.6 Architektur des Reglers

Abbildung 2.21 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Abhängig vom umzuleitenden Strom wird mittels der Abbiegeratenschätzung derjenige Schaltplan gesucht, dessen Wirkung dem Sollwert am ehesten entspricht; dieser Schaltplan wird geschaltet. Die Abbiegeratenschätzung wird aufgrund der möglichen Schätzfehler nur bei einer sprungförmigen

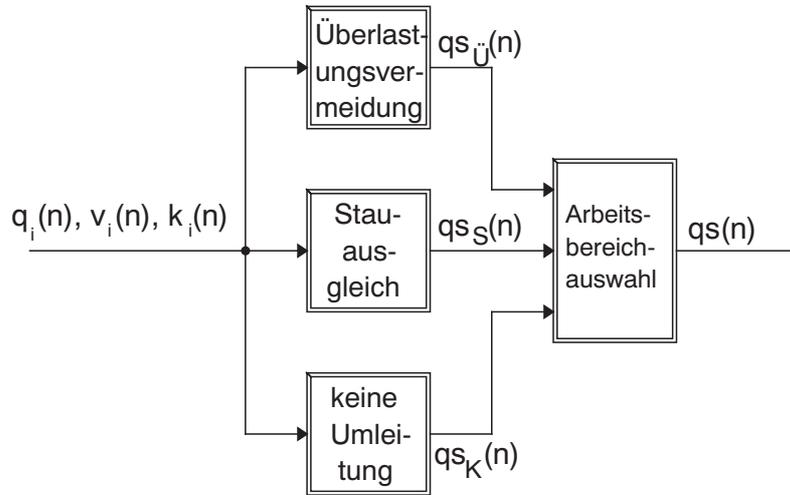


Abbildung 2.20: Architektur des Algorithmus

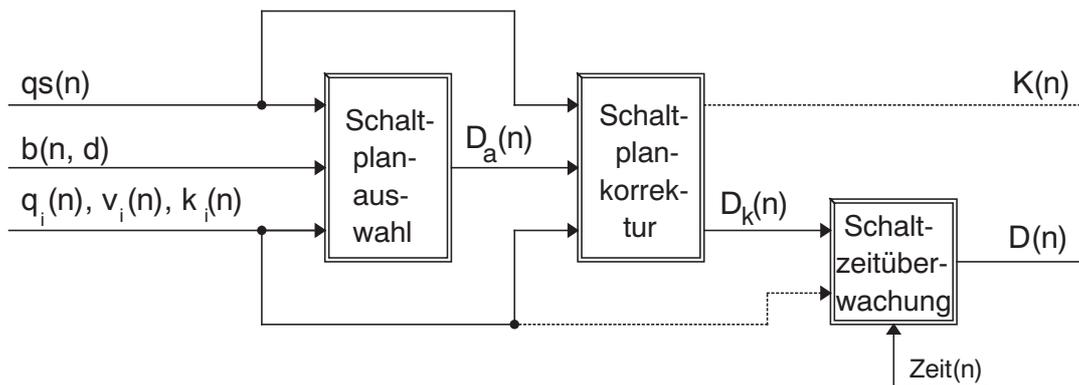


Abbildung 2.21: Architektur des Umleitungsreglers

Änderung des Sollwerts ausgewertet; unter dieser Randbedingung besitzt der Regler ein schlechtes dynamisches Verhalten, so daß eine Störgrößenaufschaltung die Zuverlässigkeit erhöhen kann. Die Schaltplankorrektur verwendet den Regelfehler; sie bildet im wesentlichen einen aus der linearen Regelungstechnik bekannten Integralregler mit Begrenzung des Ausgangs.

Bei regelmäßiger Verwendung der Abbiegeratenschätzung ohne Schaltplankorrektur kann durch die Rückkopplung Wissen – Schaltung – Wissen ein „dead lock“ in der Lernaufgabe entstehen, so daß die Lernverfahren nicht konvergieren.

Eine Schaltzeitüberwachung verhindert, daß ein Fahrer mehr als ein Umschalten einer Wechselwegweiserkette beobachten kann.

2.8.7 Architektur der externen Bewertung

Die Güte der Verkehrssimulation zur externen offline Bewertung der Netzsteuerung besitzt Einfluß auf deren Entwicklung und stellt eigene Anforderungen an den Komplex der Verkehrsmodellierung. Der Aufbau läßt sich im wesentlichen in die Teilbereiche der makroskopischen Simulation des geschlossenen Regelkreises, sowie der Datenversorgung aufteilen. Bild 2.22 zeigt die makroskopische Simulation mit dem Steuerungsverfahren. Die Alternativroutensteuerung kann in einer zweidimensionalen dynamischen

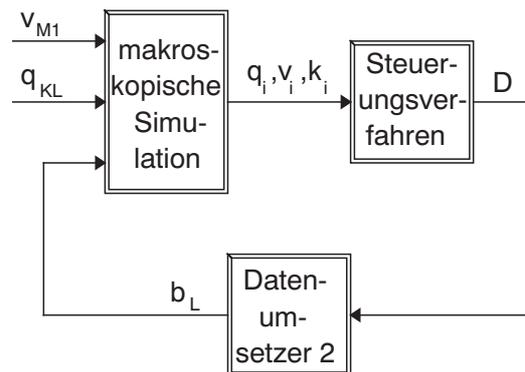


Abbildung 2.22: Externe Bewertung des Steuerungsverfahrens durch die Simulation des Regelkreises

Simulation der Verkehrsströme (siehe Abschnitt 3.4.3) durch Verändern der Abbiegeraten für bestimmte Zielströme berücksichtigt werden. Die Schaltpläne werden von einem Datenumsetzer in Abbiegeraten umgerechnet. Die makroskopische Simulation wird an den Zufahrten mit Geschwindigkeiten und Verkehrsströmen versorgt. Diese werden von einer erweiterten Realdatenaufbereitung ermittelt, die in Bild 2.23 dargestellt ist. Die erweiterte Realdatenversorgung steht mit dem Steuerungsverfahren nicht

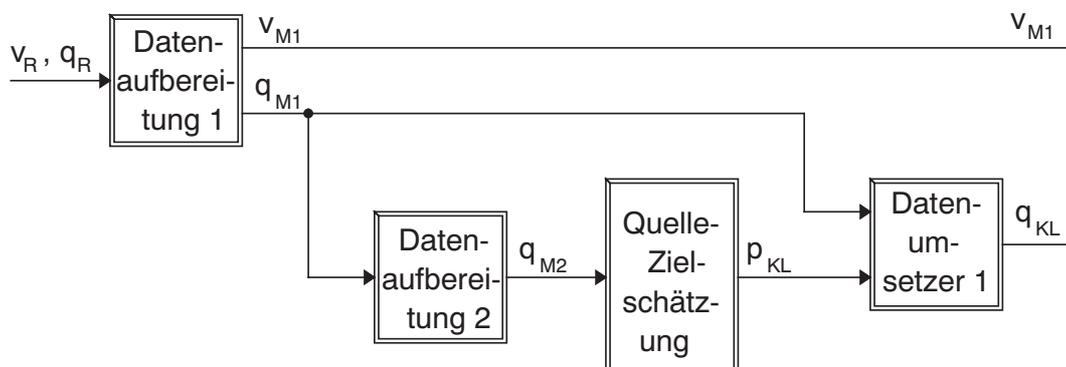


Abbildung 2.23: Erweiterte Realdatenversorgung der Simulation

in Wechselwirkung. Die Datenaufbereitung 1 liefert eine Datenvervollständigung und eine Datenaggregation, zum Beispiel auf 5 minütige Intervalle. Diese werden in der Datenaufbereitung 2 ein weiteres Mal zum Beispiel zu 20 minütigen Intervallen aggregiert und der Schätzung der Kordonmatrix zugeführt. Das Ergebnis der Matrixschätzung wird im Datenumsetzer 1 mit den Werten der ersten Aggregation verrechnet und der makroskopischen Simulation zugeführt. Die beiden Datenaufbereitungsstufen und die Schätzung der Kordonmatrix wurden aus SACHSE (1998) in der Implementierung aus SCHMID und SACHSE (1995) übernommen.

Kapitel 3

Die Verkehrsmodellierung für das Steuerungsverfahren

3.1 Einleitung

Sowohl innerhalb des Steuerungsverfahrens (interne Bewertung) als auch zur Validierung (externe Bewertung) wird ein Verkehrsflußmodell benötigt. Die Wirkung einer kollektiven Netzbeeinflussung besteht im wesentlichen aus einer Menge von umgeleiteten Fahrzeugen. Die individuelle Zuordnung der umgeleiteten Fahrzeuge unter Berücksichtigung aller Zufälligkeiten kann bei kollektiver Meßtechnik nicht erfaßt werden und ist damit nicht wesentlich. Zur Modellierung einer kollektiven Netzbeeinflussung müssen Einzelfahrzeuge daher nicht betrachtet werden. Dies ermöglicht die Nutzung rein makroskopischer Modelle. Dynamische makroskopische Modelle geben in Form des modellierten Geschwindigkeitsverhaltens die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeuggruppen wieder und beschränken sich somit nicht auf die übliche paarweise Wechselwirkung zwischen Einzelfahrzeugen in mikroskopischen Modellen. Die makroskopische Modellierung der Fahrzeughaltung erlaubt zudem eine effiziente Implementierung mit vergleichsweise geringen Anforderungen an die benötigte Rechenleistung, die unabhängig vom Verkehrsaufkommen ist. Der makroskopische Modellansatz wird daher für die Modellierung der Netzsteuerung als optimal erachtet. KÜHNE (1993) liefert einen im wesentlichen immer noch gültigen Überblick über den Stand der Verkehrsflußsimulation. In Anlehnung daran wird das in der Praxis bisher am meisten verwendete Verkehrsflußmodell nach CREMER (1979) als Grundlage verwendet.

Innerhalb des Steuerungsverfahrens wird eine Beobachtung des Verkehrszustandes benötigt; dafür wird der makroskopische Modellansatz nach CREMER (1979) mit einem Kalmanfilter kombiniert. Dieser Ansatz wird um eine Schätzung der Abbiegeraten zur Beobachtung der netzhaften Wirkungen erweitert. In der externen Bewertung wird die phänomenologische Nachbildung eines realen Straßennetzes und der Wirkungen der Netzsteuerung benötigt; es muß möglich sein, die Wirkungen unterschiedlicher Steuerungsverfahren zu quantifizieren und vergleichbar zu machen. Auch hierfür wird der

makroskopische Modellansatz nach CREMER (1979) verwendet; der Modellansatz wird erweitert, um spezielle Verkehrssituationen und verkehrstechnische Randbedingungen explizit berücksichtigen zu können. Die makroskopischen Verkehrsflußmodelle benötigen einen statischen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Dichte, der als sogenanntes Fundamentaldiagramm einen eigenen Modellbaustein darstellt. Neben den Verkehrsflußmodellen werden auch Ansätze benötigt, mit deren Hilfe die netzhafte Wirkungen berücksichtigt werden können.

Nachfolgend werden die verwendeten Modelle und Modellerweiterungen beschrieben. Basierend auf der Einführung der verwendeten Fundamentaldiagramme werden die dynamischen Verkehrsflußmodelle nach CREMER (1979) und PAYNE (1971) für linienförmige Schnellstraßenabschnitte detailliert beschrieben. Danach werden die Verkehrsflußmodelle auf Straßennetze erweitert. Ein weiterer Abschnitt beschäftigt sich mit der Kalmanfilterung des Verkehrsflußmodells. Daran schließt sich ein Abschnitt über die Initialisierung der dynamischen Verkehrsflußmodelle an. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird die prädiktive Schätzung der Abbiegeraten als Wirkung der Steuerungsvariablen unter Nutzung von Fuzzy-Neuronalen Netzen beschrieben.

3.2 Fundamentaldiagramme

3.2.1 Motivation

Die Verkehrsmodelle nach CREMER (1979) und PAYNE (1971) benötigen eine Geschwindigkeits-Dichtebeziehung. Meist wird für diese Beziehung eine statische Modellierung des Zusammenhangs der makroskopischen Verkehrsgrößen Geschwindigkeit und Dichte verwendet. Die Geschwindigkeits-Dichtebeziehung stellt für das dynamische makroskopische Verkehrsflußmodell nur einen Parameter dar, so daß der sich aus dem dynamischen Modell ergebende stationäre Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dichte von dem als Parameter verwendeten Zusammenhang in der Regel stark abweicht.

Die stationäre Geschwindigkeit wird als Funktion der Dichte und einer eventuell vorhandenen Geschwindigkeitsbegrenzung angegeben. Der Begriff *Fundamentaldiagramm* wird in dieser Arbeit auch als Synonym für die Geschwindigkeits-Dichtebeziehung verwendet. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die möglichen Fundamentaldiagramme gegeben und ausgewählte Fundamentaldiagramme detailliert beschrieben.

3.2.2 Überblick

Bild 3.1 zeigt ein real gemessenes Fundamentaldiagramm $V(k)$ auf der A9 im Norden von München. Die Geschwindigkeit ist über jeweils die letzte Minute gemittelt. Die Dichte wurde für $v > 0$ aus dem Verkehrsfluß über die Formel

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

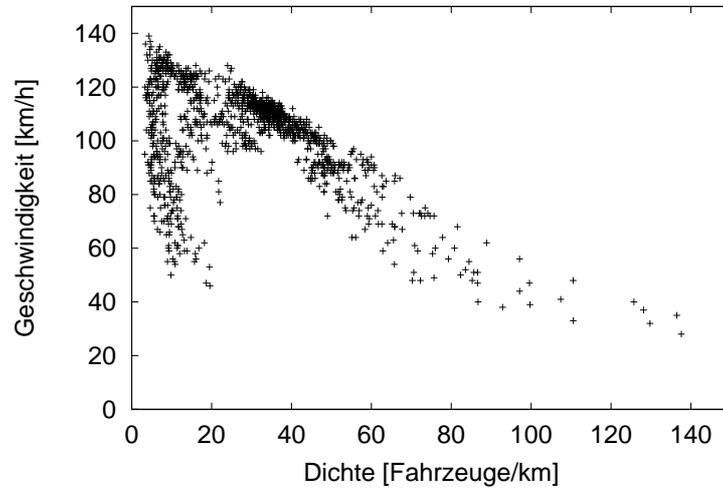


Abbildung 3.1: Am Querschnitt während 24 h gemessenes Fundamentaldiagramm

berechnet. Der Verkehrsfluß ist über die jeweils letzte Minute aggregiert und in Fahrzeugen pro Stunde (Fz/h) angegeben. Der Verkehrsfluß beziehungsweise die Dichte wird auf den Querschnitt aggregiert. Es wurden alle Fahrzeugtypen erfaßt. Die geringen Geschwindigkeiten bei geringer Dichte werden von Lastkraftwagen in der Nacht erzeugt; die geringsten Geschwindigkeiten in diesem Bereich wurden gegen 2:20 Uhr gemessen. Dieser Bereich des Fundamentaldiagramms ist für die Netzsteuerung irrelevant und wird daher nicht gesondert betrachtet. Im Bereich mittlerer Dichten ($k \approx 60 Fzg/km$) erscheinen zwei Linien, um die die Datenpunkte streuen. Diese zwei Linien erklären sich aus dem PKW-Verkehr und einem langsameren Verkehrsanteil bestehend aus Bussen, LKW, PKW mit Anhänger und langsamen PKW. Diese Verkehrsarten können jeweils getrennt behandelt werden. Im Sinne einer Vereinfachung ohne Verlust der Allgemeinheit durch getrennte Anwendung der Modelle auf die beiden Verkehrsanteile (CREMER, 1976) wird in dieser Arbeit durch Mittelung beider nur ein Verkehrsanteil betrachtet.

Das Fundamentaldiagramm kann mit stetigen und unstetigen Funktionsverläufen approximiert werden. SCHNABEL und LOHSE (1997) geben einen Überblick über die stetigen Funktionen (siehe Tabelle 3.1). Folgende Variablen und Parameter werden verwendet:

Nr.	Funktion	Bedingungen
1	$V(k) = V_f(1 - k/k_{max})$	
2	$V(k) = V_c \ln(k_{max}/k)$	
3	$V(k) = V_f \exp(-\frac{1}{a}(\frac{k}{k_{max}})^a)$	
4	$V(k) = \frac{a(k_{max}-k)}{b \cdot k_{max} + c \cdot k}$	
5	$V(k) = \frac{a \cdot b \cdot \ln(k_{max}/k)}{c \cdot \ln(k_{max}/k) + b}$	
6	$V(k) = V_f \frac{a^{1-k/k_{max}} - 1}{a - 1}$	$a \neq 1$
7	$V(k) = V_f \frac{\sqrt{k_{max}-k}}{a \cdot V_f \cdot k^2 + \sqrt{k_{max}-k}}$	$a > 0$
8	$V(k) = V_f(1 - (\frac{k}{k_{max}})^a)^b$	$0 < a \leq 2, b \geq 1$
9	$V(k) = V_f + a \cdot k(\exp(-b \cdot k) - 1)$	$a > 0, b > 0$
10	$V(k) = V_f(1 - \exp(-a(1/k - 1/k_{max})))$	

Tabelle 3.1: Übersicht der stetigen Fundamentaldiagramme nach SCHNABEL und LOHSE (1997)

V	statische Geschwindigkeit
V_f	Geschwindigkeit bei Dichte $k = 0$
V_c	Geschwindigkeit bei maximalem Verkehrsfluß
k	Dichte
k_{max}	maximale Dichte
c	Kapazität
k_c	Dichte bei maximalem Verkehrsfluß
u	relative Geschwindigkeitsbegrenzung
v_{max}	absolute Geschwindigkeitsbegrenzung

Erste Untersuchungen zur mathematischen Nachbildung der Fundamentaldiagramme gibt es bereits seit den dreißiger Jahren. GREENSHIELDS (1935) zeigte einen linearen Zusammenhang zwischen der statischen Geschwindigkeit und der Dichte. Dieser Ansatz wird neben anderen im folgenden Abschnitt kurz beschrieben.

Alle der im folgenden beschriebenen Fundamentaldiagramme können neben der Nummer 2 aus der Tabelle 3.1 aus einer mikroskopischen Fahrzeugfolgeformel abgeleitet werden. Die in MAY und KELLER (1967) sowie DRAKE ET AL. (1967) beschriebenen Herleitungen stellen somit eine erste Koppelung von makroskopischen und mikroskopischen Verkehrsflußmodellen dar.

3.2.3 Diskussion ausgewählter Fundamentaldiagramme

Methodik

Die Diskussion erfolgt vor dem Hintergrund der praktischen Handhabbarkeit und der Eigenschaften der mathematischen Beschreibungen in makroskopischen Verkehrsflußmodellen.

Für die praktische Arbeit ist es wünschenswert, die verwendeten Fundamentaldiagramme neben einer genauen Analyse von Verkehrsdaten auch durch deren reine Betrachtung und der Intuition parametrisieren zu können. Hierzu eignen sich die verkehrstechnischen Größen V_f (freie Geschwindigkeit) und c (maximaler Verkehrsfluß), da diese mittels Suche nach der maximalen Geschwindigkeit und dem maximalen Verkehrsfluß besonders leicht aus Meßdaten ermittelt werden können. Der (stationäre) Verkehrsfluß berechnet sich zu:

$$q(k) = V(k) \cdot k \quad (3.2)$$

Die erste Ableitung des Verkehrsflusses muß bei maximaler Verkehrsstärke 0 sein, wenn ein stetiger Funktionsverlauf vorliegt:

$$q'(k) = V'(k) \cdot k + V(k) = 0 \quad (3.3)$$

Das Fundamentaldiagramm ist Teil des dynamischen makroskopischen Verkehrsflußmodells; seine mathematischen Eigenschaften (zum Beispiel das Verhalten an einem Arbeitspunkt) haben daher Auswirkungen auf das mathematische Verhalten des Verkehrsflußmodells (SMULDERS, 1987). Zu jedem Fundamentaldiagramm werden daher Aussagen über die Krümmung, also die zweite Ableitung nach der Dichte, festgehalten.

Fundamentaldiagramm nach Greenshields

GREENSHIELDS (1935) stellte mittels Verkehrsbeobachtungen einen linearen Zusammenhang nach der Formel

$$V(k) = V_f(1 - k/k_{max}) \quad , \text{ mit } 0 \leq k < k_{max} \quad (3.4)$$

auf. Dies entspricht der Nummer 8 in Tabelle 3.1 mit den Parametern $a = 1$ und $b = 1$. Nach Berechnung und Nullsetzen der ersten Ableitung des maximalen Verkehrsflusses erhält man die Dichte bei maximalem Verkehrsfluß zu

$$k(c) = \frac{k_{max}}{2} \quad (3.5)$$

Nach Einsetzen in die Formel 3.2 ergibt sich der Parameter k_{max} zu

$$k_{max} = \frac{4 \cdot c}{V_f} \quad (3.6)$$

Es ergeben sich bei richtig gewählter freier Geschwindigkeit und maximaler Verkehrsstärke zu geringe maximale Dichten. Die Krümmung der Funktion ist:

$$V(k)'' = 0 \quad , \text{ mit } 0 \leq k < k_{max} \quad (3.7)$$

Aufgrund der konstanten Ableitungen besitzt das Fundamentaldiagramm keinen wesentlichen Anteil an der Dynamik, wenn es in einem Verkehrsflußmodell verwendet wird.

Fundamentaldiagramm nach Drake und Cremer

MAY und KELLER (1967) sowie DRAKE ET AL. (1967) definieren ein auf einem mikroskopischen Fahrzeugfolgemodell (GAZIS ET AL., 1961) basierendes Fundamentaldiagramm gemäß der Nummer 8 in der Tabelle 3.1:

$$V(k) = V_f \left(1 - \left(\frac{k}{k_{max}} \right)^a \right)^b \quad , \text{ mit } 0 < a \leq 2, b \geq 1, 0 \leq k < k_{max} \quad (3.8)$$

Die Parameter a und b werden in CREMER (1979) mit $a = 1.4$ und $b = 4$ angegeben. Bild 3.2 zeigt das sich ergebende Fundamentaldiagramm mit $V_f = 130 \text{ km/h}$

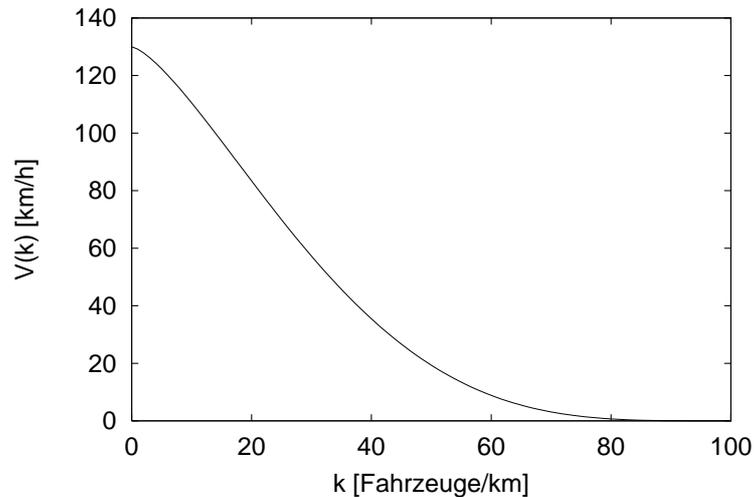


Abbildung 3.2: Fundamentaldiagramm nach DRAKE ET AL. (1967)

(aus den Realdaten in Bild 3.1) und $k_{max} = 100 \text{ Fzg}/(\text{km Fahrstreifen})$. Die Funktion 3.8 kann differenziert werden. Die zu 0 gesetzten Ableitungen der Verkehrsstärke nach Gleichung 3.3 können aber nicht nach der Dichte k aufgelöst werden; das Fundamentaldiagramm entzieht sich somit einer analytischen Behandlung. Es können keine Gleichungen für die Parameter a und b in Abhängigkeit von der maximalen Verkehrsstärke c aufgestellt werden. Die maximale Dichte kann auf die tatsächlich mögliche

mittlere maximale Dichte im Stau gesetzt werden. Die maximale Verkehrsstärke in Bild 3.2 ergibt sich passend für das gemessene Fundamentaldiagramm in Bild 3.1 zu $c \approx 1800 \text{ Fzg}/(h \text{ Fahrstreifen})$. Andere real gemessene Fundamentaldiagramme besitzen allerdings maximale Verkehrsstärken bis zu $2200 \text{ Fzg}/(h \text{ Fahrstreifen})$ bei der selben freien Geschwindigkeit. Die Parameter a und b wurden von CREMER (1979) auf die damaligen Verkehrsverhältnisse mit einer geringeren freien Geschwindigkeit von $V_f = 114 \text{ km}/h$ angepaßt. Neue Parameter a und b können nicht aus einfachen Gleichungen gewonnen werden, sondern nur aus einer numerischen Parameteridentifikation.

In CREMER (1979) wird in Anlehnung an ZACKOR (1972) eine Erweiterung des Fundamentaldiagramms zur Berücksichtigung von Geschwindigkeitsbegrenzungen beschrieben. Hierzu wird eine relative Geschwindigkeitsbegrenzung

$$u = \frac{v_{max}}{V_f} \quad (3.9)$$

eingeführt. Die Formel 3.8 wird erweitert zu

$$V(k, u) = V_f \cdot u \left(1 - \left(\frac{k}{k_{max}} \right)^{a(3-2u)} \right)^b \quad (3.10)$$

In Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit ergeben sich unterschiedliche maximale Verkehrsstärken. Die Abhängigkeit des Fundamentaldiagramms von der Höchstgeschwindigkeit wird zur Bewertung von Linienbeeinflussungssystemen benötigt. Obwohl die Berücksichtigung der Höchstgeschwindigkeit zur Beobachtung des Verkehrszustands nützlich sein könnte, wird diese im weiteren Verlauf der Arbeit nicht betrachtet.

Das Fundamentaldiagramm nach DRAKE ET AL. (1967) weist sowohl positive sowie auch negative Krümmungen auf. Der Wendepunkt ist für allgemeine Parameter a , b und gegebenenfalls u nicht analytisch berechenbar.

Verallgemeinertes Fundamentaldiagramm nach Underwood und Drake

UNDERWOOD (1961) definierte ein Fundamentaldiagramm zu:

$$V(k) = V_f \exp(-k/k_c) \quad (3.11)$$

DRAKE ET AL. (1967) leiten aus einem mikroskopischen Verkehrsflußmodell das Fundamentaldiagramm

$$V(k) = V_f \exp(-0.5(k/k_c)^2) \quad (3.12)$$

ab und zeigen, daß auch die Gleichung 3.11 ein Spezialfall in der theoretischen Herleitung darstellt. Diese beiden Fundamentaldiagramme wurden verallgemeinert (siehe z.B. HEIDEMANN und HOTOP (1979)) zu:

$$V(k) = V_f \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{k}{k_c}\right)^a\right) \quad (3.13)$$

Aus der ersten Ableitung der Verkehrsstärke nach Gleichung 3.3 erhält man:

$$k(c) = k_c \quad (3.14)$$

Nach Einsetzen in 3.2 erhält man:

$$a = \frac{1}{\ln \frac{k_c V_f}{c}} \quad (3.15)$$

Den Parameter k_c bestimmt man durch weiteres Einsetzen in 3.2 für ein Wertepaar $(k_w; V_w(k_w))$ aus den Realdaten zu:

$$k_c = k_w \cdot \left(a \ln \left(\frac{V_f}{V_w} \right) \right)^{-\frac{1}{a}} \quad (3.16)$$

Bei der Eichung des Fundamentaldiagramms kann damit die maximale Verkehrsstärke analytisch berücksichtigt werden. Die Krümmung der Geschwindigkeits–Dichtebeziehung ist für Dichten $k < k_c$ negativ und für Dichten $k > k_c$ positiv.

Das Fundamentaldiagramm benötigt in seiner mathematischen Beschreibung den Parameter k_{max} nicht; dieser wird unabhängig davon eingeführt, da er von den dynamischen Verkehrsflußsimulationen benötigt wird.

3.3 Das makroskopische Verkehrsflußmodell

3.3.1 Einleitung

Dieser Abschnitt beschreibt die dynamische Verkehrsflußmodellierung auf linienförmigen Schnellstraßenabschnitten. Basierend auf der Theorie der kinematischen Wellen nach LIGHTHILL und WHITHAM (1955b) und RICHARDS (1956) entwickelte GREENBERG (1959) das erste makroskopische Verkehrsflußmodell, indem er neben der Massenerhaltungsgleichung (siehe Gleichung 3.17) eine Geschwindigkeitsgleichung einführte. PAYNE (1971) leitete aus der zum Beispiel von GAZIS ET AL. (1961) veröffentlichten Fahrzeugfolgetheorie eine neue Geschwindigkeitsgleichung her und implementierte diese in zeitdiskreter Form. In HAUER und HURDLE (1979) wird von Schwächen der Implementierung des Modells bei großem örtlichen Dichtegradienten berichtet. DAGANZO (1994) zeigt, daß die Gleichungen makroskopischer Modelle zweiter Ordnung prinzipiell zu Fehlern führen müssen. Dies wird von KATES (1995) relativiert.

In der Vergangenheit wurden bereits zahlreiche Ansätze zur Erweiterung des PAYNE–Modells veröffentlicht. CREMER (1979) erweiterte die Antizipation um einen Korrekturfaktor. SMULDERS (1987) schlägt die Verwendung eines abschnittsweise differenzierbaren Fundamentaldiagramms mit zwei Bereichen sowie den Ersatz der Antizipation durch einen anderen Term vor. KÜHNE (1984, 1987) erweitert die CREMER/PAYNE Geschwindigkeitsgleichung um einen Viskositätsterm unter Nutzung der zweiten partiellen

Ableitung der Geschwindigkeit nach dem Ort. KERNER und KONHÄUSER (1993) sowie KERNER ET AL. (1997) ersetzen den konstanten Viskositätsparameter bei KÜHNE (1984) durch einen dichteabhängigen und diskutieren das Modell ausführlich bezüglich seiner physikalischen Eigenschaften. HELBING (1995) erweiterte das Modell um die Berücksichtigung der Fahrzeuglänge. KATES (1994) leitet eine Geschwindigkeitsgleichung ab, die dem Ansatz von KÜHNE (1984) ähnlich ist; im Viskositätsterm wird allerdings die Dichte anstelle der Geschwindigkeit verwendet. HILLIGES (1994) schlägt ein diskretes Modell unter Vernachlässigung des Antizipationsterms vor und ersetzt diesen durch einen erweiterten Konvektionsterm. CREMER und PUTENSEN (1992) stellen ein makroskopisches Modell zur Simulation von innerstädtischen Netzen vor; es verwendet eine Geschwindigkeitsgleichung, die die Antizipation mit der Relaxation verbindet und so eine sehr stabile, einfache, numerische und diskrete Umsetzung erlaubt.

In dieser Arbeit wird das in den Implementierungen SIMONE (MEISSNER und BÖKER, 1997) und METANET (PAPAGEORGIOU und MESSMER, 1990) weit verbreitete Modell nach PAYNE mit den Erweiterungen von CREMER aufgegriffen. Nach einer Beschreibung und Diskussion des orts- und zeitdiskreten CREMER/PAYNE Modells wird auf diesem basierend unter Verwendung von Ideen aus KATES (1994) und CREMER und PUTENSEN (1992) ein modulares Verkehrsflußmodell entwickelt und zur Zustandsbeobachtung und externen Bewertung des Steuerungsverfahrens eingesetzt.

3.3.2 Das Cremer/Payne-Modell

Die Dichtegleichung

Das CREMER/PAYNE Modell basiert wie das Modell der kinematischen Wellen (LIGHTHILL und WHITHAM, 1955b; RICHARDS, 1956) auf einem Massen- beziehungsweise Fahrzeugerhaltungsansatz; dieser Ansatz wurde aus der Hydrodynamik auf die Verkehrstechnik übertragen (LIGHTHILL und WHITHAM, 1955a). Die Formel lautet:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad , \text{ mit} \quad (3.17)$$

q Verkehrsfluß
 k Dichte

Diese partielle Differentialgleichung wird in eine gewöhnliche Differentialgleichung nach der Zeit umgeformt. Hierzu wird der Ort in Segmente eingeteilt. Bild 3.3 zeigt die Segmenteinteilung für einen linienförmigen Autobahnabschnitt. Nach der Diskretisierung der sich ergebenden zeitlich kontinuierlichen Differentialgleichung berechnet sich die Dichteänderung in einem Segment zu:

$$k_i(n+1) = k_i(n) + \frac{T}{L_i}(q_{i-1}(n) - q_i(n)) \quad , \text{ mit} \quad (3.18)$$

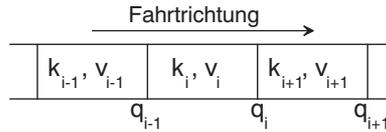


Abbildung 3.3: Segmenteinteilung eines linienförmigen Autobahnabschnitts

- i Segmentindex
- n Zeitschritt
- T Zeitschrittweite
- L Segmentlänge

Die Dichte k_i beschreibt die Fahrzeuganzahl im Segment bezogen auf die Segmentlänge. Der Verkehrsfluß q_i ist der Fluß, der das Segment i verläßt. Die Gleichung 3.18 ist eine Differenzgleichung; infolgedessen sind die Dichten k_i Zustandsvariablen des modellierten Systems.

Die Flußgleichung

Der Fluß aus einem Segment wird modelliert zu:

$$q_i(n) = \alpha \cdot v_i(n) \cdot k_i(n) + (1 - \alpha) \cdot v_{i+1}(n) \cdot k_{i+1}(n) \quad , \text{ mit} \quad (3.19)$$

- α Gewichtungsparmeter
- v Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit v_i beschreibt die mittlere Geschwindigkeit im Segment i . Der Verkehrsfluß q_i ist nicht nur von den Verkehrsbedingungen im Segment i , sondern auch von den Verkehrsbedingungen im Segment $i + 1$ abhängig. Die Abhängigkeit ergibt sich aus dem Verlauf der Geschwindigkeit im Segment i . An der Grenze zum Segment $i + 1$ wird sich eine gemittelte Geschwindigkeit der beiden Segmente einstellen; dies modelliert der Faktor α . Die Gleichung 3.19 ist keine Differenzgleichung; damit sind die Flüsse q_i keine Zustandsvariablen, sondern können durch die Größen k_i und v_i sowie k_{i+1} und v_{i+1} ausgedrückt werden.

Die Geschwindigkeitsgleichung

Unter der Annahme einer vom Ort und der Zeit abhängigen Geschwindigkeit $v(x, t)$ berechnet sich die vollständige Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit zu

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.20)$$

Die totale Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit dv/dt ist die Änderung der Geschwindigkeit aus der Sicht eines Fahrzeugs. Die partielle Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit $\partial v/\partial t$ bezieht sich auf einen bestimmten Ort x . Die partielle

Ableitung des Ortes nach der Zeit $\partial x/\partial t$ ergibt die Geschwindigkeit v . Die Gleichung kann nach der partiellen Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit aufgelöst werden. Die vollständige Ableitung der Geschwindigkeit beschreibt die fahrzeugbezogenen Phänomene. PAYNE (1971) gibt eine Herleitung unter Nutzung eines mikroskopischen Fahrzeugmodells an; es können aber auch direkt heuristische Annahmen getroffen werden. Die Geschwindigkeitsgleichung lautet:

$$v_i(n+1) = v_i(n) + \frac{T}{L_i} v_i(n) (v_{i-1}(n) - v_i(n)) + \quad (3.21)$$

$$+ \frac{T}{\tau} (V(n) - v_i(n)) + \quad (3.22)$$

$$+ \frac{\nu \cdot T}{\tau \cdot L_i} \frac{k_i(n) - k_{i+1}(n)}{k_i(n) + \kappa} \quad (3.23)$$

- T Zeitschrittweite
- V stationäre Geschwindigkeit
- τ Zeitkonstante
- ν Parameter
- κ Korrekturfaktor
- L Segmentlänge

Diese wurde von PAYNE (1971) aufgestellt und von CREMER (1979) um den Parameter κ im Term 3.23 erweitert. Der Term 3.21 wird Konvektion genannt und folgt aus der vollständigen Ableitung der Geschwindigkeit. Er modelliert bildlich die Änderung der Geschwindigkeit eines Segments i aufgrund der Geschwindigkeit des Segments $i - 1$, die von der einfahrenden Fahrzeugmenge in das Segment anteilmäßig eingebracht wird.

Der Term 3.22 wird Relaxation genannt und modelliert die Angleichung des Verkehrs an die stationäre Geschwindigkeit. Diese stationäre Geschwindigkeit kann als mittlere Wunschgeschwindigkeit interpretiert werden. Diese stationäre Geschwindigkeit wird aus dem Fundamentaldiagramm gewonnen. Die Zeitkonstante τ modelliert die Geschwindigkeit, in der der Anäherungsprozeß abläuft.

Der Term 3.23 wird Antizipation genannt und modelliert die Reaktion auf den Verkehrszustand stromabwärts im nächsten Segment. Der Parameter κ verhindert, daß der Term bei kleinen Dichten zu starken Einfluß erhält (CREMER, 1979).

3.3.3 Parametrisierung

Im folgenden werden die Parameter angegeben, die in den Modellimplementierungen SIMONE (CREMER, 1979; MEISSNER und BÖKER, 1997) und METANET (MESSMER, 1994) verwendet werden. Die Parameter werden mit den Indizes *sim* beziehungsweise *met* versehen. In SIMONE (CREMER, 1979; MEISSNER und BÖKER, 1997) wird der

Faktor α zu

$$\alpha_{sim} = 0.8 \quad (3.24)$$

gesetzt. In der Implementierung METANET (MESSMER, 1994) wird der Faktor α zu

$$\alpha_{met} = 1.0 \quad (3.25)$$

gesetzt. Die Abhängigkeit des Flusses vom nächsten Segment wird in METANET somit nicht berücksichtigt. Die Simulationszeitschrittweite und die Segmentlängen müssen einander so angepaßt werden, daß folgende Ungleichung erfüllt wird:

$$T \cdot v_{max} < L_{min} \quad (3.26)$$

v_{max} ist die maximal auftretende mittlere Geschwindigkeit eines Segments und L_{min} ist die minimal auftretende Länge eines Segments. In SIMONE wird für die Segmentlänge

$$L_{sim} = 500 \text{ m} \quad (3.27)$$

und für die Zeitschrittweite

$$T_{sim} = 10 \text{ sec} \quad (3.28)$$

empfohlen. Die Segmentlänge ist aufgrund der numerischen Integration ein Bestandteil des dritten Terms der Geschwindigkeitsgleichung 3.23. Die Parameter τ und ν werden in den beiden Implementierungen auf folgende Werte gesetzt:

$$\nu_{sim} = 28.8 \text{ km}^2/h \quad (3.29)$$

$$\nu_{met} = 36 \text{ km}^2/h \quad (3.30)$$

$$\tau_{sim} = 34 \text{ sec} \quad (3.31)$$

$$\tau_{met} = 16 \text{ sec} \quad (3.32)$$

$$(3.33)$$

Die Parameter von METANET wurden der in VARIA (SCHMID und SACHSE, 1995) eingesetzten Version entnommen. Die maximal auftretenden Dichten $kmax$ werden zu

$$kmax_{sim} = 100 \text{ Fzg}/(\text{km} \cdot \text{Fahrstreifen}) \quad (3.34)$$

$$kmax_{met} = 180 \text{ Fzg}/(\text{km} \cdot \text{Fahrstreifen}) \quad (3.35)$$

$$(3.36)$$

gesetzt (siehe auch Diskussion in 3.3.4). Der Parameter κ wird zu

$$\kappa_{sim} = 10 \text{ Fz}/(\text{km} \cdot \text{Fahrstreifen}) \quad (3.37)$$

$$\kappa_{met} = 13 \text{ Fz}/(\text{km} \cdot \text{Fahrstreifen}) \quad (3.38)$$

gesetzt. Beide Implementierungen verwenden unterschiedliche Fundamentaldiagramme; in SIMONE wird das Fundamentaldiagramm nach Gleichung 3.8, in METANET das Fundamentaldiagramm nach Gleichung 3.13 verwendet.

3.3.4 Diskussion

Dichtegleichung

Die Dichtegleichung in der Form 3.18 gibt die Fahrzeugerhaltung als Funktion von den zufließenden und abfließenden Fahrzeugmengen korrekt wieder. Sie ist damit von den Verkehrsflüssen q_i abhängig, die als eine Hilfsgröße oder Zwischenergebnis aus den Zustandsvariablen k_i und v_i sowie k_{i+1} und v_{i+1} berechnet werden. Die Dichtegleichung stellt nicht sicher, daß eine maximale Dichte nicht überschritten wird. Dies muß anderweitig erfolgen. SIMONE und METANET verwenden hierzu unterschiedliche Ansätze.

In SIMONE wird nach der Berechnung der Dichtegleichung geprüft, ob die maximale Dichte überschritten wurde. Falls dies der Fall sein sollte, wird die überschüssige Fahrzeugmenge in das Vorgängersegment zurückgerechnet. Diese Zurückrechnung ist nicht trivial, wenn ein Segment an einem Netzknoten mehrere Vorgängersegmente besitzt. Für diesen Fall müssen die genauen Fahrzeugmengen der Vorgängersegmente bekannt sein, um die überschüssigen Fahrzeugmengen anteilmäßig korrekt zurückrechnen zu können. Zusätzlich müssen die aus der Verkehrsflußgleichung stammenden Verkehrsflüsse korrigiert werden, um zu den sich ergebenden Dichten kompatibel zu werden. Bei einer korrekten Implementierung des relativ komplexen Korrekturverfahrens können in der Simulation keine Fahrzeuge verloren gehen.

In METANET wird eine minimale mittlere Geschwindigkeit definiert. Die minimale Geschwindigkeit wird in der oben genannten METANET Version zu $15km/h$ gesetzt. Diese minimale Geschwindigkeit stellt sicher, daß aus jedem Segment ein Fahrzeugstrom vorhanden ist, der bei gleicher Fahrstreifenanzahl so groß ist, daß im eingeschwungenen System nicht mehr Fahrzeuge zufließen können als abfließen. In METANET wird ein hoher Wert für die maximale Dichte verwendet, so daß kurzzeitige Übergangsvorgänge abgefangen werden können. Probleme ergeben sich bei Fahrstreifenreduktionen. Hat man ein dreistreifiges überstautes Segment $i - 1$ mit einer Dichte/Fahrstreifen von z.B. $100Fzg/km$ und einer Minimalgeschwindigkeit von $15km/h$ so kommt man auf einen Fluß von $4500Fzg/h$. Hat das Segment i stromabwärts nur zwei Fahrstreifen und ist ebenfalls mit den selben Werten überstaut, so resultiert daraus ein Fluß von $3000Fzg/h$; dadurch kann die maximale Dichte überschritten werden. In diesem Fall wird der Fluß zu $q_{i-1} = 0$ gesetzt. Fahrstreifenreduktionen können mit diesem Ansatz allein noch nicht befriedigend modelliert werden, da sich ein schaltendes Modellverhalten ergibt. In METANET gibt es daher einen zusätzlichen Term in der Geschwindigkeitsgleichung, der die Fahrstreifenreduktion berücksichtigt:

$$v_i^*(n+1) = v_i(n+1) - \frac{\Phi T \Delta l_i \cdot k_i(n)}{L_i l_i k_{ci} \cdot v_i(n)^2} \quad (3.39)$$

k_{ci} ist die Dichte bei maximalem Fluß aus dem Fundamentaldiagramm des Segmentes i . Φ ist ein Parameter, l_i die Zahl der Fahrstreifen und Δl_i die Zahl der am Segment i endenden Fahrstreifen. Diese Gleichung ist offensichtlich in der Lage, das Problem

bei Fahrstreifenreduktionen zu entschärfen; extreme Bedingungen, wie zum Beispiel die Fahrstreifenreduktion auf 0 Spuren, können aber auch mit dieser Gleichung nicht berücksichtigt werden. Die in SACHSE (1998) belegten Defizite von METANET in der Abbildung von gebundenem Verkehr können zum Teil mit der minimal „zulässigen“ mittleren Geschwindigkeit auf Segmenten erklärt werden.

Das Problem der maximalen Dichten wird in DAGANZO (1994) „Requiem for Second Order Fluid Approximations of Traffic Flow“ mittels Analyse der zeitkontinuierlichen Differentialgleichungen indirekt aufgegriffen, indem festgestellt wird, daß es an der Grenze vom freien zum gebundenen Verkehr zu negativen Geschwindigkeiten kommen kann. Diese negativen Geschwindigkeiten werden allerdings in der zeitdiskreten Implementierung ausgeschlossen.

Aus der Diskussion der Dichtegleichung ergibt sich, daß es sinnvoll ist, den Modellansatz so zu erweitern, daß die maximalen Dichten in den Modellimplementierungen nicht mehr durch aufwendige Korrekturverfahren oder durch „ad hoc“-Lösungen sichergestellt werden müssen.

Verkehrsflußgleichung

Die Verkehrsflußgleichung 3.19 liefert einen statischen Zusammenhang zwischen der mittleren Geschwindigkeit und der Dichte zweier benachbarter Segmente. Dieser Zusammenhang gilt im Kontext der verwendeten Segmentlänge und nur im Mittel der Verkehrszustände. Betrachtet man einen Rückstau mit maximaler Dichte und einer mittleren Geschwindigkeit von 0 km/h auf Segment i und einer mittleren Dichte und einer geringen, aber nicht verschwindenden Geschwindigkeit auf Segment $i-1$, so liefert die Verkehrsflußgleichung einen Verkehrsstrom in das Segment i , obwohl dieses keine Fahrzeuge mehr aufnehmen kann.

Offensichtlich verursacht die Verkehrsflußgleichung das Problem der Überschreitung der maximalen Dichte in der Dichtegleichung. Es liegt daher nahe, nach Erweiterungen der Flußgleichung zu suchen, um dieses Problem zu lösen.

Geschwindigkeitsgleichung

Der Term 3.21 der Geschwindigkeitsgleichung läßt sich zwar mathematisch herleiten, gilt aber in seiner diskreten Formulierung nur für infinitesimal kleine Segmente, bei denen die örtlichen Dichtedifferenzen vernachlässigt werden können. CREMER (1979) zeigt die Herleitung des Termes aus einer Fahrzeugbilanz. Der tatsächliche Einfluß der Geschwindigkeit des Segmentes $i-1$ auf das Segment i ist abhängig vom Verkehrsfluß. Entsprechend der Diskussion der Dichtegleichung ist daher der Term 3.21 der Geschwindigkeitsgleichung in besonderen Situationen nicht gültig.

Der Term 3.22 der Geschwindigkeitsgleichung modelliert die Annäherung eines Fahrzeugkollektivs an den eingeschwungenen Zustand des aktuellen Orts. Dieser Term erlaubt durch geeignete Wahl der Parameter des örtlichen Fundamentaldiagramms eine praktikable Anpassung des Verkehrsflußmodells an reale Gegebenheiten.

Der Term 3.23 modelliert die Wirkung des Verkehrs entgegen der Fahrtrichtung aufgrund des Vorausschauens der Fahrer. Unter Vernachlässigung der nur bei SIMONE vorhandenen Dichtekorrektur ermöglicht dieser Term allein die Modellierung von Rückstaus. Der Term kann bei großen Dichteunterschieden zweier Segmente auch zu negativen Geschwindigkeiten führen; dies wurde bereits von DAGANZO (1994) anhand der kontinuierlichen Differentialgleichungen kritisiert. Sowohl in SIMONE als auch in METANET werden negative Geschwindigkeiten durch eine Sicherheitsabfrage abgefangen.

Eine diskrete Implementierung des Konvektionsterms 3.21 mit Berücksichtigung der Fahrzeugbilanz könnte nach CREMER (1979) erfolgen. Zudem erscheint es sinnvoll, die Geschwindigkeitsgleichung an sich zu erweitern, damit auf den Antizipationsterm 3.23 verzichtet werden kann.

3.3.5 Modellerweiterungen

Ansatz

Aufgrund der obigen Überlegungen werden Modellerweiterungen benötigt, da im Rahmen dieser Arbeit ein dringender Bedarf nach einem robusten Simulationswerkzeug zur Modellierung der netzhaften Wirkungen einer Netzsteuerung besteht. Die Erweiterungen des Verkehrsflußmodells erfolgen daher nicht nur mit dem Wunsch, ein möglichst realitätsnahes Modell, sondern auch ein möglichst problemlos anwendbares Modell zu entwickeln.

Die Dichtegleichung beschreibt die Fahrzeugerhaltung. Die Fahrzeugerhaltung ist sichergestellt, solange die verwendeten Flüsse während des Berechnungsschrittes konstant bleiben. Die Modellerweiterungen werden daher nur an der Geschwindigkeitsgleichung und der Flußgleichung vorgenommen. Das Modell wird so ausgelegt, daß keine Korrekturen der Dichte benötigt werden.

Geschwindigkeitsgleichung

Der Konvektionsterm 3.21 kann zur Berücksichtigung von nicht infinitesimal kleinen Segmentlängen durch die in CREMER (1979) beschriebene Formel

$$konvektion = \frac{(v_{i-1}(n) \cdot q_{i-1}(n) \cdot T + (L_i \cdot k_i(n) - q_i(n) \cdot T) \cdot v_i(n))}{T \cdot (q_{i-1}(n) - q_i(n)) + L_i \cdot k_i(n)} \quad (3.40)$$

ersetzt oder bei genügend langen Segmenten vernachlässigt werden. Der Relaxationsterm und der Antizipationsterm können in Anlehnung an das Modell MAKSIMOS

(CREMER und PUTENSEN, 1992) zusammengefaßt werden. Nach Erweiterung dieses Ansatzes um einen dynamischen Faktor $f(k_{i+1}, k_i, L_i)$ anstelle eines statischen können Rückstaus besser modelliert und unterschiedliche Segmentlängen berücksichtigt werden. Es ergibt sich die zunächst noch allgemeine Gleichung:

$$\begin{aligned} relaxation + antizipation = & \frac{T}{\tau} f(k_{i+1}, k_i, L_i) (V_i(k_i) - v_i) + \\ & \frac{T}{\tau} (1 - f(k_{i+1}, k_i, L_i)) \cdot (V_{i+1}(k_{i+1}) - v_i) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Im Rahmen der Untersuchungen wurden für die Funktion f zwei Ansätze implementiert. Der erste folgt der Gleichung:

$$f(k_{i+1}, k_i, L_i) = 0.5 \cdot \left(\frac{kmax_{i+1} - k_{i+1}}{kmax_{i+1}} + \frac{L_i - lmin}{lmax - lmin} \right) , \text{ mit} \quad (3.42)$$

$kmax$ maximale Dichte
 $lmin$ minimale Segmentlänge
 $lmax$ maximale Segmentlänge

Der zweite Ansatz folgt der Gleichung:

$$f(k_{i+1}, k_i, L_i) = 0.5 \cdot \left(\frac{k_i}{kmax_i} + \frac{L_i - lmin}{lmax - lmin} \right) \quad (3.43)$$

Der erste Bruch berücksichtigt jeweils die Abhängigkeit des Vorausschauens als Funktion der Dichte. Im ersten Ansatz wird die Dichte des folgenden Abschnitts verwendet; diese Dichte geht mit $1 - k_{i+1}/kmax_{i+1}$ in das aktuelle Segment ein. Im zweiten Ansatz wurde die Dichte des aktuellen Segments verwendet, die direkt mit $k_i/kmax_i$ eingeht. Im mesoskopischen Modell ANIMAL (KATES, 1994, 1995) wurde ein ähnlicher Ansatz unter Beibehaltung der Berücksichtigung der Dichtedifferenz gewählt. Beide Implementierungen der allgemeinen Funktion f liefern gute Ergebnisse; in Anlehnung an ANIMAL wird die zweite verwendet. Ein dritter Ansatz unter Berücksichtigung beider Dichten wurde nicht implementiert und näher untersucht:

$$f(k_{i+1}, k_i, L_i) = 0.5 \cdot \left(0.5 \cdot \left(\frac{k_i}{kmax_i} + \frac{kmax_{i+1} - k_{i+1}}{kmax_{i+1}} \right) + \frac{L_i - lmin}{lmax - lmin} \right) \quad (3.44)$$

Der zweite Bruch berücksichtigt jeweils die Segmentlänge des aktuellen Segmentes. Die maximale Dichte wird aus dem verwendeten Fundamentaldiagramm des Segmentes genommen:

$$kmax_i = k_{max}(i) \quad (3.45)$$

Die minimale und maximale Segmentlänge werden zu

$$lmin = 200 \text{ m} \quad (3.46)$$

$$lmax = 5000 \text{ m} \quad (3.47)$$

gesetzt. Die Zeitkonstante τ wird zu

$$\tau = 20 \text{ sec} \quad (3.48)$$

gesetzt.

Flußgleichung

Die Flußgleichung 3.19 wird im wesentlichen gleichbehalten; der Parameter α wird allerdings wie der Parameter f im allgemeinen als dynamische Funktion $\alpha(k_i, k_{i+1}, L_{i+1})$ aufgefaßt. Die Funktion α wird als

$$\alpha = \frac{kmax_{i+1} - k_{i+1}}{kmax_{i+1}} \quad (3.49)$$

implementiert. Dies entspricht dem ersten Term des ersten Ansatzes 3.42 für den Parameter f . Der zweite Ansatz führt hier zu schlechteren Ergebnissen, da mit dem Parameter α verhindert werden soll, daß in ein bereits überstautes Segment zusätzliche Fahrzeuge eingebracht werden; deshalb muß die Dichte k_{i+1} des nächsten Segmentes verwendet werden. Der Parameter α berücksichtigt damit, daß bei hohen Dichten auf dem Nachfolgesegment der Verkehrsfluß, der genau an der Segmentgrenze auftritt, geringer ist als die im örtlichen Mittel an virtuellen Meßquerschnitten zu erwartenden Verkehrsstärke.

Zusammenfassung

Die Erweiterung der Gleichungen zur Berechnung der Geschwindigkeit und Verkehrsstärke ergeben ein geschlossenes Modell, das ohne „wenn–dann“ Abfragen zur Berücksichtigung von zusätzlichen Randbedingungen wie dem Einhalten einer maximalen Dichte oder das Vermeiden negativer Geschwindigkeiten auskommt. Ein Vorteil ist, daß das Modell immer in sich konsistent ist; auf diese Weise kann die Modellierung unrealistischer dynamische Vorgänge vermieden werden.

3.3.6 Warteschlangenmodellierung

Einleitung

Aufgrund der Maßnahmen zur Beschränkung der Dichte im CREMER/PAYNE Modell und der verkehrsabhängigen Bestimmung der Flüsse im erweiterten Modell werden an den Netzzufahrten Warteschlangenmodelle benötigt. Die Verwendung der Warteschlangenmodelle verhindert, daß Fahrzeuge verloren gehen, die in Realität ankommen, aufgrund der simulierten Verkehrsverhältnisse aber keinen Platz mehr finden. Die Ursache dafür ist neben Modellungenauigkeiten vor allem die Simulation von der Wirklichkeit abweichender Stelleingriffe, um verschiedene Schaltstrategien zu testen.

Ansatz

Die Berechnung der Verkehrsflüsse wird nach MESSMER (1994) vorgenommen. An allen Netzzufahrten werden Warteschlangenmodelle verwendet, die die ankommenden Fahrzeuge zunächst aufnehmen:

$$W(n) = W(n-1) + T(q_m(n) - q_j(n)) \quad , \text{ mit} \quad (3.50)$$

- W Zahl der Fahrzeuge in der Warteschlange
- q_m ankommender gemessener Verkehrsfluß
- q_j an Simulation abgegebener Verkehrsfluß

$W_n + T \cdot q_m(n)$ ist die maximale Anzahl von Fahrzeugen, die zum Zeitschritt n in die Simulation eingespeist werden kann. Der Index j kennzeichnet die aus der Meßstelle m ermittelten und an die Simulation weitergegebenen Größen. Das Segment i ist das Segment, das direkt an die Meßstelle angrenzt. Der maximale Fluß, der in die Simulation eingespeist werden kann, berechnet sich zu:

$$q_{j,max}(n) = \begin{cases} c \cdot l & : k < k_c \\ c \cdot l \left(1 - \frac{k_i(n) - k_c}{k_{max} - k_c}\right) & : k \geq k_c \end{cases} \quad , \text{ mit} \quad (3.51)$$

- $q_{i,max}$ maximal einprägbare Verkehrsfluß
- c maximaler Verkehrsfluß nach Fundamentaldiagramm
- l Zahl der Fahrstreifen
- k_c Dichte bei maximalem Verkehrsfluß
- k_{max} maximale Dichte

Der tatsächlich eingeprägte Fluß berechnet sich aus:

$$q_j(n) = \min(W(n-1) + T \cdot q_m(n), q_{i,max}(n)) \quad (3.52)$$

Die Geschwindigkeit wird in Erweiterung zu MESSMER (1994) aus der gemessenen Geschwindigkeit und dem Fundamentaldiagramm berechnet:

$$v_i = \min(v_m, V(k_i)) \quad (3.53)$$

3.3.7 Modellvalidierung

Ansatz

Manche Eigenschaften des Modells, wie zum Beispiel die Fähigkeit den gebundenen Verkehr dynamisch korrekt abzubilden, lassen sich mathematisch nur schwer formulieren und in der Folge davon auch nur schwer quantifizieren. Zudem muß der Einsatzzweck des Modells in der Validierung berücksichtigt werden. Gerade bei der Simulation netzhafter Wirkungen ist das Verkehrsflußmodell ein Teil des Ganzen, der nur schwer herausgelöst und bewertet werden kann. Das erweiterte Modell wird daher

an einem linienförmigen Abschnitt mit dem CREMER/PAYNE-Modell bezüglich seiner Realitätsnähe verglichen. Dies stellt aber beim Einsatz zur netzhaften Simulation nur einen Teil der Qualität des Modells dar. Das CREMER/PAYNE-Modell mit vereinfachter Dichtekorrektur nach METANET und das Modell mit den vorgestellten Erweiterungen werden anhand von Realdaten bewertet. Die Stabilität des Modells als Teilbaustein der Gesamtsimulation wird durch die Ergebnisdarstellung der Netzsteuerung später noch nachgewiesen.

Versuchsaufbau

Die Validierung soll an einem möglichst linienförmigen Abschnitt mit drei nacheinander befindlichen Meßquerschnitten erfolgen, um Einflüsse wie zum Beispiel von Verflechtungsstrecken zu vermeiden. Bild 3.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Die Meßquer-

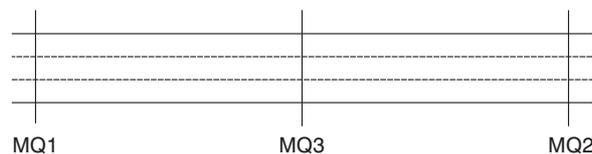


Abbildung 3.4: Prinzipieller Versuchsaufbau

schnitte 1 und 2 geben dem Modell die Randbedingungen vor. Der Meßquerschnitt 3 dient zur Bewertung; seine Daten, also die Geschwindigkeit und der Verkehrsfluß, werden mit denen des Modells an dieser Stelle verglichen. Es werden auf eine Minute aggregierte Daten vom 19.1.1998 5:00 Uhr am AK München Nord verwendet; aufgrund der realen Randbedingungen müssen die Meßquerschnitte 1 und 2 durch jeweils zwei Meßquerschnitte ersetzt werden, so daß sich der Versuchsaufbau nach Bild 3.5 ergibt. Der dreistreifige Autobahnabschnitt wird zwischen den Meßquerschnitten in vier äqui-

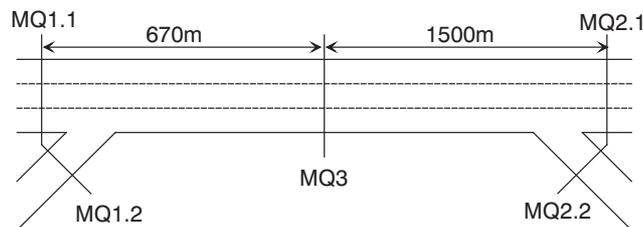


Abbildung 3.5: Realer Versuchsaufbau

distante Abschnitte eingeteilt. Die Modelle verfügen über ein deterministisches Warteschlangenmodell am Meßquerschnitt 1, das die Fahrzeuge speichert, die vom Modell aufgrund eines Rückstaus nicht aufgenommen werden, in Realität den Meßquerschnitt aber überfahren.

Bewertungskriterien

Neben einer qualitativen Interpretation der Kurvenverläufe sowohl der Geschwindigkeit als auch des Verkehrsflusses werden drei Gütekriterien definiert:

- Der mittlere lineare Fehler E_l folgt der Gleichung:

$$E_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - \hat{y}), \text{ mit} \quad (3.54)$$

y Meßwert

\hat{y} Schätzwert

Obwohl sich negative und positive Fehler in diesem Gütemaß aufheben ist es dennoch wertvoll um systematische Fehler des Modells zu erkennen.

- Das Varianzmaß E_v folgt der Gleichung:

$$E_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2 \quad (3.55)$$

- Der mittlere quadratische Fehler E_q folgt der Gleichung:

$$E_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2} \quad (3.56)$$

Diese Gütekriterien werden jeweils für die Geschwindigkeit v_2 und den Verkehrsfluß q_2 des zweiten Segments beziehungsweise die Meßgrößen v_{MQ3} und q_{MQ3} des Meßquerschnitts 3 berechnet.

Ergebnisse

Die Bilder 3.6 und 3.7 zeigen die Geschwindigkeits- und Verkehrsflußganglinien der Modelle und Realdaten. Das CREMER/PAYNE-Modell bildet den Stau qualitativ nur ungenügend nach; das Geschwindigkeitsniveau wird überschätzt. Nur während einer kurzen Zeitdauer bricht die Geschwindigkeit ein. Während der übrigen Zeitdauer des Staus ergibt sich die simulierte Geschwindigkeit aus dem Konvektionsterm der Geschwindigkeitsgleichung und den Meßwerten am Eingang des Streckenabschnittes. Der Zusammenbruch des Verkehrs im Modell wird durch das Warteschlagenmodell verhindert. Die Information des Meßquerschnitts MQ2 breitet sich nicht ausreichend stark entgegen der Fahrtrichtung aus.

Das erweiterte Modell unterschätzt die im gebundenen Verkehr auftretenden Geschwindigkeiten; es ist aber in der Lage, den gebundenen Verkehr mit seinen Geschwindigkeitsschwankungen nachzubilden, wenn auch mit geringeren Amplituden. Nach dem

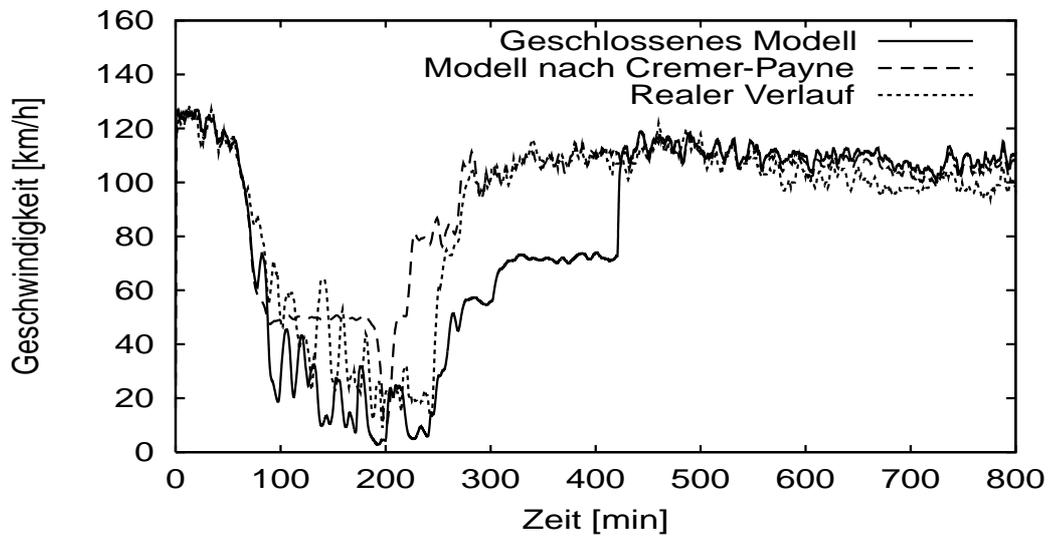


Abbildung 3.6: Vergleich der Geschwindigkeitsganglinien (1)

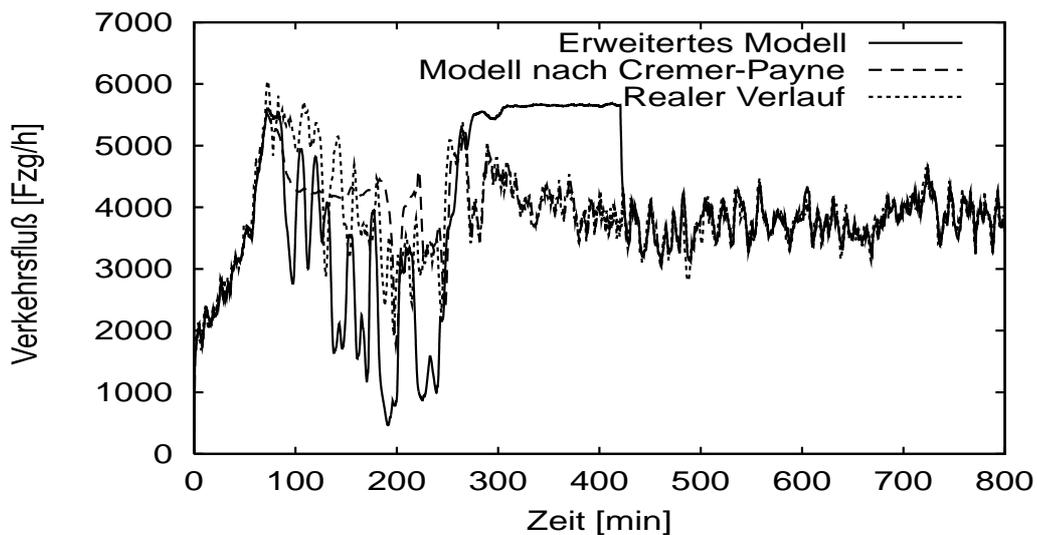


Abbildung 3.7: Vergleich der Verkehrsflußganglinien

Ende des gebundenen Verkehrs besitzen beide Modelle eine „Erholungsphase“ im Geschwindigkeitsverlauf, die beim CREMER/PAYNE-Modell schon vor dem realen zeitlichen Ende des gebundenen Verkehrs auftritt. Die Erholungsphase resultiert aus dem Entladen der deterministischen Warteschlangen am Meßquerschnitt MQ1. Das CREMER/PAYNE-Modell bildet die Verkehrsflußganglinie im Mittel sehr gut nach. Das erweiterte Modell bildet den Verkehrsfluß zwar qualitativ gut nach, allerdings mit zu

großen Amplituden; zudem wird der Verkehrsfluß im gebundenen Verkehr unterschätzt. Sobald der gebundene Verkehr endet, gibt es einen Bereich mit Überschätzung des Verkehrsflusses; das erweiterte Modell nutzt die Stauauflösung um die deterministische Warteschlange zu entleeren. Tabelle 3.2 zeigt die sich ergebenden Gütekriterien auf drei gültige Ziffern gerundet. Trotz der qualitativ schlechten Nachbildung des gebundenen Verkehrs durch das CREMER/PAYNE-Modell ergeben sich für dieses bessere Gütekriterien (CREMER/PAYNE(1) in Tabelle 3.2).

Modell	E_l	E_v	E_q
$q_{\text{CREMER/PAYNE(1)}}$	-5.44	214000	462
$q_{\text{erweitert}}$	-6.16	1150000	1070
$q_{\text{CREMER/PAYNE(2)}}$	-2.47	55000	235
$v_{\text{CREMER/PAYNE(1)}}$	-7.47	487	22.1
$v_{\text{erweitert}}$	7.89	431	20.8
$v_{\text{CREMER/PAYNE(2)}}$	13.2	931	30.5

Tabelle 3.2: Modellvergleich: Gütekriterien

Bild 3.8 zeigt den Vergleich der Geschwindigkeitsganglinien für das CREMER/PAYNE-Modell ohne deterministische Warteschlange. Das CREMER/PAYNE-Modell tendiert

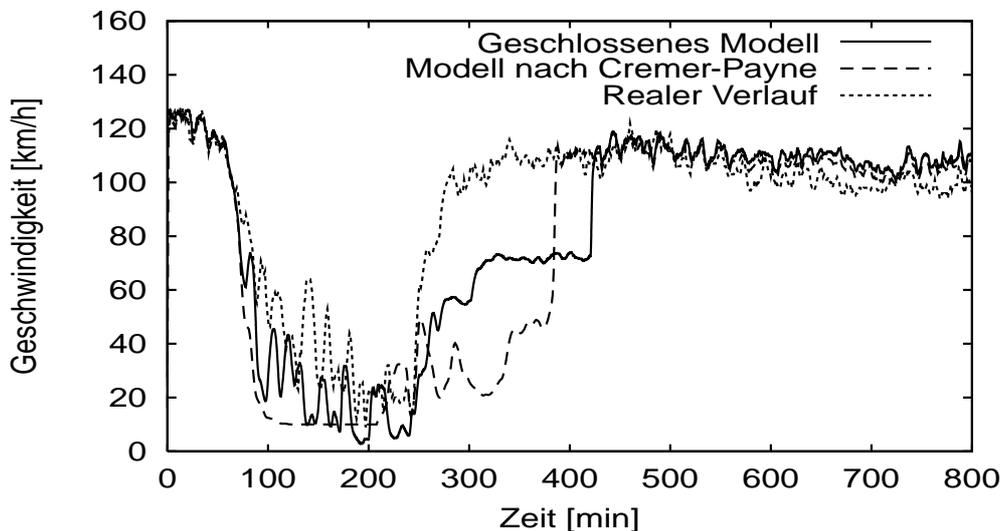


Abbildung 3.8: Vergleich der Geschwindigkeitsganglinien (2)

jetzt dazu die eingprägten Verkehrsflüsse nachzubilden – allerdings zu Lasten der Ge-

schwindigkeit, die aufgrund unrealistisch hoher Dichten zu gering geschätzt wird. Die untere Geschwindigkeitsschranke des CREMER/PAYNE-Modells nach METANET kann in der Geschwindigkeitsganglinie gut erkannt werden. Die Geschwindigkeitsschwankungen werden nicht nachgebildet. Die Erholungsphase dauert solange, bis die Dichte auf den Segmenten durch den Abfluß ausreichend reduziert wurde. Obwohl das CREMER/PAYNE-Modell ohne deterministischen Warteschlangen die Stauausbreitung qualitativ nachbilden kann, ergeben sich nun deutlich schlechtere Gütekriterien für den Geschwindigkeitsverlauf (CREMER/PAYNE(2) in Tabelle 3.2).

Die Vorteile des geschlossenen Modells werden in der quantitativen Bewertung nur teilweise sichtbar, da das Modell noch nicht bezüglich quantitativer Ergebnisse optimiert wurde, da dies in dieser Arbeit nicht benötigt wird.

Untersuchung der dynamischen Modelleigenschaften

Die dynamischen Modelleigenschaften werden anhand der Nachbildung eines geschlossenen Straßenringes mit einer Länge von 250 km untersucht. Es wird das Fundamentaldiagramm nach Gleichung 3.8 verwendet. Die freie Geschwindigkeit wird zu 122.5 km/h und die maximale Dichte zu $98\text{ Fz}/(\text{km Fahrstreifen})$ gesetzt. Die Segmentlänge beträgt 1000 m . Die Segmente werden mit einer Verkehrsdichte von $25\text{ Fz}/(\text{km Fahrstreifen})$ und einer der Dichte gemäß dem statischen Fundamentaldiagramm entsprechenden Geschwindigkeit von 64.6 km/h initialisiert. In einem Segment wird die Dichte zu $27\text{ Fz}/(\text{km Fahrstreifen})$ gesetzt. Ausgehend von diesem Segment entwickelt sich eine Stauung, die während ihrer Entstehungszeit mit der Fahrtrichtung und anschließend entgegen der Fahrtrichtung wandert.

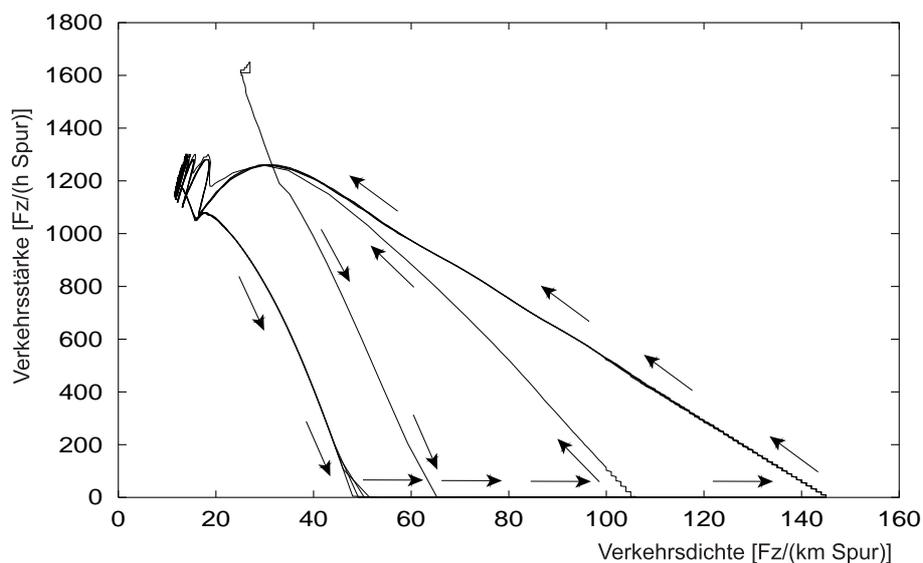


Abbildung 3.9: CREMER/PAYNE-Modell ohne Randbedingungen

Bild 3.9 zeigt das sich im dynamischen Verkehrsfluß/Verkehrsdichte-Fundamentaldiagramm eines Querschnitts ergebende Muster für das CREMER/PAYNE-Modell ohne Abfrage zu hoher Verkehrsdichten als zusätzliche Randbedingung. Unmittelbar nach Simulationsstart bricht der Verkehr zusammen. Die Verkehrsdichte in diesem ersten Zusammenbruch beträgt bis zu $105 \text{ Fz}/(\text{km Fahrstreifen})$. In allen weiteren Zusammenbrüchen entstehen Dichten bis über $140 \text{ Fz}/(\text{km Fahrstreifen})$. Offensichtlich ist das dynamische Fundamentaldiagramm inkonsistent mit dem statischen Fundamentaldiagramm, das als Parameter des Modells verwendet worden ist. Obwohl das statische Fundamentaldiagramm, das als Parameter des Modells genutzt wird, nur eine Einbereichsbeschreibung des Geschwindigkeits/Dichte-Zusammenhanges ist liefert das dynamische Modell eine Mehrbereichsbeschreibung des Geschwindigkeits/Dichte-Zusammenhanges.

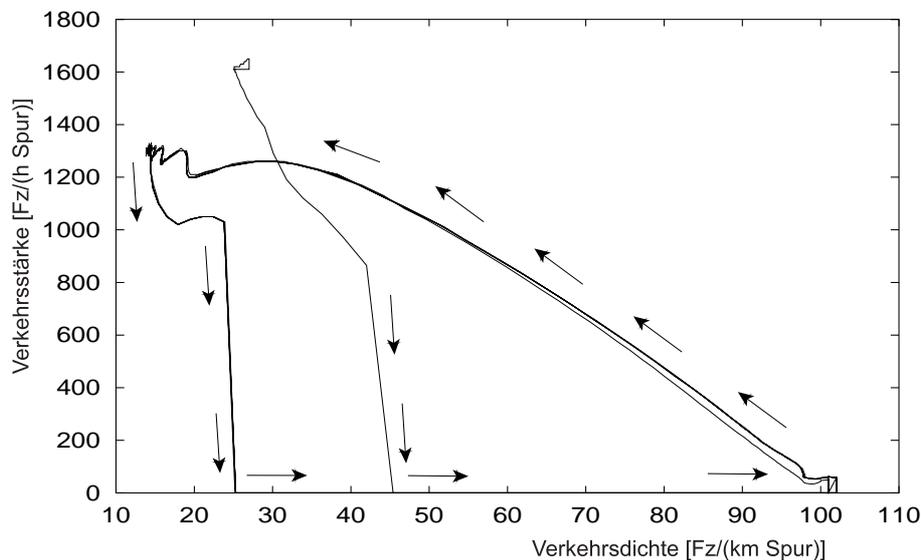


Abbildung 3.10: CREMER/PAYNE-Modell mit Randbedingungen

Bild 3.10 zeigt das dynamische Fundamentaldiagramm für das CREMER/PAYNE-Modell in der Implementierung nach METANET mit einer maximalen Dichte von $100 \text{ Fz}/(\text{km} \cdot \text{Fahrstreifen})$. Die Verkehrsstärken springen durch die „wenn-dann“-Abfrage auf null, sobald die maximale Verkehrsstärke im nächsten Segment überschritten wird. Neben den unrealistischen Sprüngen wird das Modell bezüglich des Zusammenhanges der Verkehrsstärke mit der Geschwindigkeit und der Verkehrsdichte inkonsistent.

Bild 3.11 zeigt das Diagramm für das erweiterte Modell. Es ergeben sich weder zu hohe Verkehrsdichten noch unrealistische dynamische Vorgänge wie Sprünge der Verkehrsstärken, da das erweiterte Modell in sich geschlossen und konsistent ist; es ist in

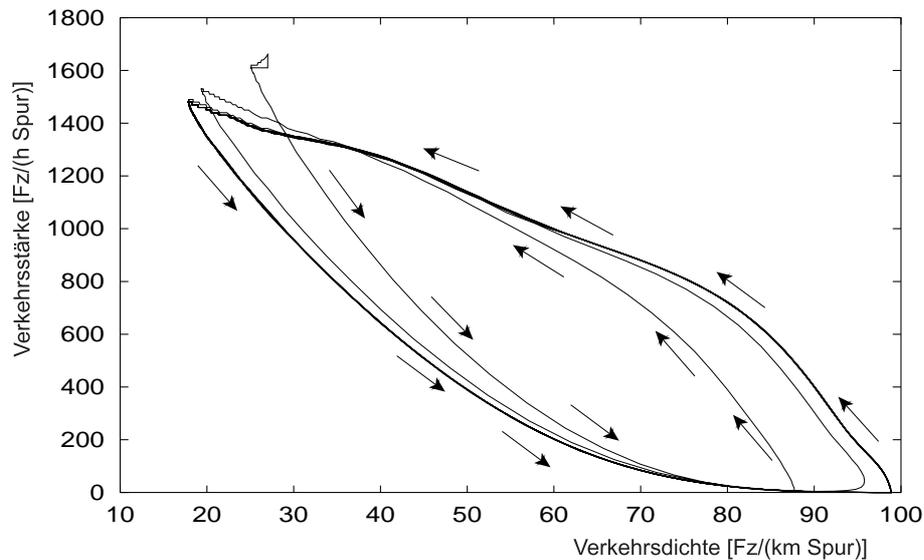


Abbildung 3.11: Geschlossenes Modell ohne Randbedingungen

der Lage, den Verkehr ohne Beachtung zusätzlicher Randbedingungen nachzubilden.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Modellerweiterungen erlauben eine gute *qualitative* Nachbildung des Verkehrs. Insbesondere werden die Verkehrsflüsse an den Rändern nicht eingepreßt, sondern ergeben sich aus dem inneren Modellzustand. Dies ist bei der Simulation von Netzsteuerungen unabdingbar, da bei der Variation des Stelleingriffs auch Verkehrszustände simuliert werden, die in der Realität vor allem aufgrund eines veränderten Stelleingriffs nicht auftreten. Zudem bildet das geschlossene erweiterte Verkehrsflußmodell den Verkehr auch ohne explizite Berücksichtigung von Randbedingungen, insbesondere durch die Nutzung von „wenn–dann“ Abfragen nach, so daß keine unrealistischen dynamischen Abläufe entstehen. Das erweiterte Modell ist daher zur Simulation einer Netzsteuerung gut geeignet.

3.4 Netzhafte Verkehrsflußmodellierung

3.4.1 Einleitung

Die Gleichungen 3.18 – 3.49 des Abschnitts 3.3 behandeln die Modellierung auf einem linienförmigen Abschnitt. Der Verkehr an Knoten wurde weder bezüglich seines Geschwindigkeitsverhaltens noch seines Dichteverhaltens beschrieben. Während für die Verkehrsflußmodellierung auf Linien nur querschnittsbezogene Meßdaten oder die Ergebnisse einer Nachfragemodellierung (siehe 2.5.1) benötigt werden, braucht man zur

Verkehrsflußmodellierung an Netzknoten Ergebnisse der Verkehrsstrommodellierung (siehe 2.5.1). Durch die Nachbildung der Knoten können die netzhaften Wirkungen zum Beispiel einer Netzsteuerung je nach gewähltem Ansatz ermittelt werden. Es können zwei Ansätze zur Modellierung der Verkehrsströme am Knoten unterschieden werden:

- Die Verwendung von Knotenpunktmatrizen erlaubt die Verkehrsflußmodellierung an Knoten ohne Modifizierung der im Abschnitt 3.3 beschriebenen Gleichungen. Die Fahrzeuge und die sie beschreibenden Dichten auf und Verkehrsflüsse zwischen den Segmenten werden bezüglich ihrer Routenwahl nicht unterschieden; die Modellierung an einem Knoten greift nur auf die aggregierten Daten der Segmente zurück. Dieser Ansatz wird im folgenden daher als *eindimensional* bezeichnet, weil die Verkehrsdaten einer Kante nur bezüglich des Ortes in Form der Segmente unterschieden werden. Beschreibungen der Anwendung dieses Ansatzes und seiner Bewertung kann zum Beispiel in SIEGENER ET AL. (1992); KAYSER ET AL. (1986); KRUX ET AL. (1997) gefunden werden.
- Die Verwendung von Kordonmatrizen und einer daraus abgeleiteten Information über die von den Verkehrsströmen gewählten Routen erfordert Erweiterungen der Verkehrsfluß- und Dichtegleichung. Auf jedem Segment wird der absolute oder relative Anteil einer Route an der Gesamtdichte beziehungsweise der Gesamtverkehrsstärke getrennt bilanziert. Dieser Ansatz wird im folgenden aufgrund der orts- und routenbezogenen Indizierung als *zweidimensional* bezeichnet. Die Anwendung dieses Ansatzes kann zum Beispiel in PAPAGEORGIOU (1990), citetmessmer1, CREMER ET AL. (1993), SACHSE (1998), sowie MEISSNER (1998) gefunden werden.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die lokale Modellierung des Verkehrsverhaltens am Knoten basierend auf diesen zwei Ansätzen. Bei beiden Ansätzen wird die Anwendbarkeit zur Modellierung der netzhaften Wirkungen einer Netzsteuerung an Beispielen beschrieben.

3.4.2 Eindimensionale netzhafte Verkehrsflußmodellierung

Ansatz

Die Verkehrsgrößen q und k werden bezüglich ihrer Routenwahl nicht unterschieden. Die im Abschnitt 3.3 beschriebenen Formeln können auf streckenförmigen Autobahnen direkt übernommen werden. Die netzhafte Modellierung am Knoten wird mittels Knotenpunktmatrizen beziehungsweise Abbiegeraten vorgenommen. Die nach einem Knoten in Abhängigkeit der Abbiegeraten beziehungsweise Stelleingriffen veränderte Zusammensetzung des Verkehrsstroms wird nicht berücksichtigt. Eine Zuordnung der Ganglinien der Knotenpunktmatrizen, der Stelleingriffe und der Verkehrsstärke in den Modellgleichungen erfolgt nicht. Diese Art der netzhaften Verkehrsflußsimulation kann daher auch als statisch bezeichnet werden.

Segmentierung

Bild 3.12 zeigt die Segmenteinteilung an einem allgemeinem Knoten mit I Zufahrten und J Abfahrten. Zusätzlich zu den längenbehafteten *natürlichen* Segmenten zur Mo-

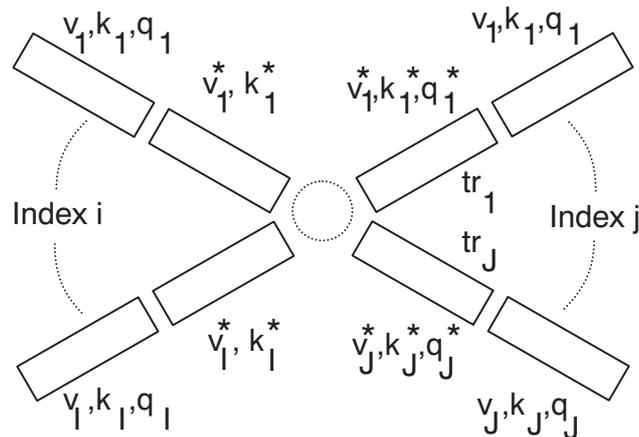


Abbildung 3.12: Segmentierung am Knoten

dellierung von Kanten (siehe Bild 3.3) werden am Knoten *logische* Segmente eingeführt. Die in Bild 3.12 mit einem Stern gekennzeichneten Segmente sind logische, die übrigen angrenzenden Segmente ohne Stern sind natürliche. Das logische Segment einer Kante dient zur Berechnung (und Speicherung) des Einflusses der angrenzenden Kanten. Die logischen Verkehrsgrößen werden aus nicht dynamischen algebraischen Gleichungen ermittelt. Die eigentliche dynamische Verkehrsflußmodellierung kann damit am Knoten auf den abschnittbezogenen Fall zurückgeführt werden.

Berechnung der logischen Verkehrsgrößen nach Meßmer (1994)

In Anlehnung an MESSMER (1994) werden die vor beziehungsweise nach dem Knoten für das CREMER/PAYNE Modell benötigten logischen Verkehrsgrößen berechnet. Die Formel

$$v_j^* = \frac{\sum_{i=1}^I (q_i \cdot v_i)}{\sum_{i=1}^I (q_i)} \quad , \text{ mit} \quad (3.57)$$

- i Segmentbezogener Index der in den Knoten mündenden Kante i
- j Segmentbezogener Index der aus dem Knoten kommenden Kante j
- * Kennzeichnung logischer Segmente

berechnet die wirksame Geschwindigkeit nach dem Knoten aus einer mit den Verkehrsstärken gewichteten Summe der Geschwindigkeiten vor dem Knoten. Die logische Geschwindigkeit v_j^* wird zur Auswertung des Terms 3.21 der Geschwindigkeitsgleichung

benötigt. Die Verkehrsstärke nach dem Knoten ergibt sich aus der mit einer Abbiegerate b_j multiplizierten Summe der Verkehrsstärken vor dem Knoten:

$$q_j^* = b_j \sum_{i=1}^I (q_i) \quad , \text{ mit} \quad (3.58)$$

b_j Abbiegerate auf die Kante j

Die Abbiegeraten müssen der Bedingung

$$\sum_{j=1}^J b_j = 1 \quad (3.59)$$

gehören. Die Abbiegeraten können je nach Anwendung des Modells einer gemessenen oder geschätzten Knotenpunktmatrix entnommen werden. Die Verkehrsstärken q_j^* nach dem Knoten werden zur Auswertung der Dichtegleichung 3.18 benötigt. Die logischen Dichten k_i^* mit

$$k_i^* = \frac{\sum_{j=1}^J (k_j^2)}{\sum_{j=1}^J (k_j)} \quad (3.60)$$

werden zur Auswertung des Terms 3.23 der Geschwindigkeitsgleichung benötigt. Es wird angenommen, daß höhere Dichten stromabwärts einen überproportionalen Einfluß auf das Geschwindigkeitsverhalten haben.

Erweiterung der Berechnung logischer Verkehrsgrößen am Knoten

Die bisher berechneten logischen Verkehrsgrößen sind ausreichend, um das Knotenmodell auf Verkehrsflußmodelle nach CREMER/PAYNE anwenden zu können. Hierbei wird am Knoten vereinfachend der Gewichtungparameter α zu $\alpha = 1$ gesetzt. Die Übernahme dieses Ansatzes ist im erweiterten Modell aufgrund der Gleichung 3.49 nicht wünschenswert. Die nach Gleichung 3.60 berechnete logische Dichte kann nicht in die Flußgleichung 3.19 eingesetzt werden, da sonst keine Linearkombination aus den Produkten $k_i \cdot v_i$ und $k_{i+1} \cdot v_{i+1}$ zustandekommen würde¹. Zur Auswertung der Flußgleichung 3.19 müssen daher die zusätzliche logische Dichte k_i^{**} und die Geschwindigkeit v_i^{**} berücksichtigt werden. Das Produkt dieser Größen berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$k_i^{**} \cdot v_i^{**} = \frac{q_i}{\sum_{i=i}^I q_i} \cdot \sum_{j=1}^J (v_j \cdot k_j) \quad (3.61)$$

Mit dieser Gleichung wird modelliert, daß die summierten Verkehrsbedingungen stromabwärts entsprechend dem Anteil der Kante i am Gesamtstrom in den Knoten berücksichtigt werden. Setzt man die logische Dichte k_i^{**} zu $k_i^{**} = k_i^*$ und belegt die noch

¹Auch mehrdimensionale Knotenmodelle könnten nicht berücksichtigt werden (siehe 3.4.3)

nicht verwendete Variable v_i^* mit v_i^{**} , so ergibt sich die logische Geschwindigkeit zu:

$$v_i^* = v_i^{**} = \frac{1}{k_i^*} \cdot \frac{q_i}{\sum_{i=1}^I q_i} \cdot \sum_{j=1}^J (v_j \cdot k_j) \quad (3.62)$$

Auf die Bestimmung einer eigenen Dichte k_i^{**} kann somit verzichtet werden.

Berücksichtigung der Netzsteuerung

Eine die Kante j beeinflussende Netzsteuerung kann durch unterschiedliche von der Schaltung s abhängige Abbiegeraten $b_j(s)$ berücksichtigt werden. Die übrigen Abbiegeraten im Netz bleiben unbeeinflusst, da der dynamische Zusammenhang nur über das Verkehrsflußmodell gegeben ist, und dieses beim eindimensionalen Ansatz die Zusammensetzung nicht berücksichtigt. Dies führt zu Fehlern (siehe Bild 3.13), da im Fall

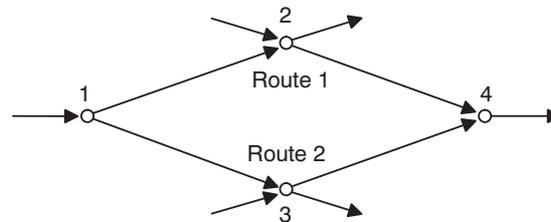


Abbildung 3.13: Beispielnetz

einer Schaltung am Knoten 1 mit einer Umleitung auf Route 2 die Abbiegerate am Knoten 2 auf der Route 1 zu niedrig und die Abbiegerate am Knoten 3 zu groß ist; der umgeleitete Verkehrsstrom wird sich in der Regel an den Knoten 2 und 3 anders verhalten als der nicht umgeleitete Verkehrsstrom. Bei unterschiedlichen Reisezeiten auf den beiden Alternativrouten werden sich auch die wahren Abbiegeraten an Knoten verändern, die sich in Fahrtrichtung nach dem Knoten 4 befinden. Die Modellierung der Netzsteuerung kann mit dem eindimensionalen Ansatz daher nicht befriedigend erfolgen. Der eindimensionale Ansatz kann allerdings dann eingesetzt werden, wenn eine zeitlich-örtliche, nicht aber netzhafte Verkehrsabbildung benötigt wird, und das abzubildende Straßennetz dennoch Knoten beinhaltet.

3.4.3 Zweidimensionale netzhafte Verkehrsflußmodellierung

Ansatz

Die Verkehrsgrößen q und k werden sowohl bezüglich des Ortes als auch ihrer Routenwahl unterschieden. Der Segmentindex i wird ersetzt durch die Indizes i und r :

$$i \rightarrow i, r \quad , \text{ mit} \quad (3.63)$$

r Routenindex

Eine an Knoten mit Netzsteuerung beeinflussbare Route r besitzt sowohl eine Hauptroute als auch eine Alternativroute. Für die mathematische Beschreibung werden auf jedem Segment i alle Routen r beziehungsweise Teilströme berücksichtigt, auch diejenigen, deren Anteil auf dem Segment immer $k_{i,r} = 0$ ist. Die Gesamtdichte k_i und der Gesamtfluß q_i eines Segments ergeben sich zu

$$q_i = \sum_{r=1}^R q_{i,r} \quad (3.64)$$

$$k_i = \sum_{r=1}^R k_{i,r} \quad (3.65)$$

Daraus ergibt sich das in Bild 3.14 gezeigte Prinzip der schichtweisen Modellierung

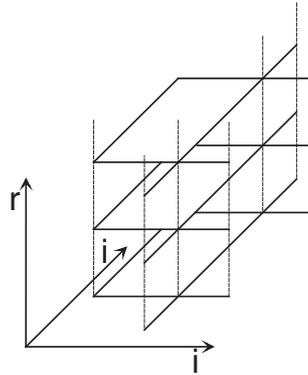


Abbildung 3.14: Berücksichtigung der Routenwahl durch Schichten

des gesamten Straßennetzes (MEISSNER, 1998). Die Dimension Ort wird zweidimensional als Ebene dargestellt; die Dimension der Route ergibt sich aus der Schichtung der Ebenen. Insgesamt ergibt sich damit eine dreidimensionale Darstellung des zweidimensionalen Ansatzes.

Während die Geschwindigkeit v_i eines Segmentes für alle Routenanteile als gleich angesehen wird und entsprechend den Gleichungen aus dem Abschnitt 3.3 berechnet werden kann, werden die Dichten $k_{i,r}$ und Flüsse $q_{i,r}$ durch Ersetzung der Parameter nach Gleichung 3.63 jeweils auf der Schicht der Route r berechnet. Diese Erweiterung betrifft die Gleichungen 3.18 und 3.19. Die Erweiterungen am eindimensionalen Knotenmodell werden in einem eigenen Abschnitt beschrieben. Zur Einsparung von Rechenzeit können auf Segmenten die Schichten entfallen deren Anteil $k_{i,r}$ immer $k_{i,r} = 0$ ist (siehe Bild 3.15). Zudem können diejenigen Routenanteile eines Segmentes zusammengefaßt werden, deren Verhalten im weiteren Routenverlauf identisch ist.

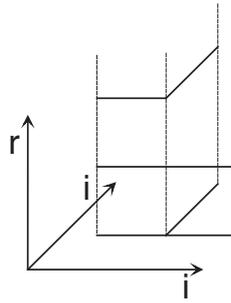


Abbildung 3.15: Reduziertes Schichtenmodell

Die netzhafte Modellierung am Knoten wird anhand der Routenanteile vorgenommen. Die routenbezogenen Abbiegeraten $b_{j,r}$ an einem Knoten sind 0, wenn die Route r nicht über Kante j führt oder 1, wenn die Route r über die Kante j führt. Andere Werte für die Abbiegeraten ergeben sich nur dann, wenn am Knoten eine Netzsteuerung wirksam ist. Die Routenanteile können an den Kordoneinfahrten aus einer Kordonmatrix gewonnen werden.

Berechnung der logischen Verkehrsgrößen am Knoten

Die Segmentierung aus Bild 3.12 ist bezüglich der logischen Segmente auch im zweidimensionalen Ansatz gültig; jedes Segment besitzt die Verkehrsgrößen $k_{i,r}^{(*)}$ und $q_{i,r}^{(*)}$ getrennt für alle Routen r . Die Gleichungen 3.57 und 3.60 beziehen sich auf die Geschwindigkeit sowie die summierte und routenunabhängige Dichte und Verkehrsstärke und können damit direkt übernommen werden. Die Gleichung 3.58 muß um die Betrachtung der Routen erweitert werden zu:

$$q_{j,r}^* = b_{j,r} \sum_{i=1}^I (q_{i,r}) \quad (3.66)$$

Die Gleichung 3.61 für das erweiterte Verkehrsflußmodell wird ergänzt zu:

$$k_{i,r}^{**} \cdot v_i^{**} = \frac{q_{i,r}}{\sum_{i=i}^I q_{i,r}} \cdot \sum_{j=1}^J (v_j \cdot k_{j,r}) \quad (3.67)$$

Die Geschwindigkeit v_i^{**} kann nach Gleichung 3.62 sinnvoll ermittelt werden. Die routenbezogenen Dichten $k_{i,r}^{**}$ ergeben sich dann zu:

$$k_{i,r}^{**} = \frac{1}{v_i^{**}} \cdot \frac{q_{i,r}}{\sum_{i=i}^I q_{i,r}} \cdot \sum_{j=1}^J (v_j \cdot k_{j,r}) \quad (3.68)$$

Die Abbiegeraten $b_{j,r}$ ergeben sich an Knoten ohne Netzsteuerung zu:

$$b_{j,r} = \begin{cases} 1 & : \text{Kante } j \in \text{Route } r \\ 0 & : \text{Kante } j \notin \text{Route } r \end{cases} \quad (3.69)$$

Die Abbiegeraten können damit direkt aus den Routen der im Netz vorkommenden Verkehrsströme abgeleitet werden. Die Abbiegeraten können als konstante Parameter aufgefaßt werden, die zum Parametersatz des Simulationsmodell gehören. Die sich quantitativ ändernden Verkehrsströme werden durch die Zustandsvariablen $k_{i,r}$ dynamisch berücksichtigt. Die in PAPAGEORGIOU (1990); MESSMER (1994) beschriebene zielorientierte Verkehrsflußsimulation durch Zusammenfassung der Routen mit gleichen Fahrtziel ist eine Teilmenge der routenorientierten Verkehrsflußsimulation.

Berücksichtigung der Netzsteuerung

Eine an einem Knoten vorhandene Netzsteuerung wird berücksichtigt mit:

$$b_{j,r} = \begin{cases} \beta_{j,r}(s) & : \text{Kante } j \in \{\text{Route } r \cap \text{Alternativroute}(r)\} \\ 1 - \beta_{j,r}(s) & : \text{Kante } j \in \{\text{Route } r \cap \text{Hauptroute}(r)\} \\ 0 & : \text{Kante } j \notin \text{Route } r \end{cases}, \text{ mit } \quad (3.70)$$

s aktiver Schaltplan

β prozentuale Wirkung

$\beta_{j,r}(s)$ ist eine Funktion des Schaltplans. Ein Schaltplan wird in dieser Arbeit als eine Kombination von übertragener Information verstanden. Die Information kann zum Beispiel eine Verkehrszustandsinformation, aber auch eine Umleitungsempfehlung mit Angabe von Zielströmen sein. Für eine Route r , die aufgrund ihres Zieles an einem Knoten von einer Netzsteuerung nicht beeinflußbar ist, gilt $\beta_{j,r}(s) = 0$ für alle Schaltungen s .

Mit dem zweidimensionalen Ansatz ist es zunächst nicht möglich, Wirkungen von Netzsteuerungen zu simulieren, die auf einer Änderung des Kordonziels einer Route basiert. So könnte es in Bild 3.13 zum Beispiel möglich sein, daß ein Anteil eines Verkehrsstromes im Fall einer Schaltung das Netz am Knoten 3 verlassen will, obwohl er ohne Schaltung das Netz über Knoten 4 verläßt. Dieser Fall wird in der Realität beobachtet (TSAVACHIDIS ET AL., 1998). Die Ursache ist eine Änderung der Kordonmatrix im Fall einer Schaltung; die absolute Quelle-Zielmatrix kann als konstant angenommen werden. Wenn aus den Verkehrsdaten des Netzumgriffes und insbesondere aus den Wirkungen der Schaltungen partiell auf die Quelle-Zielmatrix geschlossen werden kann, so kann durch Erweiterung des Netzes um virtuelle Kanten und Ziele verhindert werden, daß sich die Kordonmatrix ändert. Im Beispiel kann der reale Zielknoten 4 um einen virtuellen Zielknoten 4' mit den entsprechenden Routen ergänzt werden (siehe Bild 3.16).

Daneben wird die Wirkung der Schaltung in Form der Parameter $\beta_{j,r}$ statisch modelliert. Eine lokale zeitliche Änderung der Wirkung kann zwar mit einem Parameter $\beta_{j,r}(s,t)$ berücksichtigt werden, aber nicht deren Zuordnung zu den dynamisch simulierten Verkehrsanteilen. Aufgrund der Untersuchungen in SACHSE (1998) könnte

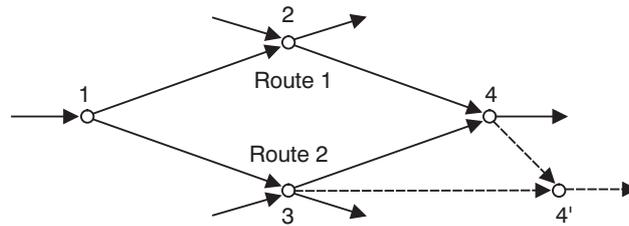


Abbildung 3.16: Beispielnetz mit virtuellem Ziel

es allerdings Fälle geben, in denen die dynamische Modellierung der Wirkungen von Schaltungen die Simulationsergebnisse verbessern könnte.

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Defizite bei der Bewertung simulierter Szenarien kann der zweidimensionale Ansatz dennoch zur netzhaften Verkehrsflußsimulation von Netzsteuerungen verwendet werden.

3.5 Kalmanfilterung des Verkehrsflußmodells

3.5.1 Einleitung

Prozeßrauschen, Meßrauschen und Modellungenauigkeiten verfälschen die Modellierung eines realen Systems. Die entstehenden Fehler können durch Vergleich von Schätz- und Meßgrößen an den Stellen erfaßt werden, an denen Detektoren vorhanden sind. Die Differenzen zwischen Meß- und Schätzgrößen können genutzt werden, um das Modell zu korrigieren – auch solche Größen des Modells, die meßtechnisch nicht erfaßt werden. Die Rekonstruktion des Systemzustandes wird in der Regelungstechnik als Zustandsschätzung bezeichnet. Das Kalmanfilter (KALMAN, 1960; KALMAN und BUCY, 1961) ist ein methodischer Ansatz zur Korrektur eines linearen Modells unter Nutzung von zusätzlichen Meßwerten. Neben den Zuständen linearer Systeme können auch die Zustände linearisierbarer nicht linearer Systeme geschätzt werden. Eine gute Zusammenfassung der Ansätze findet sich in PAPAGEORGIOU (1991).

In CREMER (1979) ist die Anwendung des Kalmanfilters auf das Verkehrsflußmodell nach CREMER/PAYNE enthalten. Eine Weiterentwicklung des Ansatzes zur Störfallerkennung wird in CREMER und SCHÜTT (1990) beschrieben.

In den folgenden Abschnitten werden die Ansätze aus CREMER (1979) beschrieben, auf das erweiterte Verkehrsflußmodell angewendet und auf die Schätzung von Abbiegeraten erweitert.

3.5.2 Systemtheoretischer Ansatz

Der systemtheoretische Ansatz basiert auf der Zustandsdarstellung der Differenzgleichungen des zu beobachtenden dynamischen Systems. Die allgemeine diskrete Zustandsdarstellung eines linearen Prozeßmodells lautet:

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(n) + \mathbf{B} \mathbf{u}(n) + \mathbf{D} \mathbf{z}(n) \quad , \text{ mit} \quad (3.71)$$

- \mathbf{x} Zustandsvektor
- \mathbf{A} Systemmatrix
- \mathbf{u} Eingangsvektor
- \mathbf{B} Systemdurchgriff
- \mathbf{z} Systemrauschen
- \mathbf{D} Durchgriff der Störungen

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C} \mathbf{x}(n) + \mathbf{w}(n) \quad , \text{ mit} \quad (3.72)$$

- \mathbf{y} Ausgangsvektor
- \mathbf{C} Meßmatrix
- \mathbf{w} Meßrauschen

Die Zustandsgleichung ist im Bild 3.17 als Signalflußplan dargestellt. Es wird ange-

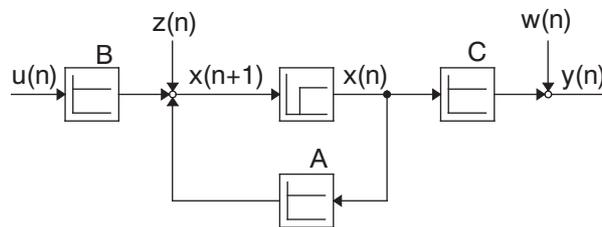


Abbildung 3.17: Signalflußplan der Zustandsgleichung

nommen, daß die Zustände sowie die Meßwerte Rauschanteile (Systemrauschen, Meßrauschen) beinhalten, und die Erwartungswerte der Rauschanteile bekannt sind. Dadurch ist es möglich, aus dem unverrauschten Prozeßmodell, das die in Wirklichkeit verrauschten Zustände nicht genau nachbilden kann, und aus den verrauschten Meßwerten auf die verrauschten Zustände zu schließen, indem man die Kovarianzmatrix $\mathbf{\Pi}$ der Zustände betrachtet.

Folgende Größen seien zunächst bekannt:

- der aktuelle Zustand \mathbf{x} des Systems
- die zum Zustand gehörende Kovarianz $\mathbf{\Pi}$

Der Filteralgorithmus besteht aus der iterativen Berechnung der folgenden Schritte (PAPAGEORGIOU, 1991):

1. Berechne eine Prädiktion des nächsten Zeitschrittes durch Berechnung der ungestörten Modellgleichung

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(n) + \mathbf{B} \mathbf{u}(n) \quad , \text{ mit} \quad (3.73)$$

\mathbf{x} (prognostizierter) Zustandsvektor

2. Berechne eine Prädiktion der Zustandskovarianz mittels der Formel

$$\mathbf{\Pi}(n+1) = \mathbf{A}\mathbf{\Pi}(n)\mathbf{A}^T + \mathbf{D}\mathbf{Z}\mathbf{D}^T \quad , \text{ mit} \quad (3.74)$$

$\mathbf{\Pi}$ Kovarianzmatrix des Zustandes

\mathbf{Z} Erwartungswert für die Kovarianzmatrix des Systemrauschens

\mathbf{D} Übergangsmatrix des Systemrauschens

3. Wiederhole die Schritte 1 und 2 so oft wie nötig bis neuer Meßwert vorliegt

4. Berechne die Korrekturmatrix mittels der Formel

$$\mathbf{H}(n) = \mathbf{A}\mathbf{\Pi}(n)\mathbf{A}^T + \mathbf{D}\mathbf{Z}\mathbf{D}^T \quad , \text{ mit} \quad (3.75)$$

\mathbf{H} Korrekturmatrix

5. Berechne den prognostizierten Meßvektor zu

$$\mathbf{y}_p(n) = \mathbf{C}(n)\mathbf{x}(n) \quad , \text{ mit} \quad (3.76)$$

\mathbf{y}_p prognostizierter Meßvektor

6. Berechne den korrigierten Zustandsvektor mittels der Formel

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{x}(n) + \mathbf{H}(n)(\mathbf{y}(n) - \mathbf{y}_p(n)) \quad , \text{ mit} \quad (3.77)$$

\mathbf{x} (korrigierter) Zustandsvektor

\mathbf{y} Meßvektor

7. Berechne die Kovarianzmatrix des korrigierten Zustandsvektors mittels der Formel

$$\mathbf{\Pi}(n) = (\mathbf{E} - \mathbf{H}(n)\mathbf{C}(n))\mathbf{\Pi}(n) \quad , \text{ mit} \quad (3.78)$$

\mathbf{E} Einheitsmatrix

Der Kern dieser Berechnungen ist die Riccati Differenzgleichung, deren Signalfluß in Bild 3.18 skizziert ist. Aus ihr wird die Filtermatrix \mathbf{H} gewonnen. Oft liegt wie auch bei den Verkehrsflußmodellen ein nicht lineares Modell beziehungsweise System vor:

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(n), \mathbf{u}(n), \mathbf{z}(n), n) \quad (3.79)$$

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{c}(\mathbf{x}(n), n) + \mathbf{w}(n) \quad (3.80)$$

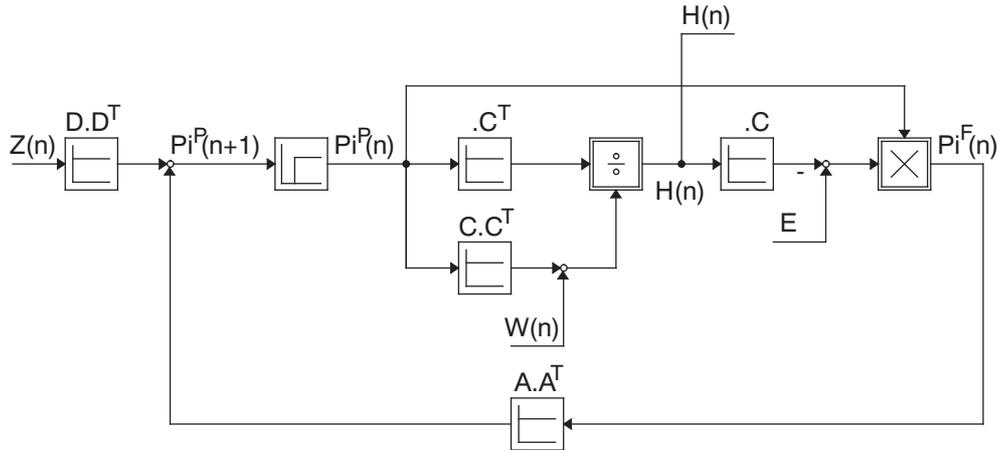


Abbildung 3.18: Signalflußplan der Riccati Differenzgleichung

Der Filteralgorithmus kann angewendet werden, wenn das nicht lineare System linearisiert werden kann. Die Systemmatrizen des linearisierten Systems errechnen sich zu:

$$\mathbf{A}(n) = \frac{\delta \mathbf{f}}{\delta \mathbf{x}(n)}, \quad \mathbf{Z}(n) = \frac{\delta \mathbf{f}}{\delta \mathbf{z}(n)}, \quad \mathbf{C}(n) = \frac{\delta \mathbf{c}}{\delta \mathbf{x}(n)} \quad (3.81)$$

Die Gleichung 3.73 wird durch Gleichung 3.80 ohne Störgrößen und die Gleichung 3.76 durch die Gleichung 3.80 ebenfalls ohne Störgrößen ersetzt. Der Filteralgorithmus garantiert für nicht lineare Systeme nur suboptimale Filtermatrizen.

3.5.3 Modellgleichungen

Das Kalmanfilter wird für allgemeine Teilnetze unter Nutzung der Verkehrsflußgleichungen des CREMER/PAYNE- (Gleichungen 3.18, 3.19, 3.21 -3.23) und des erweiterten Modells (Gleichungen 3.18, 3.19, 3.42, 3.42, 3.49) sowie des eindimensionalen Knotenmodells (Gleichungen 3.57, 3.58, 3.60, 3.62) und eines der detailliert beschriebenen Fundamentaldiagramme (Gleichungen 3.4, 3.8, 3.13) entwickelt. Im Fundamentaldiagramm wird die freie Geschwindigkeit V_{f_i} der Segmente i als erweiterter Zustand aufgefaßt und geschätzt. Zur Vermeidung von Übermodellierung können Segmente mit ähnlichen verkehrstechnischen Bedingungen in einer Gruppe (Index A) zusammengefaßt werden, so daß für diese nur eine unabhängige Geschwindigkeit geschätzt werden muß:

$$V_{f_i} = V_{f_A}, \quad \forall i \in A \quad (3.82)$$

Die Systemgleichung der freien Geschwindigkeiten \mathbf{V}_{f_A} wird angesetzt zu:

$$\mathbf{V}_{f_A}(n+1) = \mathbf{V}_{f_A}(n) + \mathbf{z}_{V_{f_A}}, \quad \text{mit} \quad (3.83)$$

$\mathbf{z}_{V_{f_A}}$ Rauschanteil der Parameter \mathbf{V}_{f_A}

Analog dazu wird für die zu schätzenden Abbiegeraten die Gleichung

$$\mathbf{b}_j(n+1) = \mathbf{b}_j(n) + \mathbf{z}_{b_j} \quad (3.84)$$

aufgestellt. Der Zustandsvektor \mathbf{x} ergibt sich somit zu:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{k}_i \\ \mathbf{b}_j \\ \mathbf{V}_{f_A} \end{pmatrix} \quad (3.85)$$

Bei vielen technischen Systemen können die Eingänge \mathbf{u} und Ausgänge \mathbf{y} eindeutig unterschieden werden. Aufgrund der Entwicklung der Differenzgleichungen der Verkehrsflußmodelle aus einem partiellen Differentialgleichungssystem können die Meßdaten q_m und v_m des Querschnitts m aus einem beobachteten Teilnetz meist nicht eindeutig als Eingang oder Ausgang des Modells interpretiert werden. Lediglich ein ohne Dichtekorrekturen in das CREMER/PAYNE-Modell eingepprägter Verkehrsfluß ist eindeutig ein Modelleingang. CREMER (1979) wählte den Ansatz, um die zur Verfügung stehenden Meßgrößen entweder den Eingängen oder Ausgängen fest zuzuweisen. In dieser Arbeit wird eine virtuelle Verdoppelung der Meßgrößen vorgenommen. Jede Meßgröße wird sowohl als Eingangsgröße als auch als Ausgangsgröße des Systems verwendet. Der Eingangsvektor \mathbf{u} und der Ausgangsvektor \mathbf{y} ergeben sich zu:

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_m \\ \mathbf{v}_m \end{pmatrix} \quad (3.86)$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{q}}_m \\ \hat{\mathbf{v}}_m \end{pmatrix} \quad (3.87)$$

Die geschätzten Meßgrößen $\hat{\mathbf{q}}_m$ und $\hat{\mathbf{v}}_m$ werden direkt aus dem jeweils benachbarten physikalischen oder logischen Segment i ermittelt zu:

$$\hat{q}_m = q_i \quad (3.88)$$

$$\hat{v}_m = v_i \quad (3.89)$$

Diese beiden Gleichungen und die übrigen Verkehrsflußgleichungen bestimmen in Abhängigkeit von der Netztopologie das nicht lineare System und dienen der Berechnung der Schritte 1, 5 und 6 des Kalman Algorithmus.

3.5.4 Linearisierung

Die Linearisierung der Modellgleichungen zur Gewinnung der Systemmatrix \mathbf{A} erfolgt unter Anwendung der Kettenregel zur Differentiation zusammengesetzter Funktionen nach folgendem Schema:

1. Berechne die partiellen Ableitungen der Verkehrsgrößen der logischen Segmente nach den Verkehrsgrößen der betreffenden natürlichen Segmente am Knoten und den Abbiegeraten.

2. Berechne die partielle Ableitungen der statischen Geschwindigkeiten $V(k)$ des Fundamentaldiagramms nach den Dichten k und den freien Geschwindigkeiten V_f .
3. Berechne die partiellen Ableitung der Geschwindigkeit und Dichte eines Segments nach
 - (a) den Geschwindigkeiten und Dichten des selben Segments sowie der benachbarten natürlichen und logischen Segmente und
 - (b) der statischen Geschwindigkeit des Fundamentaldiagramms.
4. Bestimme die Systemmatrix \mathbf{A} durch Kombination der partiellen Ableitungen nach der Kettenregel (MEYBERG und VACHENAUER, 1990).

Die Gleichungen der Linearisierung des Verkehrsflußmodells mit den partiellen Ableitungen nach den Zuständen finden sich im Anhang im Abschnitt A.1. Die Systemmatrix \mathbf{A} des linearisierten Verkehrsmodells wird zur Berechnung der Schritte 2 und 4 des Kalmanalgorithmus benötigt.

Die Linearisierung der Meßgleichung findet sich im Anhang im Abschnitt A.2. Die Meßmatrix \mathbf{C} wird nur im Schritt 7 des Kalmanalgorithmus benötigt.

3.5.5 Bewertung

Versuchsaufbau

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Algorithmen und Gleichungen stellen eine allgemeine Basis für die Zustandsbeobachtung mit Verkehrsflußmodellen unter Nutzung der Korrektur durch einen Kalmanfilter dar. Sie erlaubt die modulare Wahl der verwendeten Modelle; auch die Meßstellenanordnung wird nicht fest vorgegeben. Dadurch kann aus den beschriebenen Ansätzen eine Vielzahl unterschiedlicher Implementierungen abgeleitet werden.

Die Qualität der Algorithmen wird an einer konkreten Implementierung unter Nutzung der Versuchsanordnung aus Bild 3.5 zur Validierung der Verkehrsflußmodelle gezeigt. Es werden ebenfalls die Verkehrsdaten vom 19.1.1998 5:00 Uhr verwendet. Der Zustandsbeobachter kann mit folgenden Eckdaten beschrieben werden:

- Es wird das CREMER/PAYNE-Modell eingesetzt. Dieses wird auch in der Netzsteuerung verwendet werden, da die Netzsteuerung extern mit dem erweiterten Modell validiert werden wird; auf diese Weise soll so weit wie möglich ausgeschlossen werden, daß die Verwendung ähnlicher Modelle im Steuerungsverfahren und der externen Simulation die Bewertung verfälscht.
- Den Rampen mit den Meßquerschnitten 1.2 und 2.2 wird jeweils eine eigene freie Geschwindigkeit zugewiesen.

- Das Knotenmodell wird berücksichtigt und eine Abbiegerate geschätzt.
- Es wird das Fundamentaldiagramm nach GREENSHIELDS (1935) verwendet.

Ergebnisse

Die Bilder 3.19 und 3.20 zeigen die Geschwindigkeits- und Verkehrsstärkeganglinien des Zustandsbeobachters und der Realdaten. Der Zustandsbeobachter zeigt eine gute

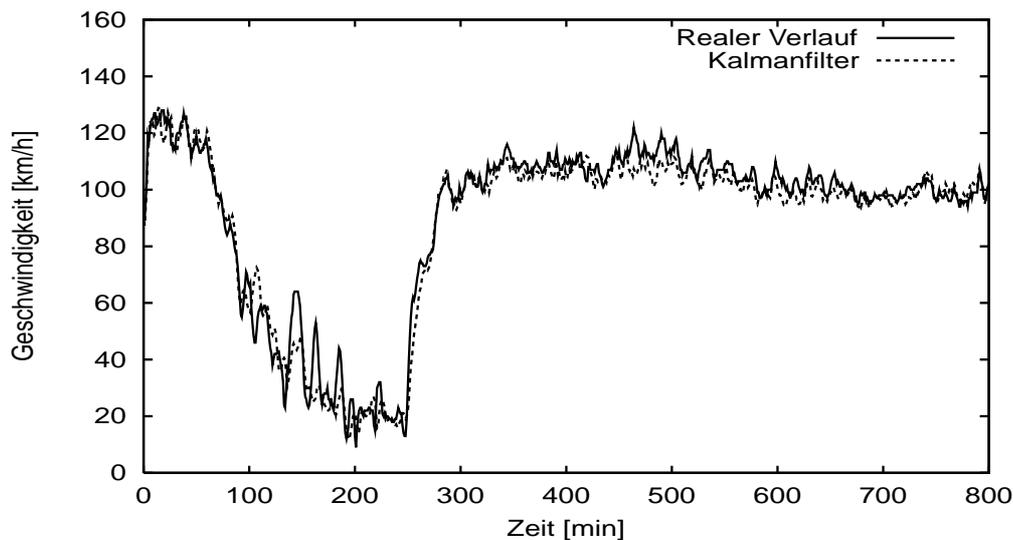


Abbildung 3.19: Vergleich der Geschwindigkeitsganglinien

Übereinstimmung mit den Realdaten. Der Verkehrszusammenbruch wird ohne Zeitverzögerung erkannt; im gebundenen Verkehr (Stau) werden die Stauwellen der Geschwindigkeit zeitgenau, wenn auch gedämpft, abgebildet. Lediglich einmal wird bei der Zeitmarke 115 *min* eine Reduktion der Geschwindigkeit geschätzt, obwohl tatsächlich ein Anstieg vorliegt. Tabelle 3.3 zeigt die Werte der in 3.3.7 definierten Gütekriterien

Modell	E_t	E_v	E_q
q_{Kalman}	-139	136000	369
v_{Kalman}	1.74	31.1	5.58

Tabelle 3.3: Kalmanfilter: Gütekriterien

des Zustandsbeobachters. Die bereits durch Interpretation der Kurvenverläufe deutlichen Verbesserungen finden auch in den Gütekriterien ihren Niederschlag. So verbessert sich zum Beispiel der quadratische Fehler der Geschwindigkeit $E_q(v)$ im Vergleich zum

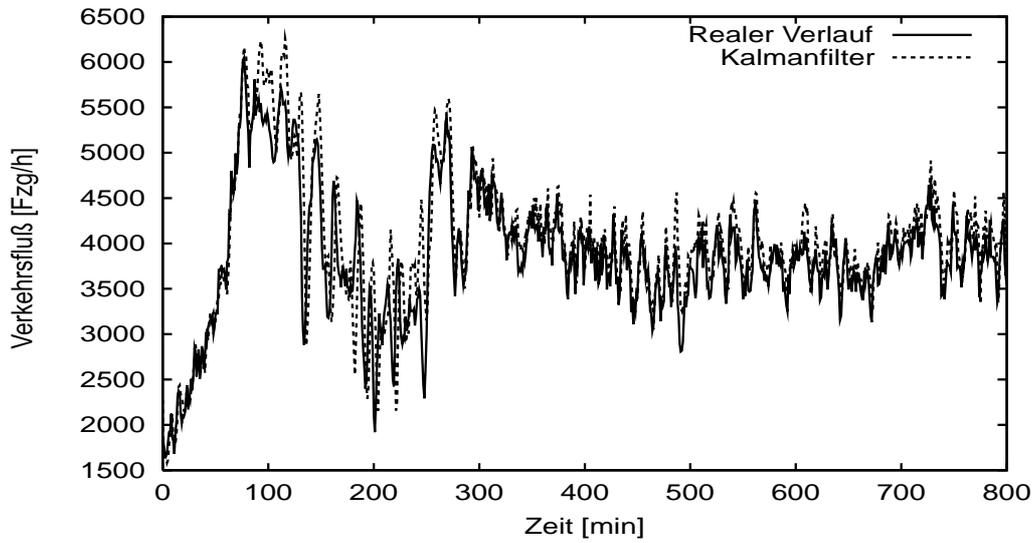


Abbildung 3.20: Vergleich der Verkehrsflußganglinien

ungefilterten erweiterten Modell um 50%. Die Zuverlässigkeit kann entsprechend der Güte mit $Z_{Kalman} = 0.95$ abgeschätzt werden. Bild 3.21 zeigt die Abbiegeraten in Haupt- und Nebenrichtung. Eine direkte Ermittlung der Abbiegeraten aus den Meß-

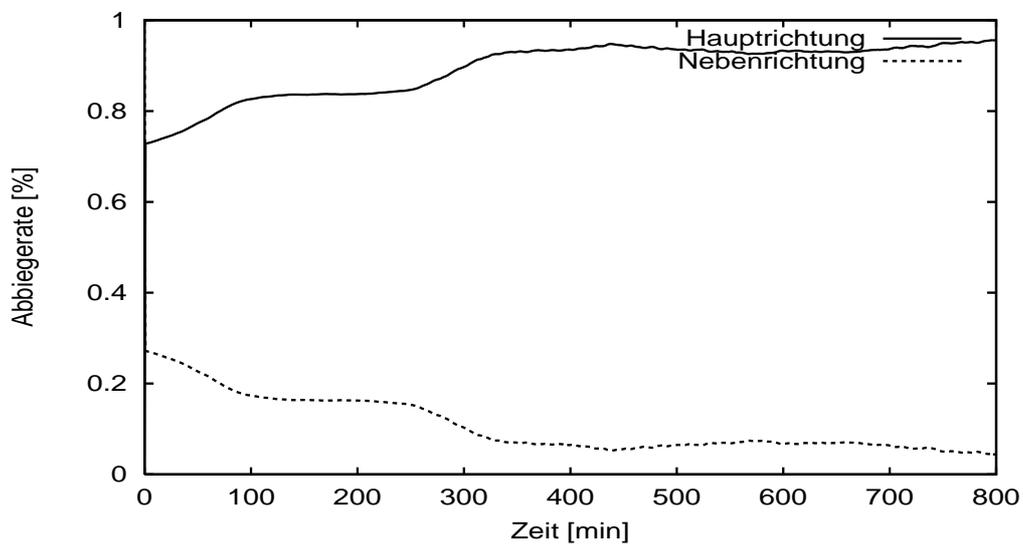


Abbildung 3.21: Abbiegeraten in Haupt- und Nebenrichtung

querschnitten berücksichtigt nicht die Reisezeiten auf den Kanten des Netzausschnittes; die exakten Abbiegeraten sind auch sonst nicht meßbar, so daß kein Vergleich durch-

geführt werden kann.

Zur Berücksichtigung von Meßstellenausfällen müssen automatisierte Routinen zur Rekonfiguration der Zustandsbeobachter erstellt werden. Diese können je nach investierten Aufwand nicht für jede Netztopologie und jedes Ausfallszenarium eine optimale Konfiguration gewährleisten. Der in Bild 3.5 gezeigte Netzausschnitt könnte im Normalfall mit zwei Beobachtern geschätzt werden. Nach Ausfall des Meßquerschnitts 3 müssen die beiden Beobachter zusammengefaßt werden. Anstelle der oben gezeigten

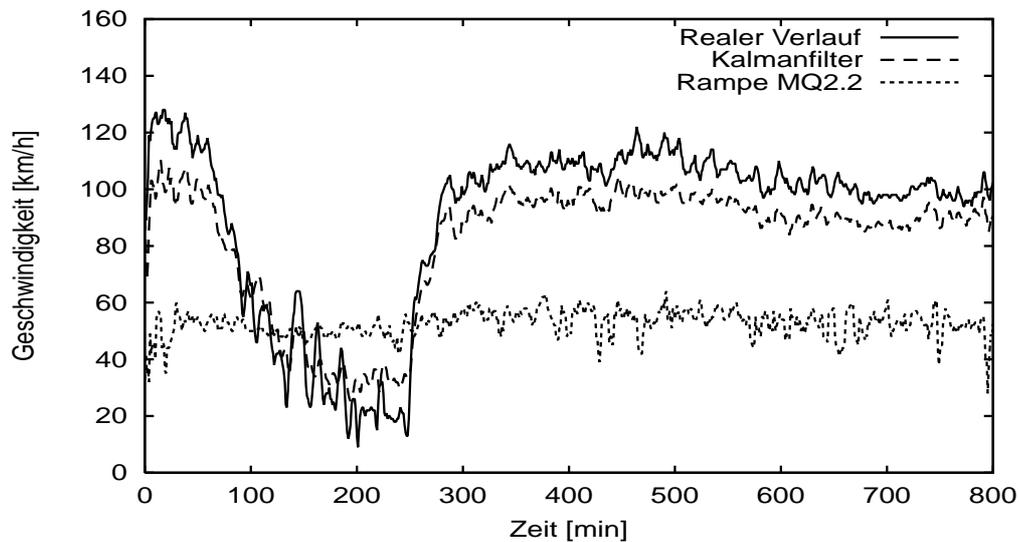


Abbildung 3.22: Geschwindigkeitsganglinien bei nicht optimaler Konfiguration

optimalen Konfiguration könnte die Konfigurationsroutine zum Beispiel nur eine freie Geschwindigkeit für den ganzen Netzausschnitt als zu schätzenden Parameter einstellen. Bild 3.22 zeigt die sich in diesem Fall ergebenden Geschwindigkeitsganglinien. Aufgrund des geringen Geschwindigkeitsniveaus auf den Rampen wird die freie Geschwindigkeit zu niedrig geschätzt. Infolgedessen wird die Geschwindigkeit im freien Verkehr zu niedrig geschätzt. Der für Steuerungseingriffe interessante Bereich des gebundenen Verkehrs (Stau) insbesondere dessen zeitlicher Anfang und zeitliches Ende werden gut geschätzt; dennoch muß eine nicht optimale Konfiguration der Beobachter bei der Bewertung der Netzsteuerung berücksichtigt werden, da die Zuverlässigkeit des Kalmanfilters abhängig von der Verwendung der Ergebnisse nun deutlich niedriger sein kann.

Im Abschnitt 3.6.3 werden weitere Ergebnisse des Zustandsbeobachters im Zusammenhang mit der Zustandsinitialisierung gezeigt.

3.6 Die Zustandsinitialisierung

3.6.1 Einleitung

Für die Zustände der Verkehrsflußmodelle (Geschwindigkeiten und Dichten auf den Segmenten) werden Anfangswerte benötigt. Es ergeben sich Vorteile, wenn die Anfangswerte geeignet gewählt werden:

- Simulationen zur externen Bewertung benötigen eine kürzere Vorlaufzeit; ohne geeignet gewählter Anfangswerte ergibt sich ein längerer Zeitraum bis das System eingeschwungen ist.
- Zustandsbeobachtungen konvergieren schneller und liefern damit früher gültige Werte.
- Kurzzeitprognosen sind ohne geeignete Initialisierung unbrauchbar, da der Anfangszustand einen entscheidenden Einfluß auf den Verlauf der Simulation besitzt (SACHSE, 1998).

Die Initialisierungsgüte G_I kann in den ersten beiden Fällen vereinfacht proportional zur Zeit T_E aufgefaßt werden, die vergeht bis die Simulation eingeschwungen ist beziehungsweise gültige Schätzgrößen ermittelt werden können:

$$G_I = 1 - a \cdot T_E \quad (3.90)$$

3.6.2 Ansatz

Externe Simulation

Entsprechend der in der Einleitung aufgeführten Anwendungsfälle werden mehrere Arten der Initialisierung verwendet. Externe Simulationen können durch einen in einem Simulationslauf vollständig gespeicherten Simulationszustand initialisiert werden. Dieser ist optimal bezüglich der Initialisierungsgüte, wenn die Simulation beim Speichern des Zustandes in einem konsistenten („eingeschwungenen“) Zustand war.

Zur Erhöhung der Flexibilität können unter Verringerung der Initialisierungsgüte die Verkehrsflußgrößen unabhängig von den Netzstromgrößen gespeichert werden. Die Netzstromgrößen werden dann verwendet, um die Verkehrsflußgrößen auf die Routen aufzuteilen. Es müssen zumindest kleine Inkonsistenzen in Kauf genommen werden, da die Verfahren zur Schätzung der Netzströme die Dynamik des Verkehrsflusses in der Art der verwendeten dynamischen Verkehrsflußmodelle in der Regel nicht berücksichtigen.

Zustandsbeobachtung

Die Initialisierung des Beobachters kann in die Initialisierung der Modellzustände und in die Initialisierung der Korrelationsmatrix $\mathbf{\Pi}$ als Zustand des Kalmanfilters unter-

schieden werden. Die Korrelationsmatrix wird als Einheitsmatrix initialisiert. Die Modellzustände werden unter Nutzung der Meßinformation vorbelegt. Dies geschieht nach folgendem Algorithmus:

- Ausgehend von jedem Meßquerschnitt werden in Fahrtrichtung alle Segmente mit den Daten des Meßquerschnittes vorbelegt. Die Dichte k wird dabei vereinfachend aus dem Verkehrsfluß q und der Geschwindigkeit v zu $k = q/v$ berechnet. Für Geschwindigkeiten kleiner 1km/h wird die Dichte zu $k = q/(1\text{ km/h})$ berechnet. Dieser vorwärtsgerichtete Teilalgorithmus bricht ab, sobald es mehrere Folgekanten gibt.
- Diese werden durch einen von den Meßquerschnitten rückwärtsgerichteten Teilalgorithmus initialisiert, der abgebrochen wird, sobald er auf ein bereits initialisiertes Segment trifft.
- An Verzweigungen werden neben den Größen Verkehrsfluß, Geschwindigkeit und Dichte auch die Abbiegeraten berechnet, wenn alle anderen ausgehenden Kanten beziehungsweise Segmente von je einem anderen Meßquerschnitt bereits initialisiert wurden.

Kurzzeitprognosen

Das Gütekriterium der Initialisierung muß für Kurzzeitprognosen erweitert werden, da zum einen dem Modell nur an den Netzgrenzen des Systemumgriffs Meßinformationen zur Verfügung gestellt werden, und zum anderen die Qualität der Kurzzeitprognose wesentlich von der Güte der quantitativen Abbildung des Anfangszustandes abhängt. In dieser Arbeit werden keine Kurzzeitprognosen benötigt; im Sinne der Vollständigkeit wird dieser Anwendungsfall der Initialisierung dennoch kurz behandelt.

Es wird daher vorgeschlagen, Kurzzeitprognosen aus den Daten eines Zustandsbeobachters zu initialisieren. Die Güte der Initialisierung setzt sich aus der Qualität G_B des Beobachters in der genauen Erfassung des Verkehrszustands und der oben schon benutzten Einschwingzeit T_E zusammen, die das Prognosemodell benötigt, um aus den Daten des Beobachters zu einem konsistenten „eingeschwungenen“ Zustand zu kommen:

$$G_I = 1 - a \cdot T_E + b \cdot G_B \quad (3.91)$$

Die Parameter a und b dienen zur Gewichtung.

3.6.3 Bewertung

Einleitung

Die Initialisierung besitzt allgemein ein hohes Potential. In der externen Bewertung muß ohne guter Initialisierung ein Zeitraum von der längsten Reisezeit im betrachteten

Netzumgriff simuliert werden, bevor der Simulationslauf zur Bewertung herangezogen werden darf. Das Potential besteht damit aus gesparter Rechen- und Arbeitszeit. Bei einem Netzumgriff von 80 km, einer maximalen Reisezeit von 20 min und 27 verschiedenen Routen kann bei einem Pentium II Prozessor mit 300 MHz Taktfrequenz pro Simulationslauf abhängig von den verwendeten Modellgleichungen bis zu 10 min Rechenzeit pro Simulationslauf gespart werden. Die Güte von Kurzzeitprognosen hängt entscheidend von der Güte der Initialisierung ab (SACHSE, 1998). Das Potential bei der Zustandsbeobachtung besteht aus einer unmittelbaren Einsatzbereitschaft des Systems; dies wird anhand von Rechenergebnissen gezeigt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden mit dem Zustandsbeobachter aus dem Abschnitt 3.5.5 durch-

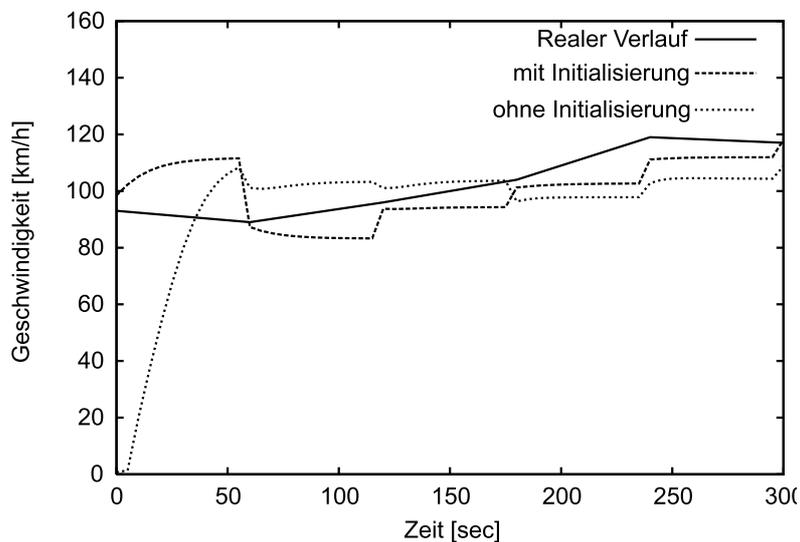


Abbildung 3.23: Geschwindigkeitsganglinien mit und ohne Zustandsinitialisierung

geführt, indem dieser einmal mit und einmal ohne Initialisierung betrieben wird. Es werden ebenfalls die Daten vom 19.1.1998 5:00 Uhr verwendet. Bild 3.23 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf mit und ohne Anwendung der oben beschriebenen Initialisierung. Die Geschwindigkeitsganglinien sind in der Simulationsschrittweite von $T = 5 \text{ sec}$ aufgelöst. Zwischen zwei Korrekturschritten ergeben sich zwölf Prognosezeitschritte, da die Meßwerte nur in 60 sec Intervallen vorliegen. Durch die Initialisierung kann bereits der Initialisierungszeitschritt genutzt werden; die effektive Einschwingzeit reduziert sich zu 0 sec. Das Gütekriterium G_I wird optimal. Ohne Initialisierung liegen erst ab dem ersten Korrekturschritt gültige Werte vor. Kann dadurch eine Umleitungsschaltung, die 2000 Fzg/h beeinflußt, erst eine Minute später aktiviert werden, so können 33 Fahrzeuge mit den entsprechenden Reisezeitnachteilen nicht umgeleitet werden.

3.7 Neuro/Fuzzy–Modellierung verkehrstechnischer Größen

3.7.1 Einleitung

Zur Verbesserung des Steuerungsverfahrens wird eine Schätzung der Wirkung der Netzsteuerung in Form von Abbiegeraten als Funktion der Schaltzustände als Steuerungsvariablen und anderer Kenngrößen wie der Tageszeit eingeführt. Für diesen Zweck bieten sich Ansätze aus der künstlichen Intelligenz an, insbesondere Fuzzyregler und neuronale Netze.

Die meistbenutzten neuronalen Netze sind Multilayer-Perceptrons mit der Backpropagation–Lernregel nach WERBOS (1974), die meist mit der Veröffentlichung von RUMELHART ET AL. (1986) zitiert wird. Dieses neuronale Netz ist in der Lage beliebige Funktionen anhand von Beispielen zu lernen (HECHT-NIELSEN, 1990). Es können allerdings keine Regeln angegeben werden, wieviele Neuronen beziehungsweise Verarbeitungseinheiten benötigt werden; zudem ist die interne Wissensrepräsentation nicht interpretierbar und die Stabilität des Lernverfahrens nicht garantiert. KOHONEN (1982) beschreibt ein selbstorganisierendes neuronales Netz, das den Eingangsraum klassifiziert. Darauf basierend wurden die Counterpropagation–Netze entwickelt (HECHT-NIELSEN, 1987). In diesen Netzen wird die Clusterung des Eingangsraumes getrennt vom eigentlichen Funktionswert gelernt; die Wissensrepräsentation dieser Netze ist daher besser interpretierbar.

MAMDANI (1976) etablierte auf der Basis der unscharfen Mengen (ZADEH, 1965) den bekannten Fuzzyregler mit unscharfen Prämissen und Konklusionen. SUGENO (1974) sowie TAKAGI und SUGENO (1985) beschreiben einen Fuzzyregler mit unscharfen Prämissen, aber scharfer Konklusion. Die interne Wissensrepräsentation der Fuzzyregler kann aufgrund der zugrundeliegenden Beschreibungsregeln sehr gut interpretiert werden. Andererseits können die Fuzzyregler ihr Wissen nicht lernen, sondern müssen es in Form der Regeln geliefert bekommen. KRUSE ET AL. (1995) stellen eine gute Einführung in die Fuzzy–Thematik dar.

Aufgrund der Vor- und Nachteile der neuronalen Netze und Fuzzysysteme gibt es Versuche diese zusammenzuführen. Obwohl derzeit auf diesem Gebiet viel geforscht wird (zum Beispiel BERENJI und KHEDAR (1992) sowie NAUCK (1994)) besteht nach BOTHE (1998) noch immer großer Forschungsbedarf. Aufgrund der schon veröffentlichten Ergebnisse scheinen diese Ansätze jedoch auch für die Verkehrstechnik von großem Nutzen zu sein, da sie Lernvorgänge erlauben, und die Wissensrepräsentation interpretierbar ist. Sich ergebende Probleme können an der Wissensrepräsentation untersucht werden.

3.7.2 Ansatz

Ideenskizze

Neuronale Netze und Fuzzyregler stellen Verallgemeinerungen von Schätzverfahren wie der Regressionsrechnung dar und können als universielle Approximatoren bezeichnet werden, die beliebige Funktionen $\hat{y}(\mathbf{x})$ schätzen können (NAUCK ET AL., 1994).

Unter Verwendung der Grundstruktur eines Sugeno-reglers (TAKAGI und SUGENO, 1985) stellen die Prämissen die Abtastung des Eingangsraums und die Konklusionen die Werte der daraus entstehenden Stützstellen dar. Ein solcher Approximator läßt sich über zwei unterschiedliche Stelleingriffstypen regeln. Über die Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen kann die Abtastung variiert werden, während über die Änderung der Konklusionen die Werte der Stützstellen variiert werden können.

Bei Auftreten eines Fehlers zwischen dem zu lernendem Wert und dem gelernten Wert, den man als Regelfehler auffassen kann, kann dieser nun prinzipiell über beide Stelleingriffsarten verringert werden, sowohl über die Änderung der Abtastung, als auch über die Werte der Stützstellen. Bild 3.24 zeigt eine Prinzipskizze des auf dem Fuzzyansatz beruhenden allgemeinen Approximator. Der Approximator wird mittels eines

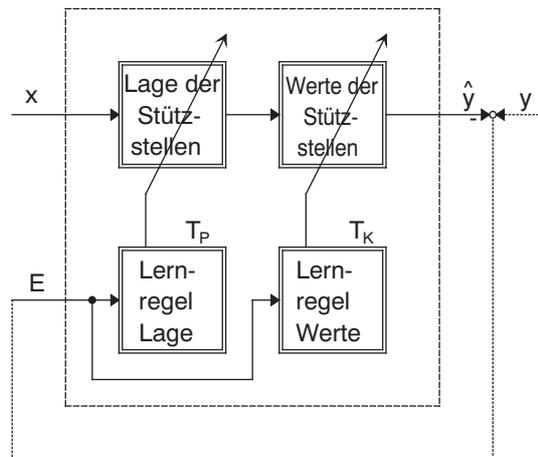


Abbildung 3.24: Ideenskizze des universellen Approximators

Lernsignals E und Lernregeln an die Funktion zwischen Ein- und Ausgang adaptiert. Die Lage der Stützstellen im Eingangsraum und die Werte der Stützstellen werden getrennt angepaßt. Es entsteht die Struktur einer Kaskadenregelung, wenn als Lernsignal der Schätzfehler verwendet wird. Abhängig vom Systemkontext, in dem der universelle Approximator verwendet wird, kann so die Stabilität des Lernvorgangs abhängig von den Zeitkonstanten T_P des Lernens der Prämissen und T_K der Konklusionen unter Nutzung eines linearisierten Modells abgeschätzt werden.

Schicht dient zur Fuzzyfizierung. Die Prämissen werden in der dritten Schicht berechnet. Der Erfülltheitsgrad einer Regel wird als Prämisse bezeichnet. Die Konklusion wird in der vierten Schicht und fünften Schicht berechnet. Unter Konklusion wird in dieser Arbeit der Ausgang des Approximators verstanden.

Sugenoregeln können in der Form (KRUSE ET AL., 1995)

$$R_r : \text{if } \xi_1 \text{ is } A_{i_1,r} \text{ and ... and } \xi_J \text{ is } A_{i_J,r} \text{ then } y = f_r(\xi_1, \dots, \xi_J) \quad , \text{ mit} \quad (3.94)$$

- R_r r -te Regel
- ξ_j j -ter unscharfer Eingangswert
- $A_{i_j,r}$ i -te Fuzzymenge der j -ten Eingangsmenge passend zur r -ten Regel
- y Ausgangswert (scharfer Wert der durch die Regel definierten Stützstelle)
- f_r Abbildung der Eingangsgrößen ξ auf die Ausgangsgröße y

dargestellt werden. Die Funktionen f_r sind meist linear. In dieser Arbeit wird f_r als konstant und unabhängig von den Eingangswerten x_i betrachtet:

$$f_r = \text{const} \quad (3.95)$$

Berechnung der Prämissen Die Berechnung einer Prämisse basiert auf der Berechnung der Zugehörigkeiten der J Eingangsgrößen der Regel. Zur Fuzzyfizierung der Eingangsgrößen werden unsymmetrische dreiecksförmige Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Diese sind durch ihre Mittelpunkte spezifiziert. Der Wert der Zugehörig-

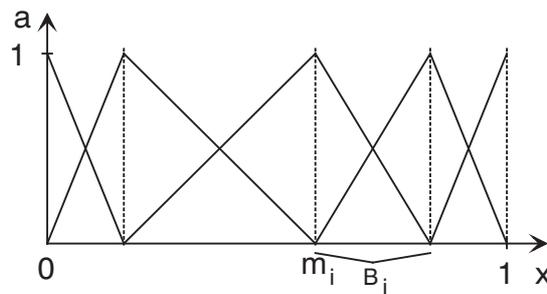


Abbildung 3.26: Fuzzypartitionierung der Eingangsgrößen

keitsfunktion der i -ten Fuzzymenge der Partitionierung einer scharfen Eingangsgröße x ergibt sich entsprechend Bild 3.26 aus der Gleichung:

$$a_i = \begin{cases} 1 - \frac{|m_i - x|}{m_i - m_{i-1}} & \text{für } |m_i - x| < m_i - m_{i-1} \wedge x < m_i \wedge i > 1 \\ 1 - \frac{|m_i - x|}{m_{i+1} - m_i} & \text{für } |m_i - x| < m_{i+1} - m_i \wedge x > m_i \wedge i < I \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad , \text{ mit} \quad (3.96)$$

- a : Erfüllungsgrad (Fuzzymaß, Zugehörigkeitswert)
- i : Index der Fuzzymenge
- m : Mittelpunkt
- x : Eingangswert

Jeder der Werte p , m und x ist auf Werte zwischen 0 und 1 normiert. Die Mittelpunkte m_1 und m_I besitzen immer die Werte

$$m_1 = 0 \quad \text{beziehungsweise} \quad (3.97)$$

$$m_I = 1 \quad . \quad (3.98)$$

Die Approximierung erfolgt bei Verwendung von Dreiecken stetig und abschnittsweise linear, mit nicht differenzierbaren Stellen an den Dreiecksmittelpunkten. Anstelle von Dreiecken können auch andere Zugehörigkeitsfunktionen wie zum Beispiel Gaußglocken verwendet werden, wenn für einen Anwendungsfall die stetige Differenzierbarkeit gefordert werden muß. Der Wert p einer Prämisse wird unter Nutzung einer t-Norm, wie zum Beispiel des bei Mamdanireglern sehr üblichen min Operator, aus den Erfüllungsgraden der beteiligten Fuzzymengen berechnet. In dieser Arbeit wird das Produkt als Spezialfall der Hamacher-Familie der t-Normen verwendet:

$$p = \prod_{n=1}^N a_n \quad , \quad \text{mit} \quad (3.99)$$

p Wert der Prämisse

Berechnung der Konklusion Das Gesamtergebnis wird aus der mit den Prämissen gewichteten Summe der einzelnen Regeln errechnet:

$$y_{appr} = \frac{\sum_{r=1}^R (p_r \cdot f_r)}{\sum_{r=1}^R (p_r)} \quad , \quad \text{mit} \quad (3.100)$$

- y_{appr} : Ausgang des Approximators
- R : Zahl der Regeln
- p_r : Prämisse der r-ten Regel
- f_r : Wert der r-ten Regel

Diese Rechenvorschrift liefert direkt den normierten scharfen Ausgangswert, der nicht mehr defuzzifiziert werden muß.

Der Lernvorgang

Interpretation als neuronales Netz Der Approximator läßt sich in Anlehnung an das NEFCON Modell (NAUCK, 1994) auch als fuzzyfiziertes dreilagiges Perzeptron interpretieren (siehe Bild 3.27). Die erste Schicht übernimmt die Normierung. Die zweite

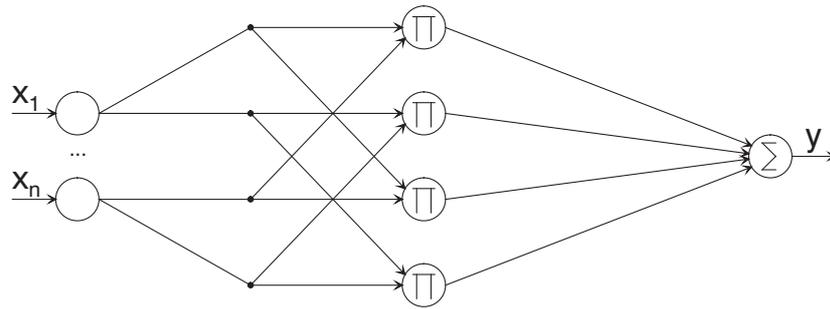


Abbildung 3.27: Approximator als dreilagiges Perzeptron

Schicht berechnet die Prämissen. Die Gewichte zwischen der ersten und der zweiten Schicht entsprechen den Zugehörigkeitsfunktionen und übernehmen somit die Fuzzyfizierung. Die dritte Schicht berechnet die Konklusion. Die Gewichte zwischen der zweiten und dritten Schicht entsprechen auch Zugehörigkeitsfunktionen; diese sind allerdings immer Singletons, deren (maximales) Zugehörigkeitsmaß dem Funktionswert f_r entspricht.

Lernen der Fuzzymengen Die Prämissen können durch das Lernen der Fuzzymengen beziehungsweise Verschieben der Mittelpunkte beeinflusst werden. Die Mittelpunkte können vorgelegt werden; bei geeigneter Vorgelegung kann auf das Lernen der Fuzzymengen verzichtet werden. Im Rahmen der Arbeit wurde zunächst eine Lernfunktion verwendet, die das Lernen nach jedem Wertepaar erlaubt und nicht an die Epochen gebunden ist:

$$m_i(n+1) = m_i(n) + (1 - |x_i(n) - m_i(n)|) \cdot \frac{(x_i(n) - m_i(n))}{|x_i(n) - m_i(n)|} \cdot E(n) \cdot lr_1, \quad i \neq 1 \wedge i \neq I, \quad \text{mit} \quad (3.101)$$

n Zeitschritt

E Fehler, Lernsignal

lr_1 Lernrate der Fuzzymengen

Aufgrund nicht vollständig zufriedenstellender Ergebnisse dieser Lernfunktion wurde die Idee geboren, zum Lernen der Fuzzymengen ein über die Fuzzypartitionierung der Eingangswerte verteiltes Potentialfeld zu verwenden, das die Richtung und die Stärke der Verschiebung der Mittelpunkte vorgibt. Im Rahmen einer Diplomarbeit (POPOVIĆ, 1998) wurde diese Idee verwendet, um eine neue Lernfunktion zu entwickeln. Das Potentialfeld wird ermittelt, indem für jeden Bereich B_i (siehe Bild 3.26) einer Eingangsgröße x mit

$$x \in B_i \Rightarrow m_i < x < m_{i+1} \wedge i \neq I \quad (3.102)$$

nach einer Epoche ein mittleres quadratisches Fehlermaß berechnet wird:

$$E_{vi} = \frac{\sum_{z=1}^Z E_z^2}{Z} \quad , \text{ mit} \quad (3.103)$$

E_{vi} Varianz der Fuzzymenge i
 Z Zahl der Lernbeispiele in der Epoche
 E Lernsignal

Das Lernsignal wird direkt aus dem Schätzfehler gewonnen:

$$E = y - y_{appr} \quad (3.104)$$

Die Verschiebung erfolgt nach der Formel:

$$m_i(n_{ep} + 1) = m_i(n_{ep}) + lr_1 \cdot (E_{vi}(n_{ep}) - E_{vi-1}(n_{ep})) \quad , \quad i \neq 0 \wedge i \neq I \quad , \text{ mit} \quad (3.105)$$

n_{ep} Epoche

Aus diesem Ansatz der Diplomarbeit wurde ein Verfahren unter Einbeziehung der Fuzzymengen abgeleitet, das aber nicht realisiert wurde. Die Formel 3.103 wird durch die Formel

$$E_{vi} = \frac{\sum_{z=1}^Z a_i E_z^2}{Z} \quad (3.106)$$

ersetzt, wobei sich das Varianzmaß nun nicht mehr auf den Bereich zwischen zwei Mittelpunkten, sondern auf eine Fuzzymenge bezieht, weshalb der Erfüllungsgrad a_i zusätzlich verwendet wird. Die Gleichung 3.105 wird durch die Formel

$$m_i(n_{ep} + 1) = m_i(n_{ep}) + lr_1 \cdot (E_{vi+1}(n_{ep}) - E_{vi-1}(n_{ep})) \quad , \quad i \neq 0 \wedge i \neq I \quad (3.107)$$

ersetzt.

Lernen der Fuzzyregeln Zur Adaptierung der Konklusion werden die Werte der Regeln geändert. Dies geschieht über eine „Deltaregel“, indem der Fehler linear zurückgeführt wird:

$$f_r(n + 1) = f_r(n) + E(n) \cdot \frac{lr_2 \cdot p_r}{\sum_{r=1}^R (p_r)} \quad , \text{ mit} \quad (3.108)$$

lr_2 Lernrate der Fuzzyregeln

Diese Formel berücksichtigt mit dem partiell linearem Anteil der Prämisse p_n , wie stark eine Regel an der Berechnung des Ausgangswertes beteiligt ist. Der Lernalgorithmus läßt sich als Integralregler mit proportionaler Strecke interpretieren, wenn weder die Eingänge des Approximators noch der als Sollwert für die Fehlerberechnung dienende

wahre Ausgangswert vom geschätzten Ausgangswert abhängen. Der Beweis für die Konvergenz des Lernverfahrens bei geeignetem gewähltem Verstärkungs- beziehungsweise Lernfaktor ist damit gegeben, wenn die Zeitkonstante des Lernens der Fuzzymengen entweder $T_P = 0$ oder wesentlich kleiner als die Zeitkonstante des Lernens der Regeln ist.

3.7.3 Schätzung der Abbiegerate

Die Schätzung der Abbiegerate wird im vorgeschlagenen Umleitungsregler zur Schätzung der Wirkung der Netzbeeinflussung verwendet. Der universelle Approximator wird für diese Aufgabe in das Gesamtsteuerungsverfahren eingebunden (siehe Bild 3.28). Der

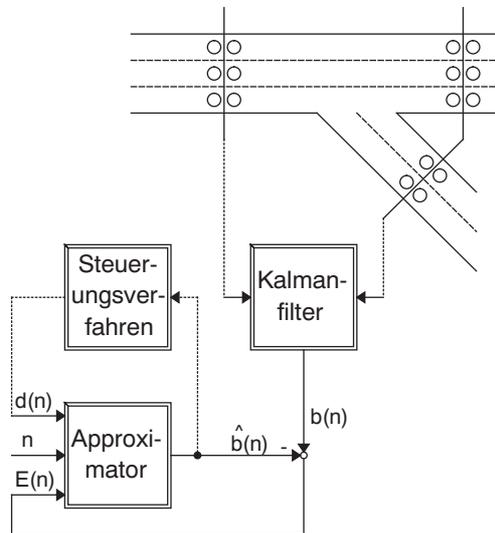


Abbildung 3.28: System zur Abbiegeratenschätzung

Approximator schätzt aus dem Schaltplan d_i und dem Zeitschritt n des betreffenden Tages die Abbiegerate $b(d_i, n)$. Diese wird mit der tatsächlichen Abbiegerate verglichen, so daß der Fehler zum Lernen verwendet werden kann. Die geschätzte Abbiegerate hat ihrerseits eine Auswirkung auf die gewählte Schaltung, so daß hier eine Rückkopplung vorliegt, die zu instabilem Lernen führen kann; dies muß im Steuerungsmodell berücksichtigt werden. Durch das Anlegen eines hypothetischen Schaltplans kann die Wirkung des Schaltplans vorhergesagt werden. Die Abbiegerate b wird aus der Kalmanfilterung des Verkehrsflußmodells gewonnen; dadurch beinhaltet das Signal wenig Rauschen, wodurch der Lernvorgang besser konvergiert.

Letztlich wird eine von der Schaltung abhängige Tagesganglinie der Abbiegerate geschätzt. Die vom Approximator wiedergegebene Ganglinie muß nicht der Tagesganglinie des betreffenden Tages entsprechen; dies kann durch Aufnahme weiterer Eingangsgrößen wie

dem Wochentag oder der Verwendung mehrerer Approximatoren im Steuerungsmodell, die geeignet ausgewählt werden, berücksichtigt werden. Dies wurde im Rahmen der Arbeit nicht implementiert.

3.7.4 Bewertung

Einleitung

Die Bewertung des Approximators erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wird der Approximator anhand dem Lernen zweier bekannter mathematischer Funktionen bewertet. In einem zweiten Schritt wird seine Tauglichkeit zur Schätzung von Abbiegeraten untersucht.

Ergebnisse des Lernverfahrens

Lernen der Fuzzymengen Bild 3.29 zeigt einen Vergleich des Lernens einer Rechteckfunktion mit und ohne Anpassung der Fuzzymengen. Der quadratische Fehler ohne

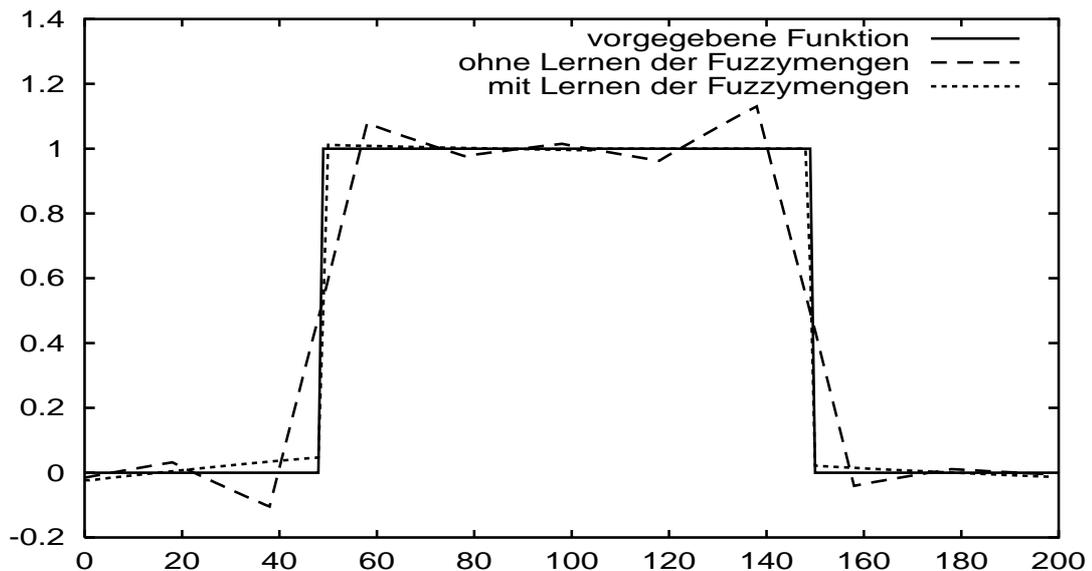


Abbildung 3.29: Lernen der Fuzzymengen am Beispiel einer Rechteckfunktion

Lernen der Fuzzymengen beträgt 0.1247, mit Lernen der Fuzzymengen 0.0489. Die Mittelpunkte der Fuzzymengen wurden bei beiden Lernarten äquidistant vorbelegt.

Lernen der Fuzzyregeln Bild 3.30 zeigt den gelernten Verlauf einer Parabel ohne Anpassung der Fuzzymengen. Die Parabel besitzt eine konstante Krümmung, so daß die äquidistante Verteilung der Mittelpunkte der Fuzzymengen optimal ist, und

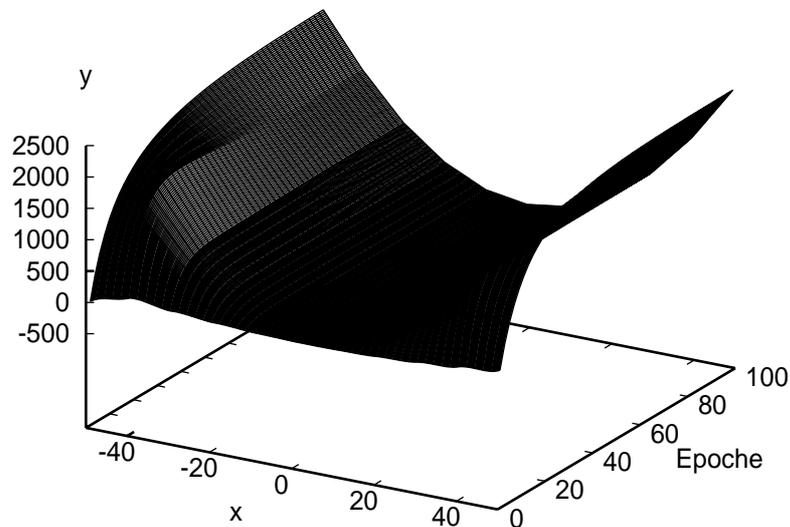


Abbildung 3.30: Lernen einer Parabel

das Lernen der Fuzzymengen nicht benötigt wird. Die Fuzzyregeln werden nach jedem Lernbeispiel adaptiert; daher ergibt sich schon während der ersten Epoche eine Anpassung. Daraus erklärt sich der Verlauf der Parabel in der ersten Epoche, obwohl alle Fuzzyregeln mit dem Wert 0 vorbelegt waren. Bild 3.31 zeigt den Verlauf des mittleren quadratischen Fehlers der Epochen während des Lernvorgangs. Das Lernverfahren konvergiert entsprechend der konstanten Lernrate exponentiell.

Schätzung von Abbiegeraten

Die Abbiegeratenschätzung wird mit einer Versuchsanordnung nach Bild 3.28 bewertet. An der Verzweigungsstelle können verschiedene Stelleingriffe vorgenommen werden. Im folgenden werden nur zwei Stelleingriffe unterschieden: „geschalten“ und „nicht geschalten“. Im Vordergrund steht die Funktionsprüfung der Abbiegeratenschätzung, weshalb auf eine eingehende verkehrstechnische Interpretation der Ergebnisse verzichtet wird.

Die Güte der Abbiegeratenschätzung ist stark abhängig von den Eingangsdaten. In SACHSE (1998) finden sich ausführliche empirische Untersuchungen zu den Wirkungen von Umleitungsempfehlungen. Demnach kann in Datenausschnitten ein Zusammenhang zwischen Umleitungsempfehlungen und Abbiegeraten gezeigt werden, in anderen aber nicht. Oft können Zusammenhänge gezeigt werden, deren Ursächlichkeiten aber auch bei detaillierter Betrachtung des verkehrlichen Kontextes unklar bleiben.

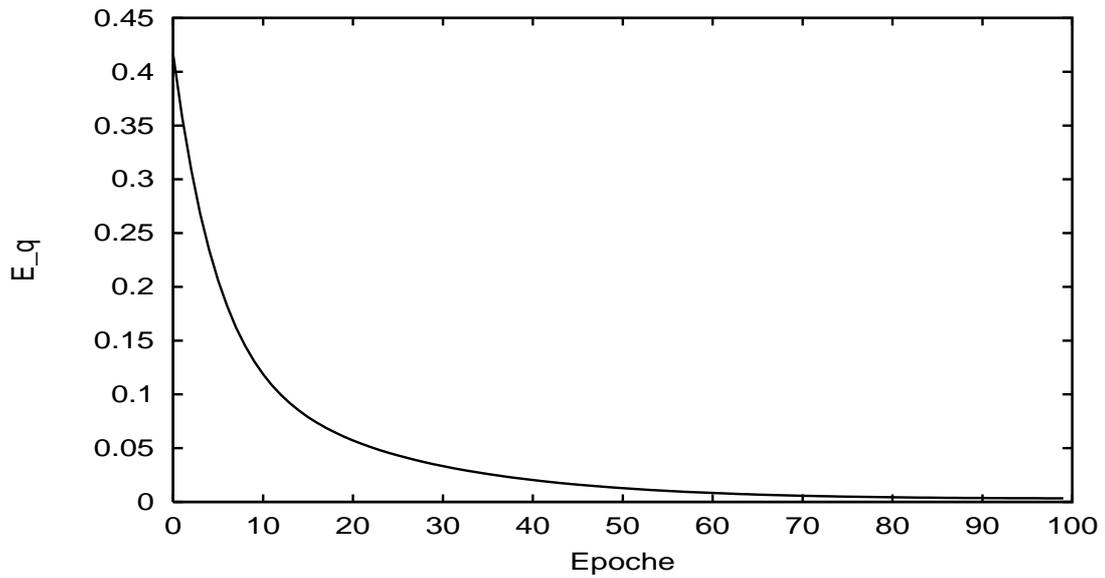


Abbildung 3.31: Verlauf der Standardabweichung

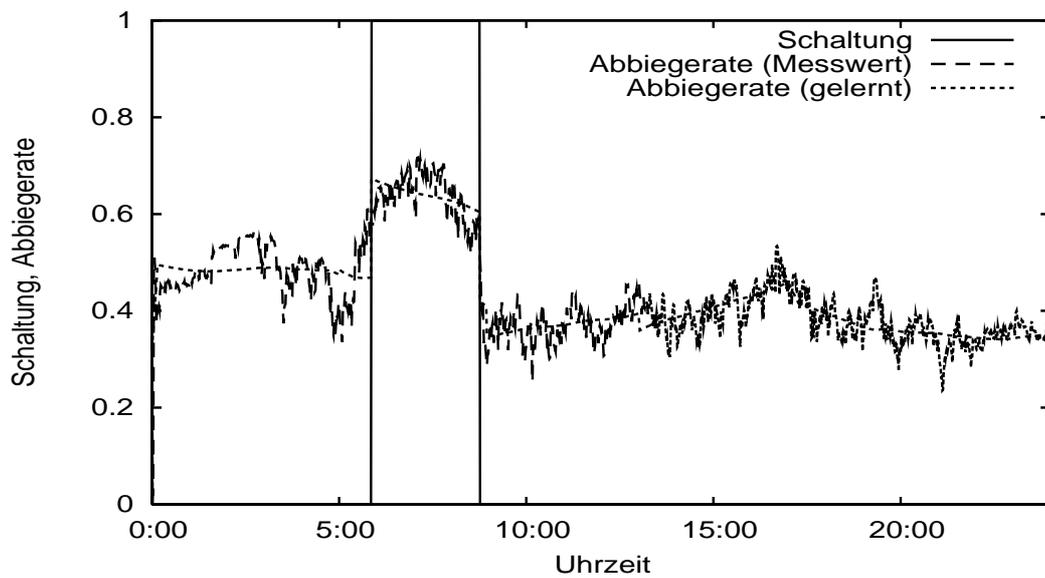


Abbildung 3.32: Beispiel zur Abbiegeratenschätzung

Bild 3.32 zeigt eine geschätzte und tatsächliche Ganglinie der Abbiegerate. Im Steuerungsmodell wird der Sprung der Wirkung als Folge der Schaltung benötigt. Im gezeigten Datensatz scheint zwar eine Wirkung in Form einer steigenden Abbiegerate

vorhanden zu sein, die aber nicht direkt der Schaltung zugeordnet werden kann. Eine quantitative Überprüfung der Güte der Abbiegeratenschätzung ist daher nicht möglich. Die vom Approximator ermittelte Wirkung einer absoluten Erhöhung der Abbiegerate um 20% erscheint plausibel und qualitativ gut zu sein.

3.7.5 Zusammenfassung

Der Approximator ist in der Lage, Abbiegeraten als Funktion der Schaltung qualitativ abzubilden und die Wirkung einer Schaltung im Voraus zu ermitteln, wenn tatsächlich ein Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und den Abbiegeraten als Ausgangsgröße besteht. Dies ist nicht immer gewährleistet und muß im Steuerungsmodell berücksichtigt werden.

Aufgrund der Ergebnisse kann der Approximator als erweitertes Ganglinienverfahren empfohlen werden und zum Beispiel in Rückfallebenen zur Schätzung von nicht durch Ersatzwerte rekonstruierbarer Verkehrsdaten an Meßquerschnitten verwendet werden.

Der Approximator selbst, besonders die Trennung des Lernens der Fuzzymengen und der Fuzzyregeln mit dem Konzept des fehlerbasierten „Lernpotentialfeldes“, stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, der weiteres Forschungspotential besitzt.

3.8 Zusammenfassung

Im zurückliegenden Kapitel wurden die Verkehrsmodelle eingeführt, die als *interne* Verkehrsmodellierung im Steuerungsverfahren verwendet werden. Hierbei wurde soweit wie möglich auf bekannte Ansätze zurückgegriffen, die um die besonderen Aspekte der Netzsteuerung erweitert wurden. Neben der Kalmanfilterung des Verkehrsmodells nach CREMER/PAYNE und dessen Erweiterung um die Schätzung von Abbiegeraten sowie die Trennung des Kantenmodells vom Knotenmodell wurde auch ein Neuro-Fuzzysystem entwickelt und implementiert. Neben der Anwendung des Neuro-Fuzzyapproximators auf die Abbiegeratenschätzung ist aus Sicht des Authors vor allem das getrennte Lernen der Stützstellenanordnung und der Stützstellenwerte hervorzuheben.

In dem Kapitel wurde zudem ein netzhaftes zweidimensionales makroskopisches Verkehrsflußmodell unter Erweiterung des CREMER/PAYNE-Modells vorgestellt, das für die *externe* Bewertung des Verfahrens verwendet wird. Nicht vorgestellt wurde die Schätzung der Kordonmatrix nach KELLER und PLOSS (1987), die in der Implementierung nach SCHMID und SACHSE (1995) in der externen Bewertung verwendet wird und in dieser Arbeit nicht erweitert wurde.

Kapitel 4

Die Steuerungsmodellierung des Steuerungsverfahrens

4.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Bestandteile des Steuerungsmodells beschrieben. Nach einer ausführlichen Beschreibung der Wirkungskette zwischen den einzelnen Bausteinen werden die dynamischen Sollwerte als zentraler Bestandteil beschrieben. Anschließend folgt eine Diskussion des Umleitungsalgorithmus und Umleitungsreglers, die die Entscheidungsalgorithmen beinhalten und die verkehrliche Zielsetzung des Nutzeroptimums umsetzen, indem sie auf die Verkehrsmodelle des Kapitel 3 zurückgreifen. Am Ende des Kapitels werden die Unterschiede zwischen dynamischen Sollwerten und modellgestützter Optimierung sowie die Möglichkeit deren Koppelung allgemein diskutiert, die am konkreten Beispiel des Umleitungsreglers zuvor schon entwickelt wurde.

4.2 Wirkungskette der Bestandteile

Die Bestandteile der Wirkungskette sind auf die Hauptmodule Umleitungsalgorithmus und Umleitungsregler verteilt, die jeweils einen Teil-Entscheidungsalgorithmus enthalten. Die beiden Module bilden das Steuerungsmodell. Die nachfolgend verwendeten Begriffe wurden bereits im Abschnitt 2.5.2 erläutert.

Ausgangspunkt ist die Definition der verkehrlichen Zielsetzung im Umleitungsalgorithmus als erweitertes Nutzeroptimum (siehe Gleichung 4.1). Darauf basierend werden vier Bewertungskriterien als Grundlage der Entscheidungskriterien definiert, die unterschiedliche Anforderungen an den Funktionsumfang der Verkehrsmodellierung besitzen:

- Die erste Funktion berechnet Staulängen ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsverhältnisse im Stau (siehe Gleichung 4.10).

- Die zweite Funktion berechnet normierte Staulängen mit Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsverhältnisse im Stau (siehe Gleichung 4.11).
- Die dritte Funktion berechnet Reisezeiten aus den Segmentreisezeiten (siehe Gleichung 4.19) .
- Die vierte Funktion berechnet Reisezeiten unter Berücksichtigung sich während der Fahrt ändernder Verkehrsverhältnisse (siehe Gleichung 4.21). Diese Funktion wurde im Steuerungsmodell selbst nicht implementiert, sie wird aber in der simulativen externen Bewertung verwendet.

Die Bewertungskriterien werden aus der im Abschnitt 3.5 beschriebenen Schätzung der Verkehrszustandsgrößen ermittelt. Je nach den Gegebenheiten der Realität bezüglich der Güte der Detektion und der Beobachtbarkeit des Verkehrsablaufs kann die geeignete Bewertungsfunktion so gewählt werden, daß die Gesamtgüte des Steuerungsverfahrens optimal wird.

Mit Hilfe der Bewertungskriterien werden zwei Entscheidungskriterien definiert, mit denen die verkehrliche Zielsetzung, also das erweiterte Nutzeroptimum, umgesetzt wird und die austauschbar sind:

- Ein Staulängenregler nutzt das einfache oder normierte Staulängenkriterium (siehe Gleichungen 4.12–4.18).
- Ein Reisezeitenregler nutzt die Reisezeitenkriterien (siehe Gleichungen 4.22–4.25).

Beide Regler verwenden jeweils einen von dem Bewertungskriterium abhängigen dynamischen Sollwert für die Staulänge (Gleichung 4.12) beziehungsweise die Reisezeit (Gleichung 4.22) auf der Hauptroute. Die Gleichungen des jeweiligen Reglers als Teil-Entscheidungsalgorithmus liefern unter Berücksichtigung von Störgrößen einen weiteren dynamischen Sollwert für die umzuleitende Fahrzeugmenge und die in die Hauptroute zufahrende Fahrzeugmenge.

Das Entscheidungsproblem der Umsetzung des erweiterten Nutzeroptimums wird damit auf zwei Teil-Entscheidungsalgorithmen aufgeteilt: Der erste ist der im Umleitungsalgorithmus berechnete Staulängen- oder Reisezeitenregler. Die dort verwendeten Bewertungskriterien beschreiben die sekundäre Wirkung der Netzsteuerung, die sich aus der primären Wirkung – nämlich der umgeleiteten Verkehrsmenge – ergibt. Der im Umleitungsalgorithmus berechnete dynamische Sollwert für die sekundäre Wirkung wird in den Entscheidungskriterien des Umleitungsreglers verwendet, die den zweiten Teil-Entscheidungsalgorithmus bilden.

Der Entscheidungsalgorithmus verwendet je nach Konfiguration gleichzeitig ein oder zwei Entscheidungskriterien, die beide die umzuleitende Fahrzeugmenge und die in die Hauptroute zufließende Verkehrsmenge als Bewertungskriterium verwenden. Die Entscheidungskriterien unterscheiden sich in der Entscheidungsvorschrift (siehe Bild 2.21):

Das erste Bewertungskriterium, das als Schaltplanauswahl bezeichnet wird, basiert auf einer modellgestützten Optimierung der Abweichung zwischen dem Sollwert und dem tatsächlichen Wert der Fahrzeugmenge, der aber selbst nicht verwendet wird. Für die Schaltplanauswahl werden mehrere Ansätze entwickelt, die unterschiedliches Modellwissen verwenden (siehe Abschnitt 4.5.3).

Das zweite Entscheidungskriterium, das Schaltplankorrektur genannt wird, verwendet den Ansatz der Sollwertregelung, indem die Abweichung zwischen dem dynamischen Sollwert und dem Istwert verwendet wird, um einen Anteil der Änderung der Steuerungsvariablen zu berechnen (siehe Gleichung 4.34).

Die Steuerungsvariable als Ergebnis des gesamten Entscheidungsalgorithmus ist der gewählte Schaltplan (siehe Abschnitt 4.5.2). Durch die Kombination der beiden Entscheidungskriterien Schaltplanauswahl mit ihren unterschiedlichen Ansätzen und der Schaltplankorrektur können Steuerungsverfahren entwickelt werden, die in ihrem Verhalten und ihren Ergebnissen sehr unterschiedlich sind (siehe Abschnitt 6.6). In der Arbeit werden vier verschiedene Kombinationen untersucht, bei denen der Entscheidungsalgorithmus auf grundsätzlich unterschiedliche Arten der Informationsgewinnung und –verwendung zurückgreift (siehe Abschnitt 4.5.5):

- Ein Zweipunktregler, der weder Daten der Verkehrsmodellierung noch Messungen benötigt.
- Ein Mehrpunktregler, dessen Wirkungsmodellierung auf der Verkehrsmodellierung basiert.
- Ein Mehrpunktregler, dessen Wirkungsmodellierung auf gemessenen Daten beruht.
- Ein Mehrpunktregler, dessen Wirkungsmodellierung auf der Verkehrsmodellierung und gemessenen Daten beruht.

Der Gesamt–Entscheidungsalgorithmus kann auch als Regler interpretiert und als solcher bezeichnet werden. Im Abschnitt 4.5.5 werden die Zusammenhänge zwischen dem Umleitungsalgorithmus und dem Umleitungsregler nochmals in Form von Signalflußplänen beschrieben.

4.3 Dynamische Sollwerte

4.3.1 Einleitung

Dieser Abschnitt soll die dynamischen Sollwerte aus regelungstechnischer Sicht vorstellen, um das Verständnis der folgenden Abschnitte zu erleichtern. In einem späteren Abschnitt, nach der Beschreibung des Steuerungsmodells, wird der dynamische

Sollwert als Optimierungsaufgabe interpretiert und der Zusammenhang zwischen der Verwendung von Regler und der Verwendung von Optimierung erläutert. Die Idee der Verwendung der dynamischen Sollwerte zur Erweiterung der allgemeinen Architektur eines Steuerungsverfahrens und die Anwendung in Netzsteuerungen wurde bereits im Abschnitt 2.8.2 vorgestellt.

4.3.2 Sollwerte und Regler

Regler entsprechend dem Bild 4.1 sind die Grundlage der traditionellen Regelungstechnik (SCHMIDT, G., 1987). Aus dem Vergleich des Sollwerts y_{soll} mit dem gemessenen

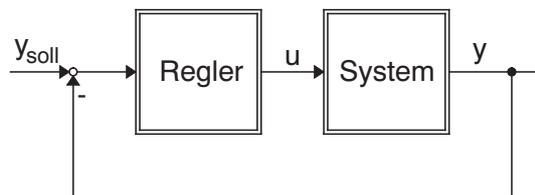


Abbildung 4.1: Regler

oder – allgemeiner – geschätzten Wert wird der Regelfehler berechnet. Dieser wird im Regler benutzt, um die Steuerungsvariable u so zu berechnen, daß sich die Meßgröße y dem Sollwert y_{soll} annähert.

In Erweiterung zum klassischen Ansatz kann der Regler auch direkt den Sollwert anstelle des Regelfehlers verwenden. Bei Verwendung von statischen Sollwerten besteht der Informationsinhalt des Regelfehlers im Prinzip nur aus der Meßgröße. Bei Verwendung von dynamischen Sollwerten können so die Informationsgehalte des dynamischen Sollwerts und der Meßgröße getrennt berücksichtigt werden. Es entsteht eine Steuerung, die nur auf Modelle zurückgreifen kann, wenn der Istwert beziehungsweise die Meßgröße nicht verwendet wird.

4.3.3 Dynamische Sollwerte

Der bisher statische Sollwert y_{soll} wird als dynamischer Sollwert $y_{soll}(n)$ betrachtet. Dynamische Sollwerte können verwendet werden, um sich ändernde Nutzeranforderungen (POSCHINGER, 1994) oder ein sich änderndes Systemverhalten (HOCHSTÄDTER und CREMER, 1997) zu berücksichtigen, oder wie in dieser Arbeit die vermehrte Nutzung von Realdaten zu ermöglichen und die Existenz eines einzigen Optimums zu gewährleisten. Die vermehrte Nutzung von Realdaten erlaubt den Verzicht auf Modelle mit deren Unsicherheiten, wie zum Beispiel eine Akzeptanzratenschätzung. Die Interpretation der dynamischen Sollwerte als Optimierungsaufgabe wird im Abschnitt 4.6 beschrieben.

In den modellbasierten und nicht realdatenbasierten Ansätzen des Umleitungsreglers

wird der dynamische Sollwert im Umleitungsregler auch ohne Meßwerte verwendet. Regelungstechnisch ist damit kein Regler gegeben, sondern eine Steuerung. Sich ändernde Störgrößen werden durch einen dynamischen Sollwert berücksichtigt, so daß der dynamische Sollwert auch in einer Steuerung genutzt werden kann. Damit schließt der Ansatz der dynamischen Sollwerte die Möglichkeit ein, auch die bisherigen rein modellbasierten Ansätze innerhalb der Architektur zu implementieren.

4.4 Der Umleitungsalgorithmus

4.4.1 Ansatz

Es wird von einem einfachen Alternativroutenpaar mit einem Entscheidungspunkt gemäß Bild 2.16 ausgegangen. Auf Autobahnnetzen können mehrere Alternativroutenpaare definiert werden, so daß das Verfahren auch auf Netze mit mehreren Entscheidungspunkten angewendet werden kann. Ausgehend vom aktuellen Verkehrszustand berechnet der Umleitungsalgorithmus einen Sollwert für den in die Hauptroute fließenden Verkehrsfluß. Hierzu werden Bereiche von Betriebszuständen definiert, in denen der Sollwert nach unterschiedlichen Regeln berechnet wird. Betriebszustände werden durch Meßdaten und den Verkehrszustand gekennzeichnet. Die Betriebszustände könnten auch als Szenarien und die Regeln als Strategien bezeichnet werden. Vor der Definition der Betriebszustände werden die in einem Netz auftretenden Störungen als Basis für die Anwendbarkeit der Netzsteuerung klassifiziert. Zur Entwicklung der Regeln, die zu den dynamischen Sollwerten führen, werden einfache plausible Modellvorstellungen des geregelten Systems herangezogen, anhand derer sich so weit benötigt auch Stabilitätsabschätzungen durchführen lassen.

4.4.2 Zielsetzung

Bezüglich des anzustrebenden Optimums wird davon ausgegangen, daß das Nutzeroptimum nicht wesentlich verletzt werden darf. Andernfalls würde die Akzeptanz der Schaltempfehlungen sinken, was zu einer Verringerung der Wirkungen einer Schaltung führt (siehe Abschnitt 2.5.2). Es wird daher davon ausgegangen, daß das Nutzeroptimum gleichzeitig das Systemoptimum im Sinne des Betreibers ist. Als Kriterium für das Nutzeroptimum wird im folgenden immer die individuelle Reisezeit verwendet, sofern dies nicht explizit gekennzeichnet ist. Die individuelle Reisezeit wird auch zur Validierung von Ansätzen benutzt, die auf einem der beiden Staulängenkriterien basieren.

Das erweiterte Nutzeroptimum für ein einfaches Alternativpaar wird bestimmt zu:

$$tr_1(n) = tr_2(n) + tr_B \quad , \text{ mit} \quad (4.1)$$

n	Zeitschritt
tr_1	Reisezeit auf der Hauptroute
tr_2	Reisezeit auf der Alternativroute
tr_B	Differenzreisezeit

Die Differenzreisezeit tr_B , um die die Alternativroute schneller befahren werden kann, dient zum einen zur Berücksichtigung von Modellfehlern, so daß das Nutzeroptimum $tr_1(n) = tr_2(n)$ immer erfüllt ist, und zum anderen zur Erhöhung der Akzeptanzrate. Die Differenzreisezeit kann als Parameter gewählt werden.

4.4.3 Klassifizierung von Störungen

Ansatz

Stauursachen können im wesentlichen in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- Nicht wiederkehrende (non-recurrent) Ursachen mit größerem Potential aber seltenerem Auftreten sind zum Beispiel Unfälle und Baustellen. Das größere Potential ergibt sich, wenn auf einer Alternativroute noch freie Kapazitäten vorhanden sind.
- Wiederkehrende (recurrent) Ursachen mit geringerem Potential aber öfterem Auftreten sind gewöhnliche Überlastungstaus, bei denen auch die Alternativrouten meist stark ausgelastet sind. Das Potential dieser Ursachen ergibt sich aufgrund der Häufigkeit ihres Auftretens und eventuell nutzbaren Restkapazitäten auf den Alternativrouten.

Sowohl der Ort der Stauursache als auch der primäre Ort der Wirkungen können ebenfalls in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- Ursache oder Wirkung innerhalb (intern) der beiden Alternativrouten
- Ursache oder Wirkung außerhalb (extern) der beiden Alternativrouten

Daraus lassen sich vier Fälle ableiten, die in Tabelle 4.1 zusammengefaßt sind. Bild 4.2

Fall	Ursache	Wirkung	Bild
1	intern	intern	4.3
2	intern	extern	4.3
3	extern	intern	4.4
4	extern	extern	4.4

Tabelle 4.1: Fallunterscheidung

zeigt ein einfaches Beispielnetz mit der Legende für die folgenden Bilder, die die vier Fälle verdeutlichen.

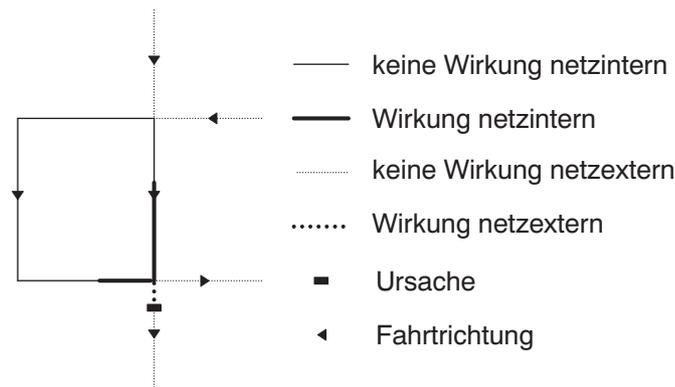


Abbildung 4.2: Ortstypen von Stauursache und Wirkung (Legende)

Fall 1: Ursache intern, Wirkung intern

Dieser Fall (Bild 4.3) eignet sich für die Netzsteuerung nahezu uneingeschränkt. Fahr-

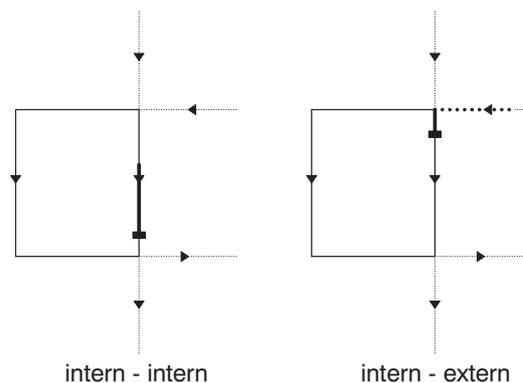


Abbildung 4.3: Interne Stauursache

zeuge, die auf eine Alternativroute umgeleitet werden, können ungehindert in das externe Netz außerhalb der Alternativrouten einfahren. Bei der Ermittlung einer Umleitungsempfehlung muß lediglich das Nutzeroptimum und die Kapazität der Alternativroute, insbesondere auch der benötigten Rampen, berücksichtigt werden. Von der Umleitungsempfehlung bewirkte Änderungen der Verkehrsbeziehungen können die auf der Alternativroute benötigten Kapazitäten reduzieren.

Fall2: Ursache intern, Wirkung extern

Dieser Fall (Bild 4.3) eignet sich bedingt zur Netzsteuerung. Fahrzeuge können die Stauursache auch in diesem Fall ungehindert umfahren. Allerdings ist am eigentlichen Entscheidungspunkt das Nutzeroptimum unter Umständen nicht mehr erfüllt, weil die

Fahrzeuge bis dahin schon durch einen Teil des entstandenen Staus fahren mußten. Unter dem Gesichtspunkt, daß am Stauanfang das Nutzeroptimum erfüllt ist, kann man eine Umleitungsempfehlung rechtfertigen; allerdings werden stärker nutzerorientierte Verkehrsteilnehmer dadurch bevorzugt. Das Nutzeroptimum kann allerdings durch bauliche Maßnahmen erzwungen werden, indem der Entscheidungsort beziehungsweise die Spuraufspaltung genügend weit vor ein Autobahnkreuz gelegt wird, so daß die auf diesen so verlängerten Rampen entstehenden Staus genügend lang werden können, um das Nutzeroptimum sicherzustellen. Die externe Wirkung wird so zu einer internen. Der Aufwand für eine solche bauliche Maßnahme dürfte in den meisten Fällen geringer sein als die Erweiterung der Kapazität der Hauptroute, um die Ursache zu beseitigen. Die Überlegungen zur Ermittlung von Umleitungsempfehlungen aus Fall 1 gelten analog.

Fall 3: Ursache extern, Wirkung intern

Dieser Fall (Bild 4.4) kann sich bedingt zur Netzsteuerung eignen; dies ist abhängig von der Topologie des Straßennetzes im und außerhalb des Systemumgriffs. Die Stauursa-

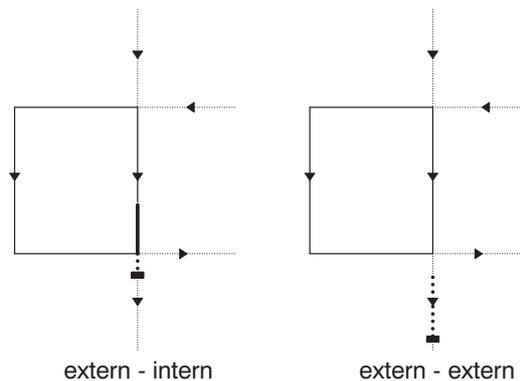


Abbildung 4.4: Externe Stauursache

che kann in diesem Fall nicht mehr ungehindert umfahren werden. Fahrzeugströme, die auf die Alternativroute umgeleitet werden, stauen sich am Zusammenfluß von Haupt- und Alternativroute; dies gilt, wenn das Netz geschlossen ist, und sich die Verkehrsbeziehungen im Netz im Falle einer Umleitung nicht ändern.

In offenen Netzen, deren Haupt- und Alternativrouten nicht mehr zusammenlaufen, sondern zum Beispiel an zwei Seiten eines Ballungsraumes enden, können die Fahrzeuge die Ursache umfahren; in diesem Fall gelten die Überlegungen aus Fall 2. In geschlossenen Netzen können sich aufgrund der Ortskenntnisse der Fahrer die Verkehrsbeziehungen ändern, wenn eine Umleitung geschaltet ist. Grundlage dafür ist ein nicht zum Netzumgriff gehörendes Sekundärstraßennetz, das freie Kapazitäten besitzt. Ein Teil des umgeleiteten Stromes kann so die Stauursache umfahren; dieses Potential führt allerdings in der Regel zu erhöhten Belastungen des untergeordneten Straßennetzes, was

unter Umständen, zum Beispiel wegen des Anwohnerschutzes, nicht wünschenswert ist.

Ein weiteres Ziel für den Einsatz der Netzsteuerung im Fall der externen Ursache und internen Wirkung könnte sein, daß die Staulängen auf der Hauptroute zu Lasten von Staus auf der Alternativroute reduziert werden. Vorteile daraus können sich ergeben, wenn dadurch stark frequentierte Anschlußstellen staufrei bleiben, so daß Verkehrsbeziehungen, die den Ort der Ursache nicht befahren, so weit wie möglich von den Wirkungen verschont bleiben, um auf diese Weise unter den gegebenen Randbedingungen ein Systemoptimum bezüglich der Gesamtreisezeiten zu erreichen. Insbesondere in kleinmaschigen Netzen kann dieser Effekt nicht vernachlässigt werden, da ein Überstauen der Hauptroute über den Entscheidungspunkt hinaus nicht nur alle Verkehrsströme, die die Hauptroute betreffen, sondern auch alle Verkehrsströme der Alternativroute beeinträchtigen kann. Bei der Ermittlung der Umleitungsempfehlung sollte das Nutzeroptimum berücksichtigt werden.

Fall 4: externe Ursache, externe Wirkung

Dieser Fall (Bild 4.4) eignet sich kaum zur Netzsteuerung. Im trivialen Fall, daß die Ursache und die Wirkungen vor dem Entscheidungspunkt liegen, kann die Netzsteuerung nicht nützen. Falls die Ursache und die Wirkungen nach dem Alternativroutennetz auftreten, könnte eine Netzsteuerung unter Umständen von Nutzen sein. Dies führt letztlich zu den Überlegungen für den Fall 3, unter der Bedingung, daß entweder ein offenes Netz vorliegt oder sich die Verkehrsbeziehungen ändern. Bei der Ermittlung der Umleitungsempfehlung ist problematisch, daß das Nutzeroptimum beim Vergleich Hauptroute - Alternativroute nicht gegeben ist, weshalb es sinnvoll ist, diesen Fall durch zusätzliche Alternativroutenpaare zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich ein Fall aus 1 bis 3.

Konsequenz für den Umleitungsalgorithmus

Die Fälle 1-3 werden im Algorithmus berücksichtigt, indem das Nutzeroptimum angestrebt wird; eine Schaltung ist in allen drei Fällen nur dann zu erwarten, wenn die Reisezeit über die Alternativroute kürzer ist als über die Hauptroute. Der Fall 4 wird als untauglich für eine dynamische Netzsteuerung erachtet; durch eine Änderung des Netzumgriffes sollte dieser in einen der drei übrigen Fälle überführt werden.

4.4.4 Betriebszustände

Bild 4.5 zeigt die Ebene der Betriebszustände für eine Hauptroute 1 mit drei Fahrstreifen und eine Alternativroute 2 mit zwei Fahrstreifen. Die Betriebszustände werden im Bild anhand der Verkehrsnachfrage klassifiziert. Zusätzlich dient das Vorhandensein einer Stauung als Kriterium. Es gibt vier verschiedene Betriebsbereiche:

- Bereich 1: es werden keine Fahrzeuge umgeleitet. Dieser Bereich wird verwendet, wenn auf beiden Routen kein Stau existiert und die Nachfrage für beide Routen kleiner ist als ihre aktuelle Kapazität bezogen auf den Routenanfang oder wenn zwar ein Stau auf einer Route besteht, aber die andere Route wesentlich länger ist, und das Nutzeroptimum daher nicht erfüllt ist.
- Bereich 2: es wird eine bestimmte Fahrzeugmenge von Route 1 auf Route 2 umgeleitet. Dieser Bereich ist gültig, wenn beide Routen in etwa die selbe Länge haben, kein Stau auf einer der beiden Routen existiert, und die Kapazität der Route 1 überschritten wird, aber nicht die Gesamtkapazität des Routenpaares; in diesem Fall ist das Ziel des Algorithmus, die Überlastung der Routen zu vermeiden.
- Bereich 3: analog zu Bereich 2 wird eine bestimmte Fahrzeugmenge von Route 2 auf Route 1 umgeleitet.
- Bereich 4: es wird ein spezieller Stauausgleichsalgorithmus verwendet. Dieser Bereich ist gültig, falls auf der Strecke einer der beiden Routen Stau auftritt, und das Nutzeroptimum erfüllt ist.

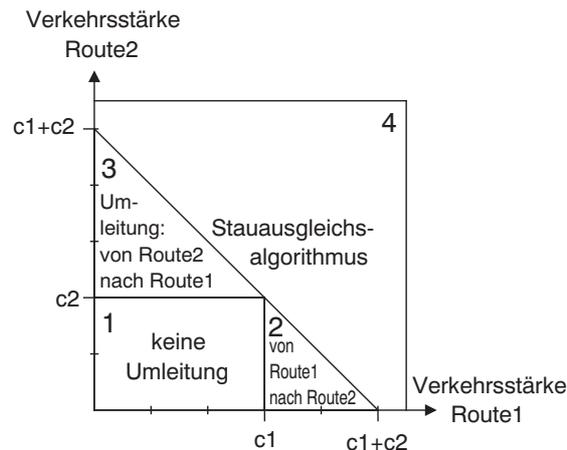


Abbildung 4.5: Betriebszustände der Netzsteuerung

Die Betriebsbereiche sind nicht mit Schaltplänen gleichzusetzen. Es wird zunächst die Nutzung des Bereiches 2 angestrebt, also das Umleiten von der Route mit der größeren Kapazität (Route 1) auf die Route mit der geringeren (Route 2), ohne daß Stau entsteht, soweit dies vom Nutzeroptimum zugelassen wird. Dabei zeigt sich, daß gerade dieser Betriebsbereich im Bild abhängig von der Netztopologie den kleinsten Raum einnimmt und dementsprechend selten vorkommen wird. Bei Routenpaaren mit einer nicht zu vernachlässigenden Längendifferenz kann auf die längere Route ohnehin nur dann umgeleitet werden, wenn auf der kürzeren Route bereits ein Stau existiert. Ansonsten ist das Nutzeroptimum nicht erfüllt. Das Umleiten von Fahrzeugströmen auf

die kürzere Route mit der höheren Kapazität ist nur in Ausnahmefällen sinnvoll und technisch durch die Anlagenrealisierung deshalb meist ausgeschlossen. Unter solchen Randbedingungen entfallen die Bereiche 2 und 3 zur Überlastungsvermeidung völlig. Dementsprechend wird in dieser Arbeit der Schwerpunkt der Beschreibungen auf den Bereich 4 gelegt.

4.4.5 Überlastungsvermeidung

In den Bereichen 2 und 3 wird versucht, eine Überlastung der Routen zu vermeiden. Dies wird erreicht, indem der Eingangstrom in die Routen auf die auf den Routenanfang bezogene Kapazität begrenzt wird; bei der auf den Routenanfang bezogenen Kapazität wird berücksichtigt, daß ein Teil der Gesamtkapazität von den auf der Route liegenden Einfahrten benötigt wird, und ein Sicherheitsabstand eingehalten werden muß.

Der Algorithmus verwendet nur Eingangsverkehrsstärken der Routen, so daß zunächst kein geschlossener Regelkreis vorliegt. Es ist daher nicht notwendig, die Stabilität für diese Arbeitsbereiche des Umleitungsalgorithmusses zu prüfen. Mit einer in dieser Arbeit nicht detaillierten Störgrößenaufschaltung könnte der aufgrund von Zu- und Abflüssen wirksame Auslastungsgrad der Strecke berücksichtigt werden. Der Sollwert für den umzuleitenden Verkehrsfluß errechnet sich zu:

$$qs_i(n) = \begin{cases} d_i(n) & \text{Bereich 1, } i = 1, 2 \\ c_i(n) & \text{Bereich 2(3), } i = 1(2) \\ d_i(n) + d_j(n) - c_j(n) & \text{Bereich 2(3), } i = 2(1) \end{cases} \quad (4.2)$$

- n Zeitschritt
- i, j Routenindex
- d_i Nachfrage für Route i
- c_i Kapazität der Route i
- qs_i umzuleitender Verkehrsmenge

In dieser Formel ist auch der Fall berücksichtigt, daß mangels Nachfrage nicht umgeleitet werden muß. Kurzfristige Schwankungen der Nachfrage an den Einfahrten könnten zum Beispiel durch Zuflußdosierung ausgeglichen werden. Sobald aufgrund einer zu hohen Nachfrage oder einer falsch geschätzten Kapazität Stau auf einer Route entsteht, ist der Bereich 4 gültig. Dieser Bereich übernimmt zusammen mit dem Bereich 1 den größten Teil aller Betriebspunkte der Steuerung.

4.4.6 Stauausgleichsalgorithmus

Ansatz

Im Bereich 4 wird der dynamische Sollwert $qs_i(n)$ für den umzuleitenden Verkehrsfluß aus der aktuellen Verkehrssituation im Netz ermittelt. Es werden zwei Ansätze mit

teilweise unterschiedlichen verkehrlichen Zielen verfolgt. Der erste basiert auf einer Betrachtung der Staulängen. Es werden zwei unterschiedliche Funktionen zur Berechnung des Bewertungskriteriums *Staulänge* mit unterschiedlichen qualitativen Anforderungen an die Verkehrsmodellierung verwendet. Ein weiterer Ansatz basiert auf der Berechnung des Kriteriums *Reisezeit*. Es werden zwei Funktionen mit unterschiedlichen Anforderungen an den Funktionsumfang der Verkehrsmodellierung angegeben. Im Rahmen des Steuerungsmodells wurde nur die erste der beiden Funktionen implementiert.

Staulängen

Motivation Dieser Ansatz basiert auf einigen einfachen Überlegungen:

- Staus sind für sich selbst ein Ärgernis für die Verkehrsteilnehmer und auch die Anwohner.
- In einer Verkehrssituation mit Stauungen leisten diese einen überproportionalen Anteil zur Reisezeit; dies kann an einem Warteschlangenmodell mit einem Engpaß, bei dem die Wartezeit nur von der Zahl der gestauten Fahrzeuge und dem Abfluß aus der Warteschlange abhängt, leicht gezeigt werden.
- Staus, insbesondere Überlastungsstaus, zeigen ein sehr langsames dynamisches Verhalten, das heißt, sie entstehen vergleichsweise langsam und lösen sich auch nur vergleichsweise langsam wieder auf (ENGELS, 1998). Deshalb genügt es unter Umständen in einer Steuerungsstrategie nur den derzeitigen Stauzustand und gegebenenfalls noch den Trend zu berücksichtigen. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der Arbeit bestätigt.

Aufbauend auf einer einfachen Modellvorstellung, die allerdings in der Lage ist, auch verschiedene Arten von Stau zu berücksichtigen, läßt sich eine Stabilitätsanalyse des geregelten Systems durchführen. Mittels der Modellvorstellung und der Stabilitätsanalyse lassen sich Regeln zur Berechnung der dynamischen Sollwerte ermitteln. Die Stabilitätsanalyse gilt analog auch für das Bewertungskriterium *Reisezeit*.

Modellvorstellung Staus entstehen an Unstetigkeitsstellen im Verkehrsablauf bezüglich der Kapazität, an denen die Nachfrage die vorhandene Kapazität überschreitet. Unstetigkeitsstellen können sich daher durch eine Reduktion der Kapazität oder durch eine Erhöhung der Nachfrage ergeben. Die Kapazität reduziert sich beispielsweise durch Steigungen, Spurreduktion, Verflechtung oder Kurvigkeit. Unstetigkeitsstellen aufgrund der Nachfrage entstehen durch Zuflüsse.

Eine Unstetigkeitsstelle kann einen oder – zeitlich und örtlich nacheinander – mehrere Staus erzeugen (TREIBER, 1999). Der aus den von der Unstetigkeitsstelle erzeugten Staus im örtlich-zeitlichen Mittel herausfahrende Verkehrsfluß muß genau der vorhandenen Kapazität unter Berücksichtigung der Zuflüsse entsprechen. Dabei gibt es

abhängig vom Verkehr beliebig viele Möglichkeiten der Stauausbreitung und Staumuster in Form von Fundamentaldiagrammen.

Eine Route läßt sich entsprechend Bild 4.6 mit einer Staulänge modellieren, die sich aus der Summe der Ausgänge einzelner Integratoren ergeben. Jeder Integrator model-

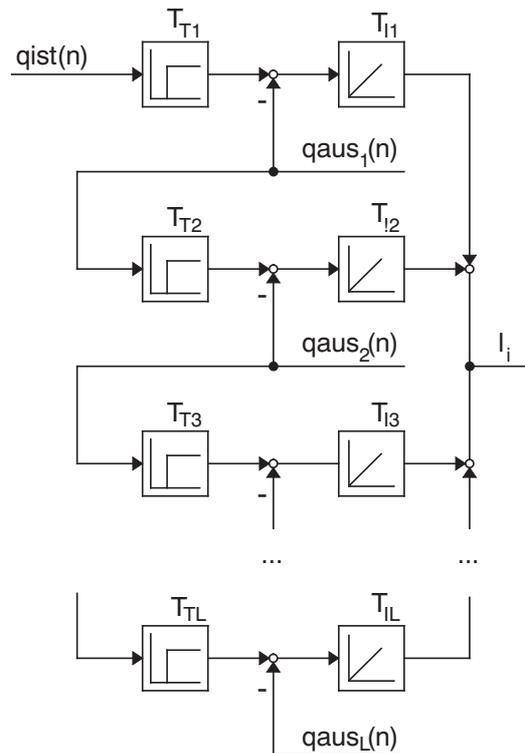


Abbildung 4.6: Staumodell einer Route bei aufeinander folgenden Staubereichen

liert einen Stau. Der Eingang eines Integrators ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Zufluß in den Stau und dem Abfluß aus dem Stau. Der Zufluß des ersten Staus ist der Verkehrsstrom am Routenanfang, der um eine Totzeit verzögert ist. Die Totzeit der Verzögerung ergibt sich aus der mittleren Geschwindigkeit vor dem Stau und dem Abstand des Stauanfanges vom Routenanfang. Die Zuflüsse der übrigen Staus sind die Abflüsse aus dem jeweiligen Vorgängerstau, die jeweils um eine Totzeit verzögert werden. Unterschiedliche Dichten und Geschwindigkeiten im Stau können bei diesem Modell durch entsprechend gewählte Totzeiten und Integrationskonstanten berücksichtigt werden.

Stabilitätsbetrachtung Nur der jeweils erste Stau auf einer Route kann durch die Umleitungsstrategie beeinflusst werden. Für die Stabilitätsbetrachtung des geschlossenen Regelkreises ist daher nur dieser Stau relevant. Die Staulängen der übrigen Staus

sind von der Umleitungsstrategie zwar nicht beeinflussbar, können aber zur Störgrößen-aufschaltung verwendet werden. Für den Regler wird ein Proportionalverhalten ange-setzt. Mit diesem Regler wird nicht nur der Regler des Algorithmus, sondern auch der Umleitungsregler modelliert, so daß der vom Staulängenregler berechnete Sollwert für den umzuleitenden Verkehrsfluß als tatsächlicher Istwert genommen wird. Bild 4.7 zeigt den Signalflußplan des sich ergebenden geregelten Systems unter der Annahme, daß nur eine Route überlastet ist. Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion

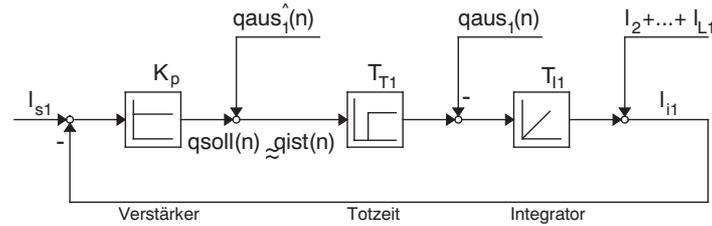


Abbildung 4.7: Modell des geregelten Systems

$$F_0(j\omega) = -K_p e^{-j\omega T_T} \frac{T_I j}{\omega} \quad (4.3)$$

$$= -\frac{K_p T_I \sin(\omega T_T)}{\omega} - j \frac{K_p T_I \cos(\omega T_T)}{\omega}, \text{ mit} \quad (4.4)$$

- F_0 Übertragungsfunktion
- K_p Verstärkung des Reglers
- T_T Totzeitkonstante
- T_I Zeitkonstante des Integrators

Der Faktor T_I ist die Verstärkung des Integrators. Dieser modelliert die Geschwindig-keit, mit der sich die Staulänge in Abhängigkeit vom Zufluß ändert und stellt damit eine Zeitkonstante dar. Dabei ist im wesentlichen die zeitlich gemittelte Dichte im Stau maßgeblich. Längerfristige Dichteschwankungen, die nach Mittelungen in Zeithorizonten entsprechend der Totzeit bestehen bleiben, müssen berücksichtigt werden. Die Zeitkonstante des Integralteils berechnet sich zu

$$T_I \approx \frac{1}{k_m}, \text{ mit} \quad (4.5)$$

k_m geringste mittlere Dichte

Je größer die Dichte im Stau ist, umso langsamer wächst der Stau in seiner örtlichen Länge. Die Verzögerungszeit T_T ergibt sich aus der Reisezeit zwischen dem Routen-anfang und dem Beginn des ersten Staus. Vereinfacht wird diese Reisezeit aus den aufsummierten maximalen Segmentreisezeiten ermittelt:

$$T_T \approx \sum_{\forall \text{ Segmente } ir} \frac{L_{ir}}{v m_{ir}}, \text{ mit} \quad (4.6)$$

- ir Segmente vor dem Stauanfang
- L Länge des Segments
- vm geringste mittlere Geschwindigkeit auf dem Segment

Die Berechnung der Parameter T_I und T_T wird für den dynamisch ungünstigsten Fall durchgeführt, um auch für diesen die Stabilität des Regelkreises garantieren zu können. Eine dynamische Anpassung der Parameter beziehungsweise der Reglerverstärkung wäre denkbar, wurde in dieser Arbeit aber nicht implementiert, da die Regler schon ohne weitere Optimierungen gute Ergebnisse liefern.

Bild 4.8 zeigt den Phasenplan des offenen Regelkreises. Für die Stabilität des geschlos-

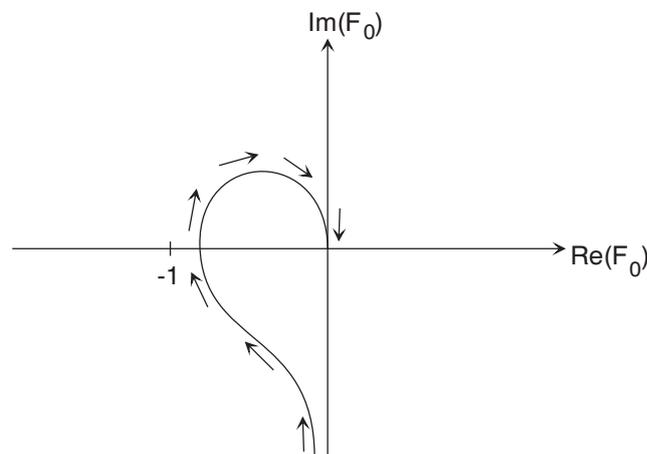


Abbildung 4.8: Phasenplan des offenen Regelkreises

senen Regelkreises müssen die Reglerparameter so begrenzt werden, daß der kritische Punkt -1 immer links der Kurve bleibt. Aus den Bedingungen

$$|F_0(j\omega)| = K_p \frac{T_I}{\omega} < 1 \quad \text{und} \quad (4.7)$$

$$\angle F_0(j\omega) = \arctan\left(-\frac{\sin(\omega T_T)}{\cos(\omega T_T)}\right) = \frac{\pi}{2} \quad (4.8)$$

ergibt sich für die Reglerverstärkung:

$$K_p < \frac{\pi}{2T_I T_T} \quad (4.9)$$

Unter der Annahme des vereinfachten Modells kann bei dieser Begrenzung der Verstärkung die Stabilität des Regelkreises garantiert werden. Damit werden sich aufschaukelnde Arbeitsbewegungen ausgeschlossen. Allerdings kann es im Falle großer Verkehrsstörungen noch immer dazu kommen, daß die Staulängen wachsen und nicht reduziert werden können. In diesem Fall ist das System nicht steuerbar.

Staulängenberechnung Die Staulänge einer Route wird im einfachsten Fall aus der Summe der überstauten Segmente berechnet:

$$lc_i = \sum_{\forall \text{Segmente } j | v_j < vb} (L_j) \quad , \text{ mit} \quad (4.10)$$

- lc : Staulänge
- i : Routenindex
- j : Segmentindex
- L : Segmentlänge
- v : Geschwindigkeit
- vb : Geschwindigkeitsschwellenwert

Der Geschwindigkeitsschwellenwert ist ein einstellbarer Parameter, der zum Beispiel zu $vb = 30 \text{ km/h}$ gesetzt wird. Diese Formel definiert einen minimalen Anspruch an die Verkehrsmodellierung; lediglich der Geschwindigkeitsschwellenwert muß korrekt geschätzt werden. Diese Formel kann daher auch mit wesentlich einfacheren Verkehrsmodellen als dem kalmangefilterten dynamischen makroskopischen Modell verwendet werden, wie zum Beispiel Geschwindigkeitsinterpolationen zwischen Meßquerschnitten oder einer Bestimmung der Verkehrszustandsklasse. Diese Formel berücksichtigt aber keine unterschiedlichen Stautypen mit unterschiedlichen Reisezeiten im Stau.

Die Formel

$$lc_i = \frac{1}{k_{max}^2} \sum_{\forall \text{Segmente } j | v_j < vb} (k_j^2 \cdot L_j) \quad , \text{ mit} \quad (4.11)$$

- lc : normierte Staulänge
- k : Dichte
- k_{max} : Maximale Dichte

berücksichtigt unterschiedliche Stautypen sowie Gebiete unterschiedlicher Dichten und Reisezeiten im Stau. Ein Stau kann als deterministische Warteschlange modelliert werden; die Reisezeit durch den Stau ist abhängig von den Fahrzeugen im Stau, also der Dichte, und dem Verkehrsfluß aus dem Stau, der wiederum von der Dichte abhängig ist. Bei Annahme einer reziproken Abhängigkeit $q \approx 1/k$ im gebundenen Verkehr ergibt sich eine quadratische Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Dichte. Die so berechnete Staulänge lc ist damit eine normierte Staulänge.

Sollwertberechnung Hierzu wird eine lineare Staulängenregelung mit Störgrößen-aufschaltung verwendet. Die Dynamik der Sollwertberechnung ergibt sich aus der Störgrößen-aufschaltung und der Berücksichtigung der Stabilitätsrechnung. Der Sollwert für die Staulänge auf Route 1 berechnet sich zu:

$$lcs_1(n) = L_0 + lc_2(n) \quad , \text{ mit} \quad (4.12)$$

- lcs_1 Sollwert für Staulänge auf Route 1
- lc_2 Tatsächliche Staulänge auf Route 2
- L_0 Anpassung

Die Anpassung L_0 dient zur Berücksichtigung der Längendifferenz der Haupt- und Alternativroute; zudem kann man mit ihrer Hilfe die mittlere Reisezeitdifferenz zwischen Hauptroute und Alternativroute während einer aktiven Schaltung einstellen. Ein guter Richtwert für die Parametrisierung der Anpassung ist der Quotient aus der mittleren Geschwindigkeit im (Norm)Stau und der mittleren Geschwindigkeit im freien Verkehr multipliziert mit der Längendifferenz des Routenpaares.

Aus dem dynamischen Sollwert für die Staulänge wird der dynamische Sollwert für die auf die Alternativroute umzuleitenden Fahrzeuge in einem PI Regler berechnet zu:

$$qus_2(n) = qpro(n) + qint(n) \quad , \text{ mit} \quad (4.13)$$

- qus Sollwert für den umzuleitenden Verkehrsfluß
- $qint$ Proportionalteil
- $qint$ Integralteil

Der Proportionalteil berechnet sich zu:

$$qpro(n) = kp \cdot (lc_1(n) - lcs_1(n)) \quad , \text{ mit} \quad (4.14)$$

- kp Reglerverstärkung (Proportionalteil)
- lc_1 Iststaulänge auf Route 1

Der Integralteil berechnet sich zu:

$$qint(n) = qint(n - 1) + ki \cdot (lc_1(n) - lcs_1(n)) \quad , \text{ mit} \quad (4.15)$$

- ki Reglerverstärkung (Integralteil)

Die Integralverstärkung des Reglers muß bei der Auslegung der Proportionalverstärkung zur Integralverstärkung der Strecke gerechnet werden; aufgrund des Integralanteils der Strecke kann auf den Integralanteil im Regler auch verzichtet werden. Die technischen Implementierungen erlauben oft nur das Umleiten auf eine Alternativroute, aber nicht auf die Hauptroute; in diesem Fall werden negative Sollwerte ausgeschlossen.

Der auf die Alternativroute umzuleitende Verkehrsfluß kann nicht gemessen werden, weshalb zusätzlich noch ein dynamischer Sollwert qs_1 für die in die Hauptroute fließende Verkehrsstärke berechnet wird:

$$qs_1(n) = -qus_2(n) + S(n) \quad , \text{ mit} \quad (4.16)$$

- qs_1 Sollwert des Verkehrsflusses in die Hauptroute
- S Störgröße

Unter Vernachlässigung des Integralteils $q_{int}(n)$ ergibt sich der Sollwert nach Einsetzen zu:

$$qs_1(n) = kp \cdot (lcs_1(n) - lc_1(n)) + S(n) \quad (4.17)$$

Die Störgröße $S(n)$ modelliert den Verkehrsfluß, der in die Hauptroute fließen muß, damit sich die Staulänge beziehungsweise die Reisezeit nicht ändert und kann damit als Bilanz der Verkehrsflüsse in und aus den Staus auf der Hauptroute berechnet werden:

$$S(n) = \sum (q_{in}(n) - q_{aus}(n)) \quad , \text{ mit} \quad (4.18)$$

q_{in} Stauzuflüsse
 q_{aus} Stauabflüsse

Wenn der Sollwert für den umzuleitenden Verkehrsfluß $qus_2(n) = 0$ ist, dann befindet sich das System im Betriebsbereich 1, in welchem nicht umgeleitet wird.

Reisezeiten

Motivation Der zweite Bewertungsansatz ist die direkte Berechnung der individuellen Reisezeit. Damit kann das objektive Entscheidungskriterium *Reisezeit* explizit berücksichtigt werden; die Berechnung der Reisezeit stellt einerseits höhere Anforderungen an die Verkehrsmodellierung. Andererseits werden keine speziellen Modellvorstellungen benötigt, die ihrerseits die Güte des Steuerungsverfahrens ebenfalls beeinflussen.

Die analytische Betrachtung der Stabilität ist für die Reisezeiten im allgemeinen schwieriger; hierfür wird ein Modell benötigt, wie zum Beispiel ein nicht lineares makroskopisches Verkehrsflußmodell. Aufgrund der obigen Überlegungen zu den Zusammenhängen zwischen Staulängen und der Reisezeit wird in Näherung die Stabilitätsbetrachtung für das Staukriterium übernommen.

Reisezeitberechnung Die Reisezeit der Route i zum Zeitschritt n kann in der Näherung aus den Reisezeiten beziehungsweise Geschwindigkeiten der Segmente j zum Zeitschritt n berechnet werden:

$$tr_i = \sum_{\forall \text{ Segmente } j} \frac{L_j}{v_j} \quad , \text{ mit} \quad (4.19)$$

tr Reisezeit
 i Routenindex
 j Segmentindex
 L Länge des Segments
 v Geschwindigkeit des Segments

Diese Näherung ist besonders dann erlaubt, wenn sich die Geschwindigkeiten der Segmente im Zeitraum $[n; n + tr_i/T]$ nur wenig ändern, wobei T die Zeitschrittweite ist.

Dies ist in der Regel erfüllt, wenn sich die Verkehrsnachfrage und die Steuerungsvariablen nur langsam ändern, und das System in einem eingeschwungenen Zustand ist. Für diese Art der Reisezeitberechnung wird keine Prognose benötigt; die Schätzung der aktuellen Segmentgeschwindigkeiten muß jedoch mit hoher Güte erfolgen.

Wenn sich das System nicht im eingeschwungenen Zustand befindet, zum Beispiel aufgrund einer sprunghaften Änderung der Steuerungsvariable, können sich die Segmentgeschwindigkeiten während der Reisezeit stark ändern, so daß die Reisezeitberechnung unter Nutzung prognostizierter Segmentgeschwindigkeiten eine höhere Güte besitzt. Hierzu muß eine rekursive Berechnung des Ortes erfolgen, bis das letzte Segment j der Route i erreicht ist:

$$x(n+1) = x(n) + v(x(n)) \cdot T \quad , \text{ mit} \quad (4.20)$$

- x Ort ab Routenanfang
- $v(x)$ Geschwindigkeit des Segments, auf dem der Ort x liegt
- T Zeitschrittweite

Ist der Ort $x(N+1)$ der erste Ort nach dem Ende der Route, so errechnet sich die Reisezeit zu:

$$tr_i = N \cdot T + \frac{(L_i - x(N))}{v(x(N))} \quad (4.21)$$

Diese Methode der Reisezeitberechnung erfordert von der Verkehrsmodellierung eine Prognose der zukünftigen Segmentgeschwindigkeiten. Zudem muß sichergestellt werden, daß die Gesamtgüte der erweiterten Verkehrsmodellierung und der Reisezeitberechnung höher ist als die der vereinfachten Reisezeitberechnung. Diese Art der Reisezeitberechnung wurde im Rahmen des Steuerungsverfahrens unter Verwendung einer Prognose nicht implementiert; sie wird aber im Kontext der externen Bewertung verwendet, um das Steuerungsverfahren zu validieren.

Sollwertberechnung Analog zur Staulängenregelung wird eine Reisezeitregelung mit Störgrößenaufschaltung verwendet. Der Sollwert für die Reisezeit auf Route 1 berechnet sich zu:

$$tr_{s1}(n) = T_0 + tr_2(n) \quad , \text{ mit} \quad (4.22)$$

- tr_{s1} Sollwert für Reisezeit auf Route 1
- tr_2 Istreisezeit auf Route 2
- T_0 Anpassung

Mittels der Anpassung kann man die mittlere Reisezeitdifferenz zwischen Hauptroute und Alternativroute während einer aktiven Schaltung einstellen.

Analog zu dem Staulängenregler wird aus dem dynamischen Sollwert für die Reisezeit der dynamische Sollwert für die auf die Alternativroute umzuleitenden Fahrzeuge mit einem P Regler berechnet:

$$qus_2(n) = kp \cdot (tr_1(n) - tr_{s1}(n)) \quad , \text{ mit} \quad (4.23)$$

kp Reglerverstärkung
 tr_1 Istreisezeit auf Route 1

Auf einen Integralanteil kann wie auch beim Staulängenregler verzichtet werden. Der dynamische Sollwert für die in die Hauptroute fließende Verkehrsstärke berechnet sich zu:

$$qs_1(n) = kp \cdot (trs_1(n) - tr_1(n)) + S(n) \quad (4.24)$$

Die Störgröße $S(n)$ wird aus einer Bilanz der Fahrzeuge berechnet, die in die Route und aus der Route heraus fahren:

$$S(n) = sfac \cdot \left(\sum q_{1in}(n) - \sum q_{1aus}(n) \right) \quad , \text{ mit} \quad (4.25)$$

q_{1in} Zuflüsse in die Hauptroute
 q_{1aus} Abflüsse aus der Hauptroute
 $sfac$ Sicherheitsfaktor

Die Zuflüsse bestehen aus allen Zufahrten auf die Hauptroute mit Ausnahme der durch den geregelten Entscheidungsknoten beeinflussten Zufahrt. Der Sicherheitsfaktor verhindert, daß aufgrund von Schätzfehlern eine zu niedrige Störgrößenaufschaltung gewählt wird. In Zusammenwirken mit der Betriebsbereichsauswahl entsteht ansonsten ein Systemverhalten, das einem Zweipunktregler entspricht. Der Sicherheitsfaktor wird zu

$$sfac = 1.25 \quad (4.26)$$

gesetzt. Dies bewirkt eine ausreichende Regelungsgüte, kombiniert mit einer hohen Sicherheit gegen Fehlentscheidungen aufgrund von Schätzfehlern.

Die Überlegungen zu der Betriebsbereichswahl und der Begrenzung des dynamischen Sollwertes werden aus der Staulängenregelung übernommen.

4.5 Der Umleitungsregler

4.5.1 Einleitung

Der Umleitungsregler ermittelt die Schaltstrategie beziehungsweise den Schaltplan in Abhängigkeit vom aktuellen Sollwert für den unzureichenden Strom, gegebenenfalls unter zusätzlicher Nutzung von dessen Istwert und Prognosen der primären Wirkung des Stelleingriffs. Hierzu wird eine Architektur verwendet, die mit der Schaltplanauswahl und der Schaltplankorrektur sowohl die Nutzung von Wirkungsprognosen als auch die Nutzung gemessener Wirkungen zuläßt. Es werden drei Arten der Schaltplanauswahl (siehe Abschnitt 2.8) mit unterschiedlicher Modellierung und ein Ansatz für die Schaltplankorrektur vorgestellt. Aus ihrer Kombination können die in der Einleitung der Steuerungsmodellierung bereits beschriebenen vier Ansätze der Informationsverwendung realisiert werden.

4.5.2 Stelleingriffe

Der Stelleingriff besteht aus diskreten Stellmöglichkeiten, die Schaltpläne genannt werden. Kontinuierliche Sollwertvorgaben müssen daher durch Umschalten zwischen den Schaltplänen in diskrete Schaltfolgen umgewandelt werden. Für die Schaltplankorrektur muß vorausgesetzt werden, daß die Reihenfolge der Schaltpläne bezüglich ihrer Wirkung bekannt ist:

$$\text{Effekt}(d_i) > \text{Effekt}(d_j) \quad , \text{ wenn } i > j \quad (4.27)$$

Effekt(d_i) Wirkung des Schaltplans d_i (\cong umgeleiteter Verkehrsfluß)
 d Schaltplan
 i, j Indizes

Dies kann durch geeignete Definition der Schaltpläne sichergestellt werden; auf ein eigenes Modul zur Bestimmung der Wirkungsreihenfolge wurde daher verzichtet.

4.5.3 Schaltplanauswahl

Einleitung

Es werden drei Ansätze zur Schaltplanauswahl verwendet. Der erste Ansatz verwendet keine Verkehrsmodellierung. Ein weiterer verwendet die geschätzte Kordonmatrix und geschätzte Abbiegeraten, die als beliebig genau schätzbar angenommen werden; damit kann das prinzipielle Potential der Nutzung von Verkehrsmodellen gezeigt werden. Ein dritter Ansatz basiert auf einer Schätzung der Abbiegeraten unter Nutzung von Ansätzen der neuronalen Netze und Fuzzyregler (siehe Abschnitt 3.7.3).

Zweipunktregler

Der Zweipunktregler basiert auf einer direkten Auswertung des dynamischen Sollwerts für die umzuleitende Fahrzeugmenge $q_{us_2}(n)$. Es werden weder ein Verkehrsmodell noch meßbare Daten verwendet. Der aktive Schaltplan des nächsten Zeitschritts wird berechnet zu:

$$D(n+1) = \begin{cases} d_1 & \text{für } q_{nr1} \leq 0 \\ d_D & \text{für } q_{nr1} > q_b \end{cases} \quad (4.28)$$

D gewählter Schaltplan
 n Zeitschritt
 d_1 Schaltplan mit Wirkung $0 Fz/h$
 d_D Schaltplan mit maximaler Wirkung
 q_b Schwellenwert

Der Schwellenwert muß in der Validierung sinnvoll gesetzt werden; ein typischer Wert sind $300 Fz/h$.

Der Zweipunktregler kann auch der Schaltplankorrektur zugeordnet werden, da er ja

weder eine modellierte primäre Wirkung noch eine gemessene primäre Wirkung verwendet.

Nutzung der Kordonmatrizen

Diese wird benutzt, um das Potential der modellbasierten Schaltplanauswahl zu zeigen. Das Steuerungsmodell wird hierzu ohne Verkehrsmodellierung bewertet, indem die benötigten geschätzten Verkehrsgrößen aus dem Modell zur externen Bewertung verwendet werden.

Entsprechend der netzhaften Verkehrsmodellierung (siehe Abschnitt 3.4) wird angenommen, daß ein Schaltplan eine Menge von Zielströmen beziehungsweise Routen beeinflusst. Die Wirkung des Schaltplans ergibt sich dann aus der Summe der beeinflussten Zielströme auf dem letzten Segment vor dem Entscheidungsknoten:

$$\text{Effekt}(d_i) = \sum_{r_i=1}^{R_i} (\beta_{i,r} \cdot q_{r_i}) \quad (4.29)$$

r_i Routenindex der vom Schaltplan i beeinflussten Routen

$\beta_{i,r}$ Akzeptanzrate der Route r für den Zielplan i

Der aktive Schaltplan ergibt sich aus einer diskreten Optimierungsaufgabe:

$$\text{Suche } d_i \in D, \text{ so daß } |q_{us_2} - \text{Effekt}(d_i)| = \text{MIN} \quad (4.30)$$

d_i Schaltplan i

D Menge aller Schaltpläne

Aufgrund der geringen diskreten Möglichkeiten wird der Fehler für jeden Schaltplan berechnet und derjenige Schaltplan gewählt, dessen umgeleiteter Strom am besten mit dem Sollwert übereinstimmt.

Nutzung der Abbiegeratenschätzung

Ansatz Unter Nutzung einer geschätzten Abbiegerate $ar(d_i, n)$ und der meßbaren Verkehrsstärke q vor dem Entscheidungspunkt kann die Wirkung des Schaltplans d_i in Form der in die Hauptroute fließenden Verkehrsmenge prognostiziert werden zu:

$$\text{Effekt}(d_i) = ar(d_i, n) \cdot q \quad (4.31)$$

Der aktive Schaltplan ergibt sich ebenfalls aus einer diskreten Optimierungsaufgabe:

$$\text{Suche } d_i \in D, \text{ so daß } |q_{s_1} - \text{Effekt}(d_i)| = \text{MIN} \quad (4.32)$$

Anstelle des Sollwertes q_{us_2} für den umzuleitenden Verkehrsfluß wird der Sollwert q_{s_1} für den Verkehrsfluß in die Hauptroute verwendet. Der Optimierungsalgorithmus ist identisch mit demjenigen unter Nutzung der Kordonmatrix.

Konvergenz des Lernverhaltens Bei Verwendung der auf die lernfähige Neuro/Fuzzy-Modellierung (siehe Abschnitt 3.7) basierte Schätzung der Abbiegerate im Rahmen einer Regelungsaufgabe kann die Konvergenz des Lernverfahren im geschlossenen Regelkreis nicht sichergestellt werden. Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem im Approximator der Abbiegerate enthaltenem Wissen und der Entstehung neuer Lernbeispiele, wodurch der Eingangsraum des Approximators eingeschränkt wird (siehe Bild 4.9).

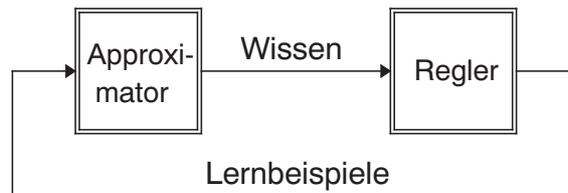


Abbildung 4.9: Approximator im Regelkreis

Dieser Sachverhalt soll an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden: Gegeben sei ein Approximator, dessen Eingang aus dem aktuellen Schaltplan gebildet wird. Es gibt zwei Schaltpläne: *geschalten* und *nicht geschalten*. Der Ausgang des Approximators ist die Abbiegerate. Für den Schaltplan *geschalten* wurde eine Abbiegerate von 1 (real 0.4) und für den Fall *nicht geschalten* eine Abbiegerate von 0.3 (real 0.25) gelernt. Der Umleitungsalgorithmus liefert Sollwerte, die einer Abbiegerate im Bereich $[0.3, 0.6]$ entsprechen. In diesem Fall liefert der Umleitungsregler zunächst immer den Schaltplan *nicht geschalten*. Ohne einer Fehlererkennung beziehungsweise Schaltplan-korrektur würde der Schaltplan *geschalten* nie ausgewählt werden; in der Folge davon werden für diesen Fall keine neuen Lernbeispiele erzeugt.

Die auf der Abbiegeratenschätzung basierende Schaltplanauswahl muß daher immer mit einer Schaltplankorrektur zusammen betrieben werden.

4.5.4 Schaltplankorrektur

Einleitung

Die grundlegende Idee ist die Nutzung von gemessenen primären Wirkungen anstelle der modellierten Wirkungen. Auf diese Weise wird der Ansatz der dynamischen Sollwerte optimal genutzt, so daß er nicht nur als vereinfachte implizite Optimierung wie im Umleitungsalgorithmus gezeigt, sondern auch als echte Erweiterung von Optimierungsansätzen gesehen werden kann, die auch miteinander kombiniert werden können.

Es wird im folgenden ein Ansatz vorgestellt, der nur geringes Modellwissen erfordert.

Ansatz

Es wird ein Regler definiert, der als Integralregler mit Begrenzung interpretiert werden kann, dessen Eingangswert ebenfalls unter Nutzung einer Hysterese bestimmt wird. Es wird vorausgesetzt, daß die Reihenfolge der Schaltpläne bezüglich ihrer Wirkung konstant sind (siehe Abschnitt 4.5.2). Die genaue Wirkung der Schaltpläne muß nicht bekannt sein.

Unter der Voraussetzung, daß der Schaltplan D zum Zeitschritt n

$$D(n) = d_i \quad , \quad 1 < i < N \quad (4.33)$$

ist, wird der Schaltplan des nächsten Zeitschritts berechnet zu:

$$D(n+1) = \begin{cases} d_{i+1} & \text{für } qs_1 - q_1 > qb \\ d_{i-1} & \text{für } qs_1 - q_1 < -qb \end{cases} \quad , \quad \text{mit} \quad (4.34)$$

- qs_1 Sollwert für die Verkehrsstärke in die Hauptroute
- q_1 Tatsächliche Verkehrsstärke in die Hauptroute
- qb Schwellenwert

Der Schwellenwert qb vermeidet schon vor der Schaltzeitüberwachung zu häufiges Schalten, indem eine Toleranzgrenze für die Einhaltung des Sollwertes angegeben wird; diese kann zum Beispiel auf $qb = 50 Fz/h$ gesetzt werden oder kann allgemein aus einem vorgegebenen prozentualen Fehler bezogen auf das aktuelle Verkehrsaufkommen berechnet werden, um die Schätzgenauigkeit der Verkehrsmodellierung im Verfahren gewinnbringend zu berücksichtigen. Für den Spezialfall

$$D(n) = d_1 \quad (4.35)$$

gilt folgende Gleichung:

$$D(n+1) = \begin{cases} d_2 & \text{für } q_{nr1} - q_{dr1} > qb \\ d_1 & \text{für } q_{nr1} - q_{dr1} < -qb \end{cases} \quad (4.36)$$

Entsprechend gilt für den Spezialfall

$$D(n) = d_N \quad (4.37)$$

die Gleichung:

$$D(n+1) = \begin{cases} d_N & \text{für } q_{nr1} - q_{dr1} > qb \\ d_{N-1} & \text{für } q_{nr1} - q_{dr1} < -qb \end{cases} \quad (4.38)$$

Durch die Hysterese im Regelfehler und die nachgeschalteten Schaltzeitüberwachung entsteht eine implizite Pulsweitenmodulation. In der Regel liegt der dynamische Sollwert für die Verkehrsstärke auf der Hauptroute zwischen den Wirkungen zweier Schaltpläne, so daß zwischen beiden Schaltplänen hin- und hergeschaltet wird, um im Mittel

den Sollwert zu erfüllen.

Wenn die Wirkung der Schaltpläne aufgrund der impliziten Pulsweitenmodulation bekannt ist, kann die implizite Pulsweitenmodulation um eine explizite Pulsweitenmodulation ergänzt werden. Der zeitliche Anteil t_j des Schaltplans d_j (siehe Bild 4.10) errechnet sich zu:

$$t_j = \frac{qs_1 - \text{Effekt}(d_i)}{\text{Effekt}(d_j) - \text{Effekt}(d_i)} \quad , \text{ mit} \quad (4.39)$$

t_j zeitlicher Anteil des Schaltplans d_2

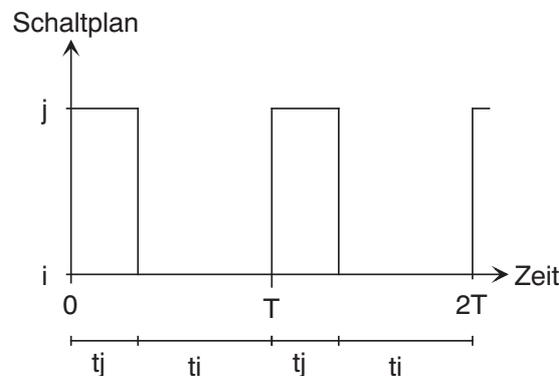


Abbildung 4.10: Pulsweitenmodulation

Die implizite Pulsweitenmodulation basiert letztlich auf einer Änderung der sekundären Wirkung aufgrund einer nicht optimal eingestellten primären Wirkung. In kleinen Netzmaschen führt dies aufgrund der geringen Totzeiten von zum Beispiel unter 5 min nur zu geringen Fehlern, weshalb die explizite Pulsweitenmodulation hier nicht benötigt wird. In großen Netzmaschen mit Totzeiten zum Beispiel über 15 min könnte die explizite Pulsweitenmodulation aber zu einer Verbesserung der Verfahrensgüte beitragen, insbesondere dann, wenn die sekundären Wirkungen nicht prädizierbar sind. Die Arbeit beschränkt sich in der Validierung auf kleine Netzmaschen, so daß dies nicht im Detail untersucht wurde.

Nach einem Schaltvorgang wird der Fehler erst nach einer einstellbaren Wartezeit ausgewertet, um die Totzeiten zwischen den Meßstellen vor und nach dem Entscheidungspunkt zu berücksichtigen. Diese Totzeit könnte auch dynamisch unter Berücksichtigung des vom betreffenden Kalmanfilter geschätzten Verkehrszustandes bestimmt werden; dies wurde aber nicht implementiert und daher auch nicht weiter untersucht.

4.5.5 Kombinationen

Einleitung

In diesem Abschnitt werden die für die Validierung aus der Schaltplanauswahl und Schaltplankorrektur zusammengestellten Systeme kurz beschrieben. Dies geschieht anhand von Signalflußplänen; das reale Straßennetz ist in diesen Signalflußplänen durch die Simulation zur externen Bewertung entsprechend den Bildern 2.22 und 2.23 ersetzt.

Zweipunktregler

Bild 4.11 zeigt den Signalfluß des Zeipunktreglers unter Verwendung eines PI Staulängenreglers im Algorithmus sowie der vereinfachten Staulängenberechnung nach Gleichung 4.10. Die Ergebnisse der Verkehrsmodellierung werden direkt aus der Simulation ge-

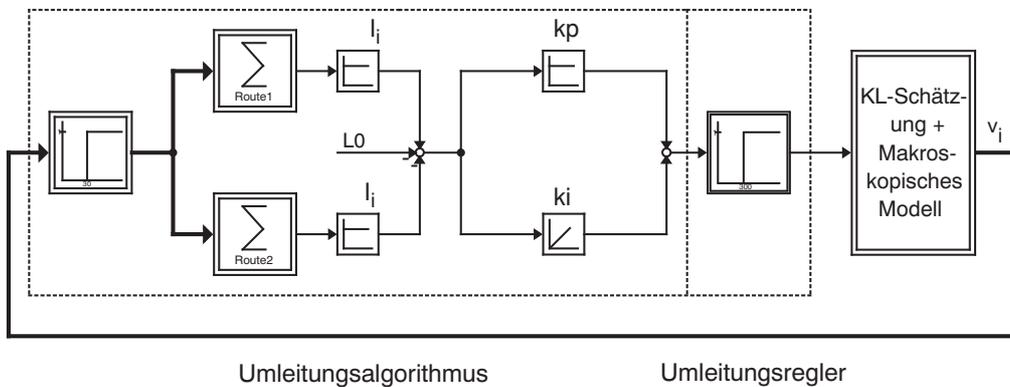


Abbildung 4.11: Zweipunktregler

wonnen, so daß mit diesem Aufbau nur das Steuerungsmodell validiert wird. Der Zweipunktregler besteht nur aus der gleichnamigen Schaltplanauswahl. Eine Korrektur wird nicht vorgenommen.

Mehrpunktregler mit Modellnutzung

Bild 4.12 zeigt den Signalflußplan des Mehrpunktreglers mit Modellnutzung. Dieser Mehrpunktregler basiert auf der Schaltplanauswahl unter Nutzung der Schätzung der Kordonmatrix, die wie die übrigen Verkehrsgrößen ebenfalls direkt aus dem Verkehrsmodell zur externen Bewertung gewonnen wird. Es kommt ebenfalls die vereinfachte Staulängenberechnung nach Gleichung 4.10 zum Einsatz.

Mehrpunktregler mit Meßwertnutzung

Bild 4.13 zeigt einen Mehrpunktregler mit Meßwertnutzung. Es wird nur die Schaltplankorrektur, aber keine Schaltplanauswahl verwendet. In diesem Signalflußplan wird

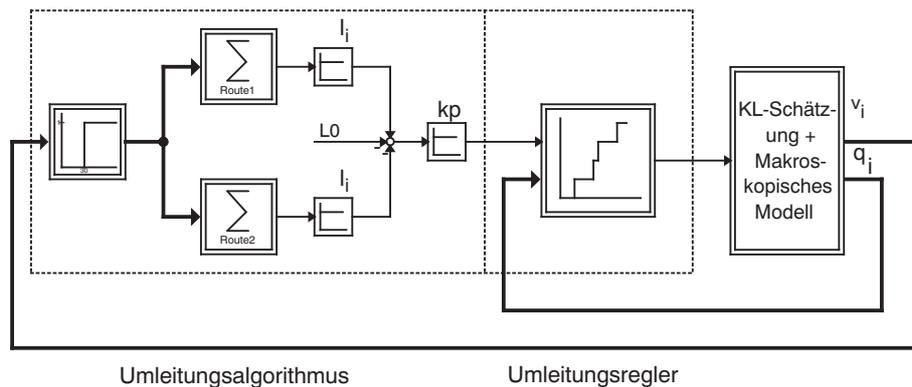


Abbildung 4.12: Mehrpunktregler mit Modellnutzung

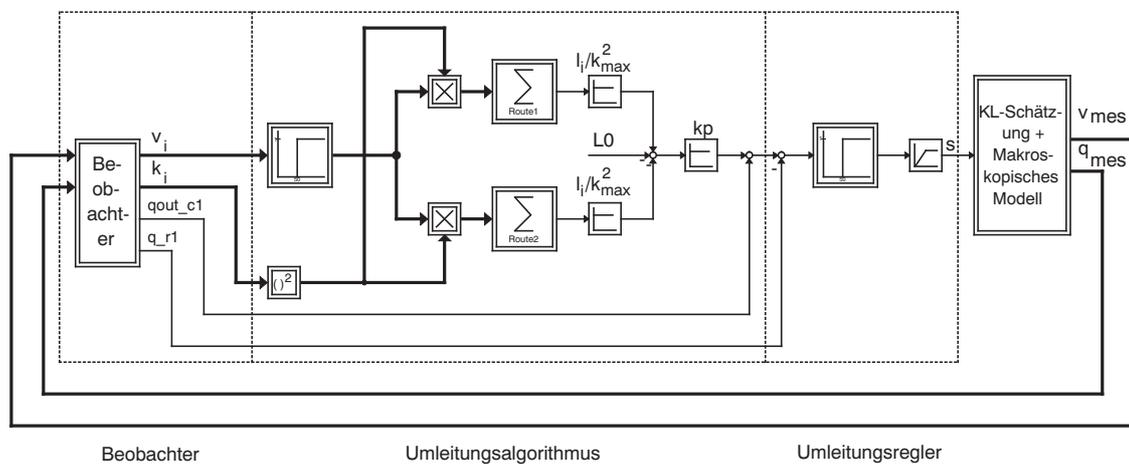


Abbildung 4.13: Mehrpunktregler mit Meßwertnutzung

die Verkehrsmodellierung berücksichtigt, so daß Verkehrsmodell und Steuerungsmodell gemeinsam validiert werden. Im Bild mpmess wird die detaillierte Staulängenberechnung nach Gleichung 4.11 verwendet.

Mehrpunktregler mit Meßwert und Modellnutzung

Der Mehrpunktregler unter Verwendung von Modell- und Meßinformationen basiert auf dem Mehrpunktregler mit Meßwertnutzung aus Bild 4.13. Er wird erweitert um die Schaltungsauswahl unter Nutzung geschätzter Abbiegeraten, die dann verwendet wird, wenn der dynamische Sollwert für den Fahrzeugstrom auf der Hauptroute einen sprungförmigen Verlauf besitzt; der Sollwert kann insbesondere dann springen, wenn zwischen zwei Betriebsbereichen umgeschaltet wird. Die Systemstruktur ändert sich dann kurzfristig entsprechend Bild 4.12.

Durch die nur temporäre Verwendung der Schaltplanauswahl wird sichergestellt, daß die Konvergenz des Lernverfahrens der Abbiegeratenschätzung nicht verhindert wird.

4.5.6 Schaltzeitüberwachung

Ein Verkehrsteilnehmer sollte nicht mehr als einen Schaltplanwechsel wahrnehmen können, insbesondere wenn diese für einen Verkehrsteilnehmer aufgrund seiner Wahrnehmung nicht nachvollziehbar wären. Daher wird eine Schaltzeitüberwachung eingeführt, die nach einem Schaltvorgang weitere Schaltungen für eine bestimmte Zeitspanne ausschließt. Diese Zeitspanne ist einstellbar. Nicht implementiert wurde eine dynamische Ermittlung dieser Wartezeit aus der Topologie der Wechselwegweiserketten und dem aktuellen Verkehrszustand aus der Verkehrsmodellierung.

4.6 Dynamische Sollwertregelung versus Optimierung

4.6.1 Interpretation als Optimierungsaufgabe

Es kann ein Gütekriterium aufgestellt werden, das aus dem quadratischen Regelungsfehler besteht. Die Optimierungsaufgabe lautet:

Wähle die Steuerungsvariable u so, daß die Gütefunktion

$$G = (y_{soll}(n) - y(n, u))^2 \stackrel{!}{=} \text{MIN} \quad (4.40)$$

erfüllt wird. Der dynamische Sollwert $y_{soll}(n)$ entspricht im Falle des Umleitungsreglers der umzuleitenden Verkehrsstärke $q_{us_2}(n)$ (siehe Gleichungen 4.13 und 4.23 beziehungsweise der Sollverkehrsstärke auf der Hauptroute $q_{s_1}(n)$ (siehe Gleichungen 4.17 und 4.24. Die Steuerungsvariable u ist der Schaltplan, der vom Umleitungsalgorithmus geliefert wird.

Bei sinnvoller Verwendung eines linearen Regler, das heißt bei stabilem Regelkreis, besteht ein eindeutiger linearer Zusammenhang zwischen dem Regelfehler und der Steuerungsvariablen; dies bedeutet, daß die Existenz einer konvexen Gütefunktion mit einem globalem Optimum ohne weitere lokale Optima vorausgesetzt werden kann.

4.6.2 Lösung der Optimierungsaufgabe

Lösung mittels modellbasierter Optimierung

In der klassischen Optimierung wird ein mathematisches Modell verwendet, das die Wirkung der Steuerungsvariablen u modelliert. Meist wird mittels eines iterativen oder

diskreten Optimierungsalgorithmus die Steuerungsvariable so variiert, daß das Gütemaß im Sinne der Gleichung 4.40 optimal wird. Aufgrund des Ansatzes wird zumeist direkt das Bewertungskriterium der sekundären Wirkung *Reisezeit* optimiert; in dieser Arbeit wird in der Schaltplanauswahl das Bewertungskriterium der primären Wirkung der umgeleiteten Verkehrsstärke optimiert. Die Optimierung geschieht in einem Steuerungszeitschritt, so daß die Steuerungsvariable zu jedem Zeitpunkt im Sinne des Modells optimal ist. Tatsächlich besitzt die Steuerungsvariable nicht den optimalen Wert, wenn das Modell Fehler aufweist.

Lösung mittels linearer Regler

Die Steuerungsvariable wird in jedem Zeitschritt in Abhängigkeit vom Regelfehler berechnet. Es kann zwar nicht sichergestellt werden, daß die Steuerungsvariable in jedem Zeitschritt den optimalen Wert besitzt; es ist aber im stabilen Regelkreis sichergestellt, daß die Steuerungsvariable so verändert wird, daß das Gütemaß entweder verbessert wird oder aber zumindest den gleichen Wert behält, solange sich die Systemstörungen nicht verändern. Letztlich erfolgt also eine schrittweise Optimierung der Gütefunktion, wobei es nach einer Änderung der Störungen mehrere Iterationen dauern kann, bis das Optimum wieder erreicht wird. Durch Verwendung von Realdaten wird bei sinnvoller Auswahl der Regler das tatsächliche nicht durch Modellfehler verfälschte Optimum erreicht. Die Wahl eines Integralreglers bei proportionaler Strecke im Fall des Umleitungsreglers stellt eine solche sinnvolle Auswahl dar.

Dem Vorteil des tatsächlichen Optimums steht der Nachteil gegenüber, daß im Verlauf der iterativen Optimierung auch nicht optimale Werte der Steuerungsvariablen auftreten.

4.6.3 Integration der Optimierungsmethoden

Bild 4.14 zeigt schematisch die Idee der Kombination der modellbasierten Optimierung und der realitätsbasierten Optimierung mittels Regler. Nach Auftreten einer Störung oder einer sprunghaften Änderung des dynamischen Sollwerts (1) wird in einem ersten Schritt mittels modellbasierter Optimierung ein modellbezogener optimaler Wert der Steuerungsvariablen berechnet (2). Von diesem Wert ausgehend wird anschließend durch die iterative realitätsbasierte Optimierung das tatsächliche Optimum angestrebt (3).

Diese Idee wurde durch die Kombination des linearen Umleitungsreglers als Schaltplan-korrektur und der Schaltplanauswahl mittels der Abbiegeratenschätzung realisiert.

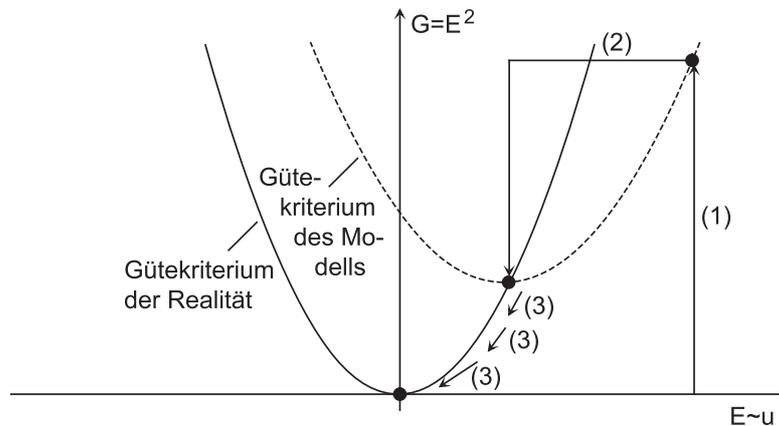


Abbildung 4.14: Kombination der modell- und realitätsbasierten Optimierung

4.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Steuerungsmodell bestehend aus dem Umleitungsalgorithmus und Umleitungsregler und deren Verknüpfung im Detail beschrieben. Es wurden für den Umleitungsalgorithmus vier verschiedene Bewertungsfunktionen vorgestellt, von denen drei implementiert wurden, die unterschiedliche Anforderungen an die Verkehrsmodellierung stellen; je nach vorhandener Daten- und Verkehrsmodellgüte kann so die geeignete Bewertungsfunktion gewählt werden. Es wurde ferner jeweils ein dynamischer Sollwert mit und einer ohne Störgrößenaufschaltung berechnet, so daß auf die Störgrößenaufschaltung bei zu geringer Güte verzichtet werden kann.

Im Umleitungsalgorithmus wurden mehrere Ansätze ohne und mit Verwendung von Verkehrsmodellen und ohne und mit erweiterter Verwendung von Meßdaten sowie deren Kombination vorgestellt. In den Ergebnissen wird das große Potential der erweiterten Verwendung von Meßdaten deutlich. Die erweiterte Verwendung von Meßdaten als Ersatz für Modelle in der Verkehrstechnik am Beispiel der Netzsteuerung stellt einen wesentlichen neuen Beitrag dieser Arbeit dar.

Kapitel 5

Softwaretechnische Implementierung des Steuerungsverfahrens

5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Entwurfsansätze beschrieben, die der Softwareimplementierung zugrunde liegen. Es wurde soweit wie möglich auf bekannte Entwurfsmuster zurückgegriffen (GAMMA ET AL., 1996; BUSCHMANN ET AL., 1996). Entwurfsmuster beschreiben die Klassen und deren Zusammenarbeiten zur Lösung eines möglichst allgemeinen Entwurfsproblems (nach GAMMA ET AL. (1996)). Als Klasse wird im folgenden eine allgemeine Datenstruktur entsprechend der objektorientierten Programmierung verstanden. Eine Klasse besteht im wesentlichen aus Daten und Methoden (Funktionen) mit bestimmten Zugriffsrechten.

Die Beschreibungen der nächsten Abschnitte sind keine vollständige Beschreibung der Implementierung; es werden aber alle wesentlichen verwendeten Entwurfsansätze beleuchtet. Die Beschreibung erfolgt weitgehend unabhängig von der verwendeten Programmiersprache und ist damit übertragbar. Die Bilder des Abschnitts entsprechen Klassendiagrammen der Standard-Objektmodellierungssprache UML (*Unified Modeling Language*) nach FOWLER und KENDALL (1998) in der Darstellungsvariante nach GAMMA ET AL. (1996).

5.2 Entwurfsansätze

5.2.1 Untermodule

Die Gesamtfunktionalität eines Objektes wird in Module unterteilt. In jedem Modul werden die Klassen einer Klassenfamilie gebildet. Diese besitzen jeweils eine Referenz

auf das Gesamtobjekt, das aus den Unterobjekten aufgebaut ist. In jedem Modul kann daher auf alle anderen Module zugegriffen werden.

Die Teilobjekte werden im ersten Ansatz statisch zusammengebunden. Dies geschieht durch zwei Stellvertreterklassen (*Proxy*) (siehe Bild 5.1). Die erste Stellvertreterklasse

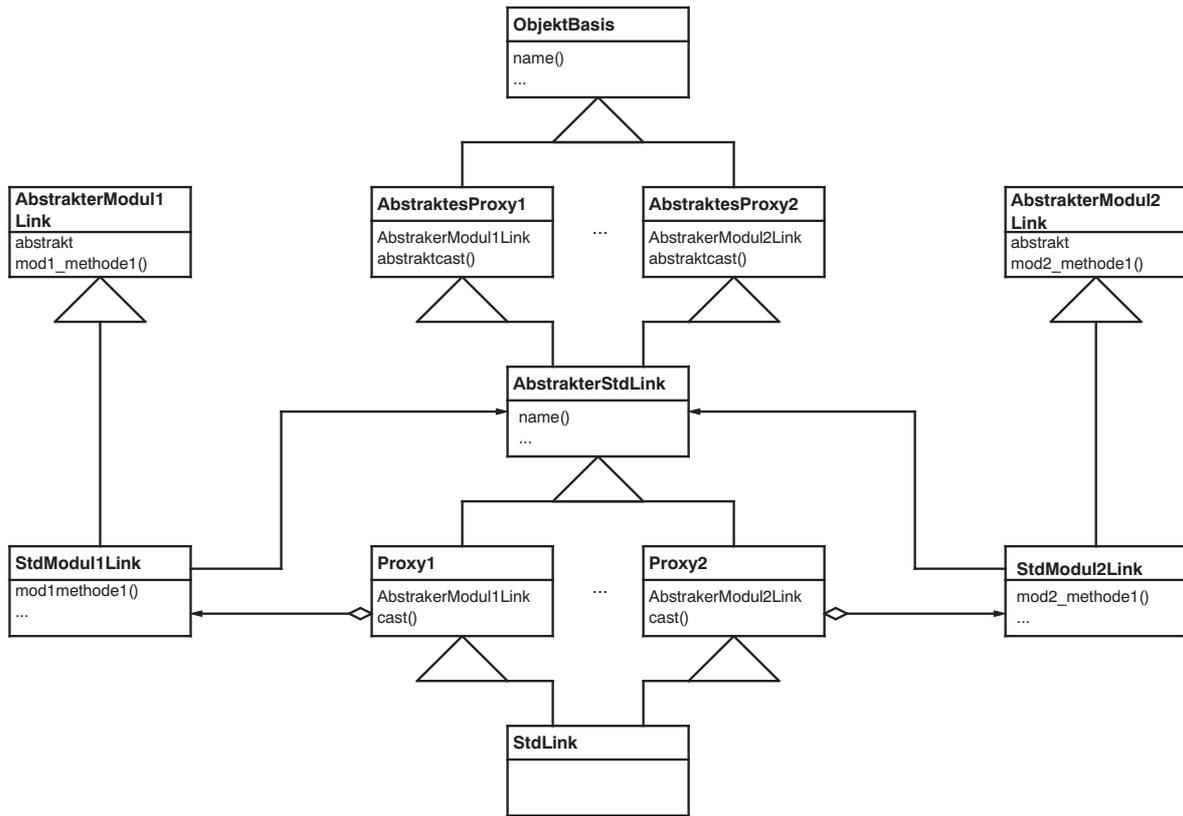


Abbildung 5.1: Statischer Modulaufbau

(*AbstraktesProxy*) definiert einen rein virtuellen Castoperator, der das Teilobjekt als Referenz auf die Basisklasse der entsprechenden Klassenfamilie liefert. Diese Klasse wird von einer Objektbasisklasse abgeleitet, die grundlegende Daten wie Name und ID-Nummer verwaltet. Die Basisklassenproxies werden mittels Mehrfachvererbung zu einer Basisklasse des Gesamtobjekts (*AbstrakterStdLink*) zusammengefaßt. Von dieser Basisklasse ist das zweite Proxy (*Proxy*) virtuell abgeleitet. Das zweite Proxy besitzt einen Zeiger auf das Teilobjekt vom Typ der jeweiligen Basisklasse der Familie. Es überlädt den Castoperator. Diese Proxies übernehmen die Speicherverwaltung (Erzeugen und Löschen des Teilobjekts). Die Klasse des Gesamtobjekts (*StdLink*) entsteht durch Mehrfachvererbung aus den Proxis der Teilmodule. Der zweistufige Ansatz unter Nutzung der Proxyhierarchie erlaubt die Trennung des Codes der Schnittstellen und der Implementierung. Innerhalb der Teilmodule sind nur Referenzen vom Typ der

Basisklasse des Gesamtobjekts und nicht vom eigentlichen Typ des Gesamtobjekts bekannt. Dadurch kann zum Beispiel bei Verwendung der Programmiersprache C++ ein rekursives Einbinden von Headerdateien vom Ansatz her vermieden werden. Innerhalb der Module kann die Referenz auf die Gesamtbasisklasse verwendet werden, um mittels Cast auf andere Teilmodule zugreifen zu können. Bei der Initialisierung von Referenzen mittels einer Referenz auf das Gesamtobjekt (jeweils vom Basisklassentyp) erfolgt in C++ ein impliziter Cast, das heißt, er muß nicht explizit programmiert werden. Dieser implizite Cast ist typsicher. Laufzeittypinformation wird nicht benötigt.

Neben der statischen Bindung wurde auch eine dynamische Bindung konzipiert, die aber nicht implementiert wurde. Dabei werden die Teilobjekte in einem Container abgelegt, der das Gesamtobjekt repräsentiert (siehe Bild 5.2). Auf die Teilobjekte kann

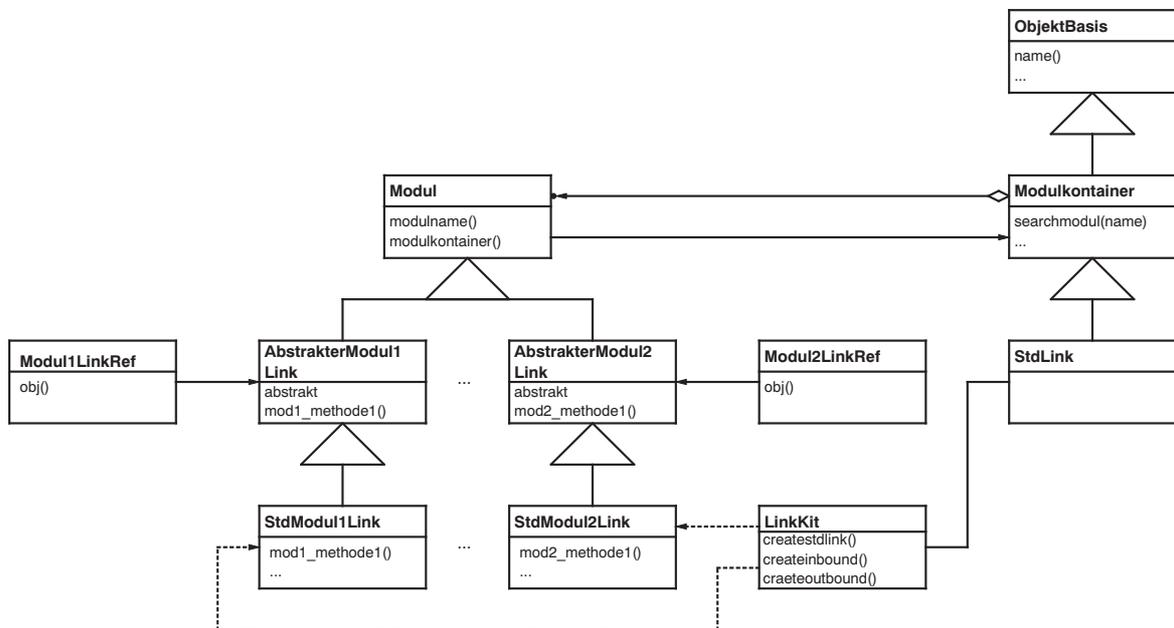


Abbildung 5.2: Dynamischer Modulaufbau

mittels eines speziellen Referenzproxies zugegriffen werden. Diese Referenzklasse beinhaltet in ihrem Konstruktor eine explizite Typkonvertierung (Cast), der ebenfalls keine Laufzeittypinformation in Anspruch nehmen muß.

Dies entspricht dem Muster *Facette* (*facet*, GAMMA (1996)). Es wird in ähnlicher Form auch in ORBIT (SCHMID und SACHSE (1995) beziehungsweise SACHSE (1998)) verwendet.

Module bestehen für alle wesentlichen Teilaspekte des Steuerungsverfahrens. So werden zum Beispiel die Realdatenaufbereitung, die makroskopische kantenorientierte Verkehrsflußmodellierung, die netzhafte Verkehrsflußmodellierung, die Kalmanfilterung

und das Steuerungsmodell jeweils in einem eigenen Modul verwaltet. Zusätzliche Module werden für die räumlich-logische Datenorganisation und den Datenaustausch zwischen den Algorithmusmodulen verwendet.

5.2.2 Räumlich-logische Datenverteilung

Die Daten und Methoden von Telematikalgorithmen können oft topographischen Orten zugeordnet werden. Bild 5.3 zeigt die wichtigsten im Rahmen der Arbeit implementierten Klassenstrukturen zur räumlich-logischen Datenverteilung. Das Netz, die Kanten, Subkanten und Segmente unterliegen der Modulbildung. Die Kanten, Subkanten und Segmente sind jeweils auch Klassenfamilien. Ein Verkehrsnetz ist in Kanten einteilbar

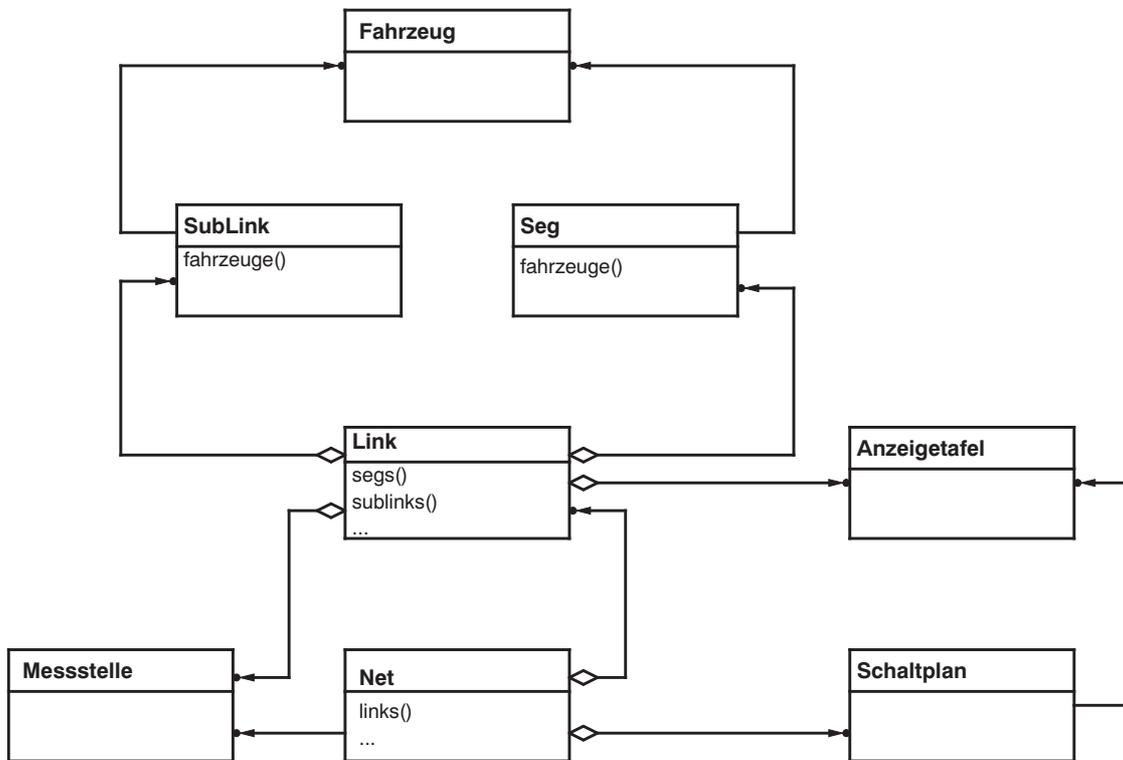


Abbildung 5.3: Räumlich-logische Datenaufteilung

und die Kanten in Segmente und Subkanten. Knoten werden in der Implementierung nicht benötigt. Die Daten und auch Algorithmen können über diese Objekte verteilt werden. Dieses Muster wird ohne Bildung von Modulen und Klassenfamilien zum Beispiel auch in der Implementierung von SIMONE angewendet (MEISSNER (1997)). Einige Daten werden Objekten zugeordnet, die Anlagen wie Meßschleifen, Wechselverkehrszeichen und ähnliches repräsentieren. Diese wiederum werden über die Netzelemente referenziert; gegebenenfalls wird der Zugriff auch von mehreren Ebenen gewährt – zum

Beispiel besitzt ein Netz die Referenz auf alle Meßschleifen im Netz und ein Link auf alle Meßschleifen auf der betreffenden Kante; jede Meßschleife wird doppelt referenziert. Der zusätzliche Speicheraufwand ermöglicht Laufzeitgewinne durch kostengünstigere Suchalgorithmen und Iteratoren sowie einfachere Programmstrukturen.

Die Segmente dienen zur makroskopischen Diskretisierung des Ortes. Eine Kante wird örtlich der Länge nach in Segmente eingeteilt und logisch oder örtlich der Breite nach in Subkanten. Mittels der Subkanten werden unterschiedliche Zielströme modelliert. In einer mikroskopischer Modellwelt könnten mit den Subkanten die Fahrstreifen nachgebildet werden. Mittels der Segmente und Subkanten wird über den Kanten ein zweidimensionaler beziehungsweise unter Beachtung der Teilmodule ein dreidimensionaler Daten- und Methodenraum aufgespannt. Dieser dreidimensionale Methodenraum wird durch die Klassenfamilien zusätzlich erweitert.

Das Fahrzeug spielt in der makroskopischen Modellvorstellung nur eine untergeordnete Rolle; im Rahmen dieser Arbeit wird es nur zur Reisezeitberechnung nach den Formeln 4.20 und 4.21 verwendet.

Die Anzeigetafeln sind entsprechend ihrem physikalischem Standort den Kanten zugeordnet. Zudem existiert eine logische Zuordnung zu Schaltplänen, die ihrerseits dem Netz zugeordnet sind.

Die Kanten, Subkanten, Segmente, Meßstellen und Anzeigetafeln beziehungsweise Schaltpläne werden jeweils in einem eigenen Modul verwaltet.

5.2.3 Klassenfamilien

Ähnliche, aber nicht gleiche Klassen werden in Klassenfamilien mit gemeinsamer Basisklasse beziehungsweise Schnittstelle eingeteilt. So unterteilen sich die Kanten des Netzgraphen in Standardkanten, Einfahrten und Ausfahrten (siehe Bild 5.4). Jede die-

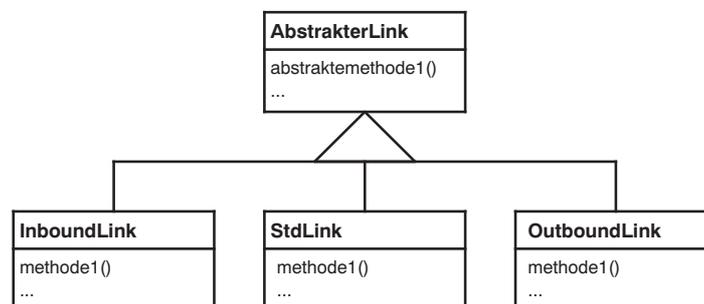


Abbildung 5.4: Klassenfamilien

ser Kantenart wird von einer eigenen Klasse repräsentiert. Diese Klassen sind von einer

Basiskantenklasse abgeleitet, die die Schnittstellen für die Kanten sowie gemeinsame Teile der Implementierung beinhaltet. Dies ist im wesentlichen das Muster *Strategie* (*strategy*, GAMMA ET AL. (1996)). Je nach Kantenart liefern die Methoden (Strategien, Algorithmen) unterschiedliche Ergebnisse. Die Einfahrten und Ausfahrten dienen zum logischen Abschluß des Netzes; sie sind zum Beispiel bei der Versorgung der netzhaften Simulation zur externen Bewertung mit Meßdaten von Relevanz, da in diesem Fall nur die Meßstellen auf Einfahrten verwendet werden.

Neben den Kanten gibt es bezüglich der räumlich-logischen Datenverteilung noch die Klassenfamilien der Subkanten und Segmente. Die Subkanten teilen sich entsprechend der Kanten ebenfalls in `StdSul`, `InboundSul` und `OutboundSul` auf. Die Segmentfamilie besteht aus den Klassen `StdSeg`, `InbufSeg`, `OutbufSeg`, `InboundSeg`, `OutboundSeg` und `MesSeg`:

- Das längenbehaftete Standardsegment dient zur makroskopischen Segmentierung der Kanten. Es ist die Basis für die im Abschnitt 3.3 beschriebene linienhafte Verkehrsflußmodellierung.
- `InbufSeg` und `OutbufSeg` dienen als Eingangssegment und Ausgangssegment einer Kante. Sie modellieren die logischen Segmente am Knoten, die zu der im Abschnitt 3.4 beschriebenen netzhaften Verkehrsflußmodellierung benötigt werden.
- `InboundSeg` und `OutboundSeg` modellieren die Netzgrenzen. Sie werden für die aus SACHSE (1998) übernommene Verkehrsumlegung verwendet.
- `MesSeg` ist wie die vier vorhergehend beschriebenen Segmentarten ein logisches Segment ohne physikalische Länge und modelliert eine Meßstelle. In der Verkehrsflußsimulation zur externen Bewertung werden mittels der Meßstellensegmente virtuelle Meßquerschnitte gebildet. Zudem modellieren die Meßstellensegmente auch die realen Meßquerschnitte.

5.2.4 Interne Datenschnittstellen

Eine Gruppe von Modulen dient einzig und allein einem definierten Datenaustausch. Ziel ist es, verschiedene Algorithmen untereinander beliebig koppeln zu können, ohne daß die Zugriffsfunktionen auf die benötigten Daten geändert werden müssen (siehe Bild 5.5). Aus Sicht des `ReglerStdLink` ergibt sich kein Unterschied, wenn der `BeobacherStdLink` gegen einen anderen (z.B. `SimulationStdLink`) ausgetauscht wird, da er seine Daten nicht direkt von diesem, sondern einem `DatenStdLink` bezieht. Dieses Muster entspricht einem Vermittler (GAMMA ET AL., 1996), wobei der eigentliche Vermittler lediglich aus wenigen Funktionsaufrufen besteht, die die Kopplung über die Datenmodule steuern.

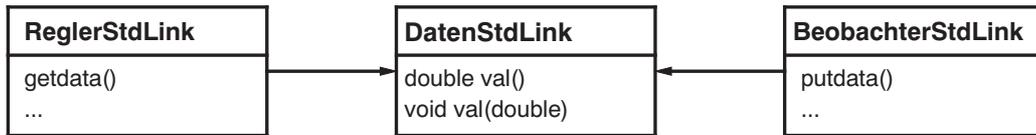


Abbildung 5.5: Datenschnittstellen

5.3 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde stellvertretend nur ein Teilbereich der Implementierung erläutert, die wesentlich auf den beschriebenen Entwurfsmustern basiert. Neben den Entwurfsmustern wurden zum Teil auch weniger flexible herkömmliche Ansätze verwendet, so daß zum Beispiel die Lesefunktionalität der statischen Daten sowie die Initialisierung nicht gekapselt und austauschbar sind. Die Quelltextlänge der in dieser Arbeit beschriebenen Verkehrs- und Steuerungsmodelle beträgt ohne der übernommenen Module (Realdatenaufbereitung und Schätzung der Kordonmatrix) aber mit der Interprozeßkommunikation und den Kommentaren über 60000 Zeilen. Die Erfahrungen haben gezeigt, daß dieser Umfang nur unter Nutzung der oben beschriebenen Entwurfsansätze sinnvoll handzuhaben ist.

Die Klassenfamilien vermeiden „wenn-dann“ Abfragen und tragen somit zur Übersichtlichkeit der Implementierung bei. Die Modulverwaltung erlaubt die Unterteilung der Software in Module; auf diese Weise sind die unterschiedlichen Verkehrs- und Steuerungsmodelle unabhängig voneinander. Die räumlich-logische Datenverteilung erlaubt zum einen eine strukturierte Verwaltung von Daten, so daß herkömmliche Datenfelder nicht mehr benötigt werden; die damit verbundenen Probleme der Indizierung entfallen. Zum anderen können auch die Algorithmen auf den unterschiedlichen Ebenen der Datenverwaltung implementiert werden – zum Beispiel eine makroskopische Simulation auf Segmentebene und der Empfang von Meßdaten auf Netzebene. Die internen Datenschnittstellen erleichtern den Austausch von Algorithmen. Auf diese Weise entsteht eine flexible Entwicklungsumgebung; aber auch im praktischen Einsatz können diese Schnittstellen genutzt werden, zum Beispiel um ein System auf ein neues im Labor entwickeltes Verkehrsmodell zu erweitern.

Kapitel 6

Anwendung und Bewertung des Steuerungsverfahrens

6.1 Einleitung

Das Verfahren wird so weit wie möglich mit Hilfe von Realdaten untersucht und bewertet. Zur Untersuchung und Bewertung des geschlossenen Regelkreises wird auf eine Simulation zurückgegriffen. Die Simulation wird ebenfalls mit Realdaten eines Testfelds versorgt, um wirklichkeitsnahe Bedingungen zu schaffen. Die Verbesserungspotentiale im Testfeld werden in einem eigenen Abschnitt beschrieben.

Die einzelnen Teilbausteine des Verfahrens werden zunächst getrennt voneinander validiert. Die Verkehrsmodelle werden mittels Realdaten, die Steuerungsmodelle, also die Kombinationen der Umleitungsalgorithmen und Umleitungsregler (siehe 4.5.5) werden anhand der Simulation getestet. Die Daten, die gewöhnlich der Zustandsschätzer liefert, werden direkt aus der Simulation übernommen. Durch die Simulation des geschlossenen Regelkreises können auch Aussagen über die Stabilität getroffen werden.

Abschließend werden die Verkehrsmodelle und Steuerungsmodelle gemeinsam mittels der Simulation des geschlossenen Regelkreises bewertet:

- Die Konvergenz des Verfahrens kann direkt aus den zeitlichen Ganglinien der Reisezeiten überprüft werden.
- Der Nutzen des Verfahrens wird mittels der jährlichen Einsparung an summierter Reisezeit quantifiziert. Durch die Verwendung eines einheitlichen Referenzszenariums der verkehrlichen Gegebenheiten sind die Ergebnisse vergleichbar.
- Anhand der Auswertung der ersten beiden Kriterien werden die Modellparameter verifiziert.

Zwischen den Autobahnkreuzen Neufahrn und München Nord gibt es eine Route über die A9, die im folgenden als Hauptroute bezeichnet wird, und deren Länge circa 10 km beträgt. Alternativ dazu kann man über die A92, das Autobahndreieck Feldmoching und die A99 fahren; diese Strecke mit circa 20 km Länge wird als Alternativroute bezeichnet.

Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, zwischen der Anschlußstelle Lohhof und der Anschlußstelle Neuherberg die Bundesstraße B13 zu nutzen. Die Verkehrssituation auf dieser Bundesstraße wird nicht erfaßt. Diese Straße kann daher nicht explizit als zusätzliche Alternativroute verwendet werden. Im Falle einer Umleitungsempfehlung verlassen dennoch nennenswerte Fahrzeugströme bis zu 1000 *Fzg/h* die A92 an der Anschlußstelle Lohhof. Die B13 führt daher zu einer Reduktion der Reisezeiten auf der eigentlichen Alternativroute, wodurch sie zumindest implizit verwendet wird.

Ab der Anschlußstelle Neuherberg gibt es die Möglichkeit, über (die B13 und) die Ingolstädter Straße anstatt über die A99, das Autobahnkreuz München Nord und die A9 nach München zu fahren. Die Ingolstädter Straße besitzt zwei Spuren mit Lichtsignalanlagen und somit eine reduzierte Kapazität; aus städtebaulichen Gründen ist die gezielte Einleitung von Verkehrsströmen nur unter Einhaltung enger Randbedingungen möglich. Hierzu wurde ein Verfahren (AIDA) zur Verkehrszustandsanalyse in innerstädtischen Netzen entwickelt (HANGLEITER und KÜHNE, 1999), das im Rahmen eines Feldtests mit VARIA verbunden wurde (TSAVACHIDIS ET AL., 1998). Dieses Verfahren wurde nicht in die Simulation eingebunden werden, so daß die Route über die Ingolstädter Straße ebenfalls nur implizit berücksichtigt wird.

Wechselwegweiser befinden sich aus Norden in Richtung Süden am Kreuz Neufahrn. Es können sowohl aus Richtung Nürnberg (Entscheidungspunkt 1) als auch aus Richtung Deggendorf (Entscheidungspunkt 2) die Ziele München und München + Salzburg gezeigt werden (siehe Bild 6.2). werden. Zusammen mit dem Nullfall könnten insgesamt neun verschiedene Zielpläne generiert werden. Die vorhandene Anlage erlaubt 6 Zielpläne KLÖFKORN ET AL. (1991), die in Tabelle 6.1 zusammengefaßt sind. Die

Plan	Entscheidungspunkt 1	Entscheidungspunkt 2
N0	-	-
N1	-	München
N2	-	München + Salzburg
N3	München	München
N4	München	München + Salzburg
N5	München + Salzburg	München + Salzburg

Tabelle 6.1: Zielpläne von Norden

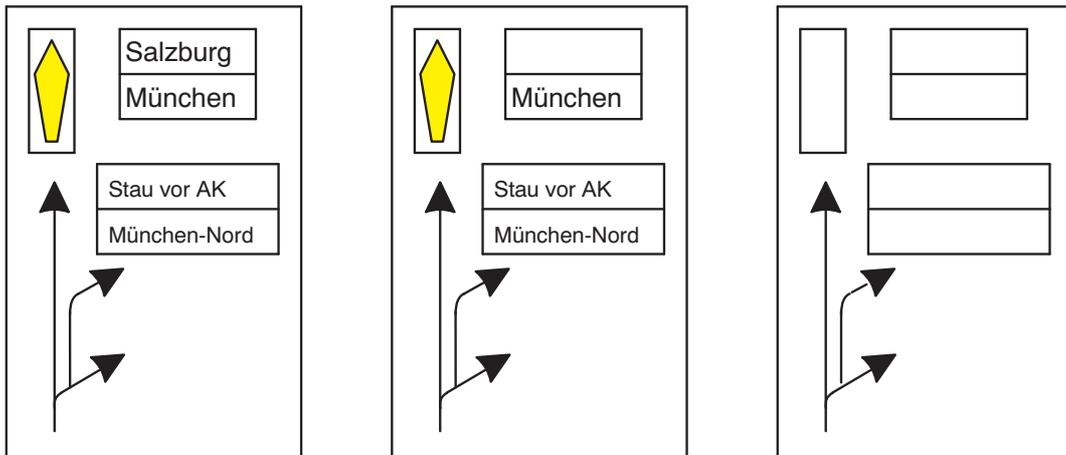


Abbildung 6.2: Die Anzeigetafeln und beeinflussbare Ziele

additiven Wechselwegweiser können neben den Zielen auch noch die Zusatzinformation „Stau vor München Nord“ beziehungsweise „Stau vor München“ anzeigen. Diese Zusatzinformationen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die Schaltpläne aus Süden in Richtung Norden sind in Tabelle 6.2 zusammengefaßt. Aus Richtung Süden ist

Plan	Entscheidungspunkt 3	Entscheidungspunkt 4
M0	-	-
M2	-	Flughafen
M3	Flughafen	-
M5	Flughafen	Flughafen
M6	Flughafen	Flughafen + Nürnberg
M7	Flughafen + Nürnberg	Flughafen + Nürnberg

Tabelle 6.2: Zielpläne von Süden

die Zusatzinformation „Stau“ beziehungsweise „Staugefahr“ möglich. Die Schaltpläne M 1 und M4 besitzen dieselbe Zielinformation wie M2 und M5 mit lediglich unterschiedlichen Zusatzinformationen und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht getrennt betrachtet.

Das bestehende Steuerungssystem erlaubt neben der Automatik nach dem Dernbach/Koblenz-Algorithmus auch manuelle Steuereingriffe; die realen Schaltungen werden neben den Verkehrsdaten protokolliert und können so für eine Realdatenvalidierung der Akzeptanzschätzung verwendet werden.

Potentiale im Testfeld

Untersuchungen in SACHSE (1998) zeigen, daß das Potential bezüglich der Reduktion der Reisezeiten im Münchner Testfeld aufgrund der großen Längendifferenz zwischen Haupt- und Alternativroute im Testfeld begrenzt ist. Allerdings zeigt sich in den teils vergleichsweise großen beeinflussten Fahrzeugströmen aus Richtung Norden, daß zumindest aus Sicht der Verkehrsteilnehmer ein Potential vorhanden ist, unter Umständen unter Nutzung der B13 und der Ingolstädter Straße. Im Abschnitt 4.4.3 wurden vier Fälle bezüglich des Auftretens von Störungen unterschieden. Diese wurden anhand des Ortes der Ursache und des Ortes der Wirkung klassifiziert.

Der Fall 1 (interne Ursache und interne Wirkung) entsteht im Testfeld nur in Folge von Unfällen und Baustellen und ist daher sehr selten. Das langfristige Potential dieses Falles ist im Testnetz eher gering einzustufen. Allerdings kann es ein kurzfristig sehr großes Potential geben.

Der Fall 2 (interne Ursache und externe Wirkung) entsteht im Testnetz besonders auf der A99 aus Richtung Salzburg vor und im Autobahnkreuz München Nord. Die Ursache ist die Überlastung der A9 durch die summierten Ströme aus Salzburg und München sowie die Verflechtungsvorgänge zwischen beiden Strömen. Umleitungsempfehlungen auf die A99 beziehungsweise A92 können die Situation entschärfen; allerdings ist das Nutzeroptimum oft nicht ganz gegeben, da der Stau auf der Rampe zur A9 nur eine Länge von maximal 1.7 km besitzen kann. Dennoch wird die Schaltung von den Verkehrsteilnehmern angenommen (KRUX ET AL., 1997). Dieses Szenarium kommt häufig vor, so daß das langfristige Potential groß sein kann. Dasselbe Szenarium entsteht manchmal auf der A92 aus Richtung Deggendorf im Autobahnkreuz Neufahrn; dort entsteht es oft zusammen mit dem typischen Szenarium des Falles 3.

Der Fall 3 (externe Ursache und interne Wirkung) entsteht am auffälligsten aus Richtung Norden. Im Autobahnkreuz München Nord verursachen die Spurwechselforgänge Rückstauungen. Der Störungsort befindet sich logisch nach dem Autobahnkreuz beziehungsweise außerhalb des Alternativroutenpaares, da umgeleitete Fahrzeuge wieder an den Verflechtungsvorgängen beteiligt sind, wenn sie ihre kordonbezogenen Ziele nicht ändern. Dieses Szenarium kann daher berücksichtigt werden, weil sich im Fall von Umleitungsempfehlungen oft die kordonbezogenen Verkehrsbeziehungen ändern, und ein großer Fahrzeugstrom die Alternativroute an der Anschlußstelle Lohhof verläßt. Allerdings lassen sich die Wirkungen des umgeleiteten Fahrzeugstroms auf der B11 nicht und auf der Ingolstädter Straße nur indirekt ermitteln. Das Szenarium tritt sehr häufig auf und verspricht daher ein großes Potential.

Der Fall 4 (externe Ursache und externe Wirkung) entsteht in Richtung Salzburg im Zusammenhang mit der Messe Riem als Folge der geringen Leistungsfähigkeit des städtischen Straßennetzes. Es entsteht auf der A99 ein Rückstau aus Richtung Salz-

burg, der im Extremfall bis in das Alternativroutennetz reicht (Fall 3). Dieser Stau kann an den Entscheidungspunkten am AK Neufahrn berücksichtigt werden, wenn eine Erweiterung des Netzumgriffes vorgenommen wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Szenarium des Falles 3 verwendet, unter der von der Realität bestätigten Annahme, daß umgeleitete Fahrzeuge zu keinem Rückstau auf der A99 vor dem AK München Nord führen.

6.2.2 Netzmodell

Bild 6.3 zeigt das Netzmodell des Testfeldes. Der abgebildete Netzumgriff besteht aus den Autobahnen A9, A92 und A99 mit den Autobahnkreuzen Neufahrn und München Nord und dem Autobahndreieck Feldmoching. Es werden zudem alle Anschlußstellen abgebildet. Die Bundesstraße B13 und die Ingolstädter Straße werden nicht modelliert, da für diese keine Verkehrsdaten vorliegen.

Die Abbildung des Netzes erfolgt kantenorientiert. Zu den Grunddaten einer Kante gehören die Folgekanten, die Vorgängerkanten und die Länge der Kante. Die Längen wurden auf 50 m genau ermittelt. Hierzu wurden die Anlagenpläne und, für die Autobahnkreuze und das Dreieck, Pläne im Maßstab 1:1000 verwendet. Kantenlängen unter 200 m wurden wegen der zur Simulation und Zustandsbeobachtung verwendeten makroskopischen Modelle vermieden. Den Kanten werden die jeweiligen Meßquerschnitte zugeordnet. Der Meßquerschnitt selbst wird über seine anlagentechnische ID-Nummer referenziert. Die Lage der Meßquerschnitte wird über eine Längenangabe relativ zum Kantenanfang referenziert; damit wird vermieden, daß eine Meßstelle aufgrund der Summe kleiner Fehler in der Ortsangabe auf eine falsche Kante gezogen wird. Die Kanten werden über ihren Namen referenziert. Es wurden zwei Vorgehensweisen zur Wahl der Namen in Betracht gezogen:

- Die Namen der Kanten werden aus den ID-Nummern der Meßquerschnitte gebildet. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der einfachen Zuordnung der Meßquerschnitte. Der Nachteil liegt in einer schweren Zuordnung der Kanten zum Netz bezüglich ihrer genauen örtlichen Lage.
- Die Namen der Kanten werden aus der Autobahnnummer, der Autobahnkilometrierung und der Fahrtrichtung gebildet.

Es wurde die erste Vorgehensweise gewählt, da es in der Regel einfacher ist, sich die qualitative räumliche Lage der Meßquerschnitte und darauf basierend die Kanten zu merken, als die Meßquerschnitte mit Hilfe der Kilometrierung auf die Kanten zu referenzieren.

Die Netzgrenzen werden durch logische Kanten, die keine Länge besitzen, modelliert. Den Netzgrenzen wird jeweils ein Meßquerschnitt zugeordnet. Das Netz ist so aufgebaut, daß eine Netzgrenze weder mehrere Folgekanten besitzt noch in eine Kante mit

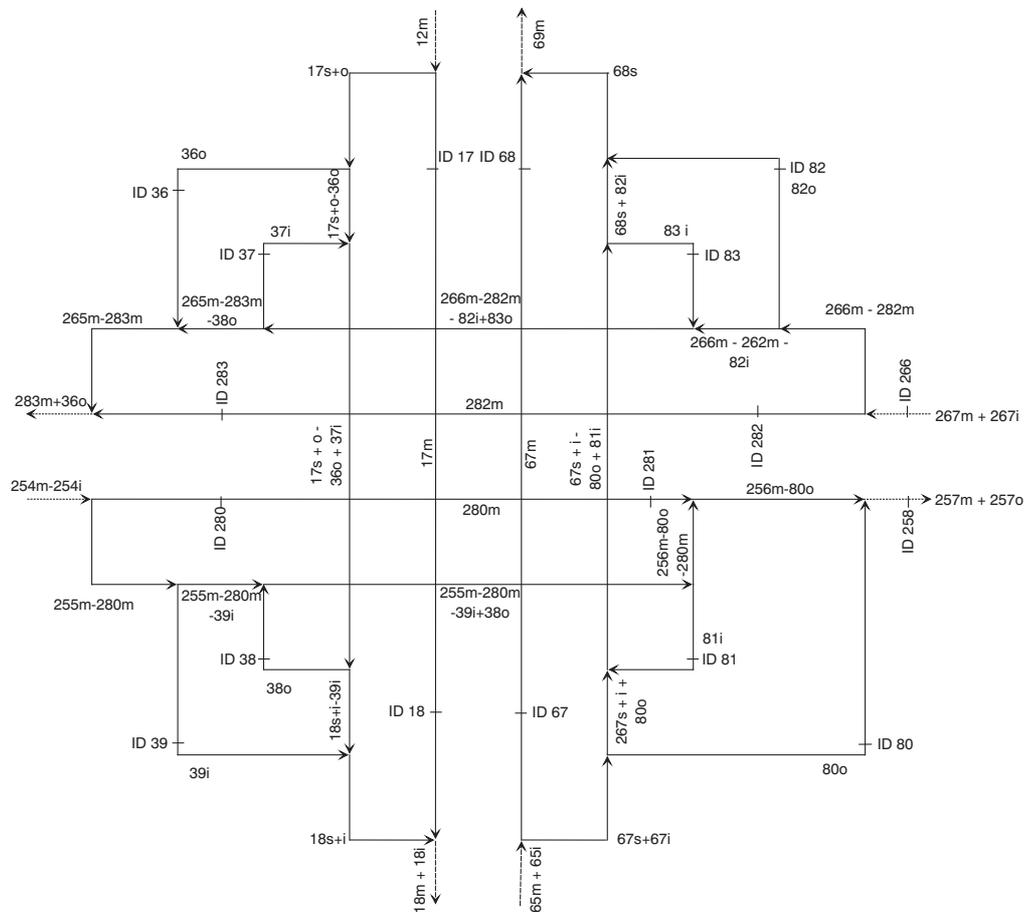


Abbildung 6.5: Netzgraph des Autobahnkreuzes Neufahrn

6.3 Dynamische Simulation des Verkehrsablaufes im Testfeld

6.3.1 Ansatz

Das Testnetz wird dynamisch unter Nutzung von Realdaten nachgebildet. Die Architektur der Simulation wurde bereits im Abschnitt 2.8.7 beschrieben. Die Realdaten der Datenerfassung und -aufbereitung werden auch ohne die übrigen Module der Simulation verwendet, um die Verkehrsmodelle zu validieren. Mittels der Schätzung der Kordonmatrix und der makroskopischen Verkehrsflußsimulation wird ein Szenarium nachgebildet, das als Grundlage der Bewertung der unterschiedlichen Ausprägungen des Steuerungsverfahrens im Regelkreis dient.

Nachfolgend werden die einzelnen Module der Simulationsarchitektur aus Abschnitt 2.8.7 beschrieben.

6.3.2 Realdaten

In diesem Abschnitt wird die Beschreibung der Datenaufbereitung 1 und 2 zusammengefaßt. Die Realdaten liegen in Form von Minutenwerten für die Größen Geschwindigkeit und Verkehrsfluß vor. Die Geschwindigkeit wird dabei über diese Minute gemittelt; der Verkehrsfluß ergibt sich aus der Summe der während der Minute über den Meßquerschnitt gefahrenen Fahrzeuge. Die Daten können beginnend von einem vorgebbaren Datum und einer vorgebbaren Uhrzeit abgerufen werden. Die Daten werden in zwei Schritten durch Mittelwertbildung geglättet. Während der ersten Glättung wird auch eine Fehlerbehandlung durchgeführt. Für kurzzeitig ausgefallene Meßquerschnitte werden die Daten der letzten Messung verwendet. Die makroskopische Simulation wird mit Daten aus dieser ersten Glättungsstufe gespeist. Das Zeitfenster für diese Glättung wird zu einer Minute (für die Validierung des Kalmanfilters) und fünf Minuten (für die Simulation) eingestellt. Die Matrixschätzung wird mit den Daten der zweiten Glättungsstufe gespeist. Die zweite Glättungsstufe wird in Abhängigkeit von der ersten Stufe so konfiguriert, daß die Daten über 30 Minuten gemittelt werden.

Die Implementierung der Datenversorgung wie auch die nachfolgend beschriebene Schätzung der Kordonmatrix wurde aus SCHMID und SACHSE (1995) übernommen und mittels Interprozeßkommunikation in die übrige Implementierung eingefügt.

6.3.3 Schätzung der Kordonmatrix

Die Matrixschätzung benötigt als Eingangsgrößen die gemittelten Meßdaten und liefert die Verkehrsbeziehungen beziehungsweise Kordonströme. Ein Kordonstrom ist die Fahrzeugmenge, die von einer bestimmten Einfahrt (Quelle) zu einer bestimmten Ausfahrt (Ziel) fließt. Das eingesetzte iterative Verfahren basiert im wesentlichen auf PLOSS (1993). Neben der Matrix des Netzes, die die Kordonströme beinhaltet, liefert dieses Verfahren unter Nutzung einer Umlegung auch eine Kordonmatrix für alle Kanten, so daß bekannt ist, von welchen Verkehrsströmen die jeweilige Kante benutzt wird. Das Verfahren berücksichtigt allerdings nicht die Reisezeiten im Netz. Das Mittelungsintervall muß daher so gewählt werden, daß möglichst viele Fahrzeuge, die während des Intervalls in das Netz fahren, dieses während des gleichen Intervalls auch wieder verlassen. Andererseits sollten auch zeitliche Schwankungen der Verkehrsbeziehungen gut nachgebildet werden.

Im Rahmen der Validierung ist die Routenaufteilung für den Fall interessant, daß kein Zielplan geschaltet ist. In den Zeiten, in denen die Realdaten für die Validierung interessant sind, weil ein Umleitungspotential vorhanden ist, wurde die reale Wechselwegweisungsanlage oft tatsächlich geschaltet. Daher wird in der Matrixschätzung eine Einscheibenumlegung verwendet, um auch im Falle einer Schaltung die Verhältnisse im Nullfall nachbilden zu können. Dies ist unkritisch, solange es im Nullfall eindeutige Wunschrouten für die Verkehrsströme im Netz gibt. Mit der Einscheibenumlegung wird

nicht berücksichtigt, daß im Falle einer Umleitung sich nicht nur die Routenaufteilung, sondern auch die Verkehrsbeziehungen bezüglich des Kordons ändern können.

6.3.4 Verkehrsflußmodell

Das Verkehrsflußmodell besteht aus folgenden Komponenten:

- Die Anwendung deterministischer Warteschlangenmodelle an den Zufahrten verhindert, daß Fahrzeuge verloren gehen oder zu hohe Dichten entstehen, wenn die Zufahrten überstaut sind (siehe Abschnitt 3.3.6).
- Fundamentaldiagramme dienen als Parameter für das dynamische Verkehrsflußmodell (siehe Abschnitt 3.2). Im Netz wird auf das Fundamentaldiagramm nach Gleichung 3.8 zurückgegriffen. Die globalen Parameter werden gesetzt zu:

$$a = 1.55 \quad (6.1)$$

$$b = 4 \quad (6.2)$$

$$k_{max} = 100 \text{ Fz}/(\text{km Fahrstreifen}) \quad (6.3)$$

$$V_f = 130 \quad (6.4)$$

$$(6.5)$$

Damit ergibt sich eine (statische) Kapazität von $2000 \text{ Fz}/(\text{h Fahrstreifen})$. Engstellen werden mit dem Fundamentaldiagramm nach Gleichung 3.4 modelliert. Die Parameter V_f und k_{max} werden so eingestellt, daß die gewünschte statische Kapazität erreicht wird.

- Das dynamische Verkehrsflußmodell unter Nutzung des erweiterten CREMER/ PAYNE-Modells bildet den linienhaften Verkehr zwischen Verzweigungen ab. Die Parameter werden aus der Beschreibung in Abschnitt 3.3.5 übernommen.
- Das zweidimensionale Netzstrommodell dient zur netzhaften Abbildung des Verkehrs an Verzweigungen (siehe Abschnitt 3.4.3). Es werden alle Ziele des Netzumgriffs als eigene Routenebene simuliert. Den Zielen werden Routenebenen zugeordnet, die beeinflußt werden; die Routenebenen werden mit dem Namen der jeweiligen Ausfahrt im Netzmodell gekennzeichnet (siehe Tabelle 6.3).

Teilweise werden am AK Neufahrn Abbiegeraten von 0.4 beobachtet (KRUX ET AL., 1997); daraus läßt sich ableiten, daß die Akzeptanzraten der beeinflussbaren Zielströme größer als 0.4 sein können und unter Berücksichtigung geschätzter Kordonmatrizen (SACHSE, 1998) auch Werte über 0.5 annehmen. Hierbei muß auch der Effekt der Änderung der Kordonmatrix berücksichtigt werden; dieser bewirkt, daß sich Akzeptanzraten über 1 ergeben können, wenn die Wirkung des Zielstromes Lohhof auf den Zielstrom München bezogen wird, ohne zu berücksichtigen, daß der Zielstrom Lohhof im Falle einer Schaltung zum Großteil München als eigentliches Ziel besitzt. In der Beschreibung des Szenariums werden die Akzeptanzraten so gewählt, daß dieses Problem berücksichtigt wird.

Ziel	Routenebenen
München	31o, 32o, 33o, 34m
Salzburg	304o, 304m
Flughafen	257o, 258i, 258m
Nürnberg	69m

Tabelle 6.3: Modellierung der Zielströme

6.4 Parametrisierung des Steuerungsverfahrens

6.4.1 Kalmanfilter

Der Verkehrszustand im Netz wird von mehreren Kalmanfiltern geschätzt. Die Kalmanfilter werden unter Nutzung des Netzmodells automatisch generiert. Ein Kalmanfilter beinhaltet keine Meßquerschnitte, die nicht entweder an einem Zufluß oder Abfluß des Netzumgriffes des Filters liegen. An jedem Meßquerschnitt beginnt und/oder endet ein Kalmanfilter. Liegt ein Meßquerschnitt näher als 200 *m* an einem Kantenanfang oder Kantenende, so wird der Meßquerschnitt abhängig von seiner Lage am Kantenanfang beziehungsweise am Kantenende oder aber genau in der Entfernung von 200 *m* als minimaler Segmentlänge vom Kantenanfang oder -ende plaziert. Diese Regeln wurden im Rahmen eines Praktikums (POPOVIĆ, 1997) in einen sequentiellen Algorithmus umgeformt und implementiert.

Die Anzahl der Segmente wird so gewählt, daß ein Kalmanfilter pro Meßquerschnitt nicht mehr als drei Segmente besitzt; dadurch bleibt die Beobachtbarkeit gegeben (CREMER und BREDEHÖFT, 1988). Unter Nutzung dieser Initialisierungsvorschriften entstehen im Testfeld vier verschiedene Typen von Filterteilnetzen. Diese vier Typen sind in Bild 6.6 zusammengefaßt. In Typ c und Typ d werden im Gegensatz zu

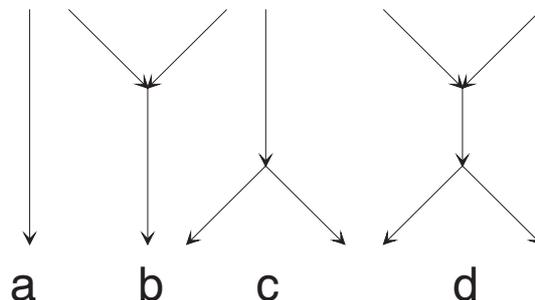


Abbildung 6.6: Typen von Kalmanfilter

Typ a und Typ b auch Abbiegeraten geschätzt. Das Fundamentaldiagramm wird nach GREENSHIELDS (1935) beziehungsweise der Formel 3.4 gewählt. In den Typen b, c und

d werden mehrere freie Geschwindigkeiten für die einzelnen Äste der Kalmanteilnetze geschätzt. Als Verkehrsflußmodell kommt das nicht erweiterte Modell nach CREMER/PAYNE zum Einsatz. Aufgrund der unterschiedlichen Formeln zur Berechnung der Geschwindigkeit und des Verkehrsflusses werden damit vom qualitativen Verhalten her in der Verkehrsmodellierung und der externen Bewertung unterschiedliche Modelle eingesetzt.

6.4.2 Abbiegeratenschätzung

Es werden vier Abbiegeratenschätzer jeweils an den vier Entscheidungspunkten verwendet. Jeder Abbiegeratenschätzer wird mit einem an Realdaten gelernten (siehe Abschnitt 3.7.4) oder mit einem an der Simulation gelernten Neuro/Fuzzy-Approximator initialisiert. Die Schaltung wird entsprechend der drei anzeigbaren Zielen mit drei Fuzzyneuronen und die Tageszeit mit 13 Fuzzyneuronen abgetastet. Die Mittelpunkte der Fuzzyneuronen werden äquidistant angeordnet und nicht angepaßt, indem die Lernrate zu null gesetzt wird. Die Sugenoregeln werden mit einer Lernrate von $lr_2 = 0.005$ adaptiert.

6.4.3 Umleitungsalgorithmus

Im Netzumgriff werden zwei Alternativroutenpaare definiert. Die Routenpaare werden aus einer Hauptroute, einer Alternativroute und Entscheidungspunkten gebildet und über den Richtungsverlauf gekennzeichnet. Die Routen werden anhand ihrer Anfangs- und Endkante beschrieben.

Das Routenpaar Nord-Süd besteht aus der Hauptroute $18m+18i$ $25m+25i$, der Alternativroute $283m+36o$ $301m+301i$ und den Entscheidungspunkten 1 und 2 am Autobahnkreuz Neufahrn.

Das Routenpaar Süd-Nord besteht aus der Hauptroute $307m$ $254m+254i$, der Alternativroute $56m+56i$ $65m+65i$ und den Entscheidungspunkten 3 und 4 am Autobahnkreuz München Nord.

Im Umleitungsalgorithmus werden die im Abschnitt 4.4.6 beschriebenen unterschiedlichen Bewertungsfunktionen verwendet. In Abhängigkeit von der Bewertungsfunktion und den systematischen Fehlern der Verkehrsmodellierung müssen die Parameter des Umleitungsalgorithmus unterschiedlich gesetzt werden. Die Parameterwerte werden in den Beschreibungen der Ergebnisse angegeben (siehe Abschnitt 6.6).

6.4.4 Umleitungsregler

Im Umleitungsalgorithmus selbst wird nur die Art der jeweils verwendeten Schaltplanauswahl und Schaltplankorrektur konfiguriert. Eine Anpassung von Parametern muß

nicht erfolgen.

6.5 Verkehrsszenarien als verkehrliche Randbedingungen

6.5.1 Einleitung

Grundlage der Validierung ist die Auswahl von Szenarien. In den Szenarien werden die verkehrlichen Randbedingungen, an denen die Verkehrs- und Steuerungsmodelle validiert werden, so zusammengefaßt, daß sich eine qualitativ möglichst gute Nachbildung der Realität ergibt.

Während für die Validierung der Verkehrsmodelle nur kleine Ausschnitte des Netzumgriffes verwendet werden, wird zur Validierung der Steuerungsmodelle der gesamte Netzumgriff verwendet. Die Bewertung der Steuerungsmodelle geschieht am Routenpaar Nord–Süd.

Die Szenarien zur Bewertung der Verkehrsmodelle wurden bereits an früherer Stelle beschrieben (siehe Abschnitte 3.3.7, 3.5.5 und 3.7.3).

6.5.2 Überblick

Szenarien werden oft als Grundlage für Entscheidungsmatrizen im Steuerungsmodell verwendet. Das Risiko dabei ist, daß ein bestimmtes Szenarium im voraus oder zur Laufzeit nicht erkannt wurde, und das Steuerungsmodell für dieses dann versagt. Ein weiteres Vorgehen ist, Szenarien nur zur Validierung von Steuerungsmodellen zu verwenden, die selbst so unabhängig wie möglich von der Erkennung von Szenarien sind. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß das Steuerungsverfahren auch für solche Szenarien nicht versagt, für die es nicht validiert wurde.

Im Rahmen der Diplomarbeit THORMANN (1999) wurden unter Nutzung der Realdaten des Zeitraums April 1997 bis September 1997 für das Routenpaar Nord–Süd 15 unterschiedliche Szenarien identifiziert, die sich zum Beispiel an der Dynamik des Staus unterscheiden. Unter Berücksichtigung dieser Szenarien wird ein typischer Tag gewählt, der als Referenzszenarium verwendet wird. Unter Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den Szenarien und dem Referenzszenarium kann auch eine auf das Jahr bezogene Häufigkeit geschätzt werden, aus der das auf das Gesamtsystem bezogene Potential in Form von summierten Reisezeiten bezogen werden kann.

6.5.3 Das Referenzszenarium

Es werden Verkehrsdaten des 29.4.1997 ab 7:00 Uhr verwendet. Die Simulationsdauer beträgt 5000 *sec*. Dieser Tag ist der letzte Tag einer Folge von Tagen mit ähnlichem Abbiegeverhalten; er wurde daher auch zur Valierung der Abbiegeratenschaltung verwendet. An diesem Tag gibt es reale Schaltungen der Anlage. Bild 6.7 zeigt die Gang-

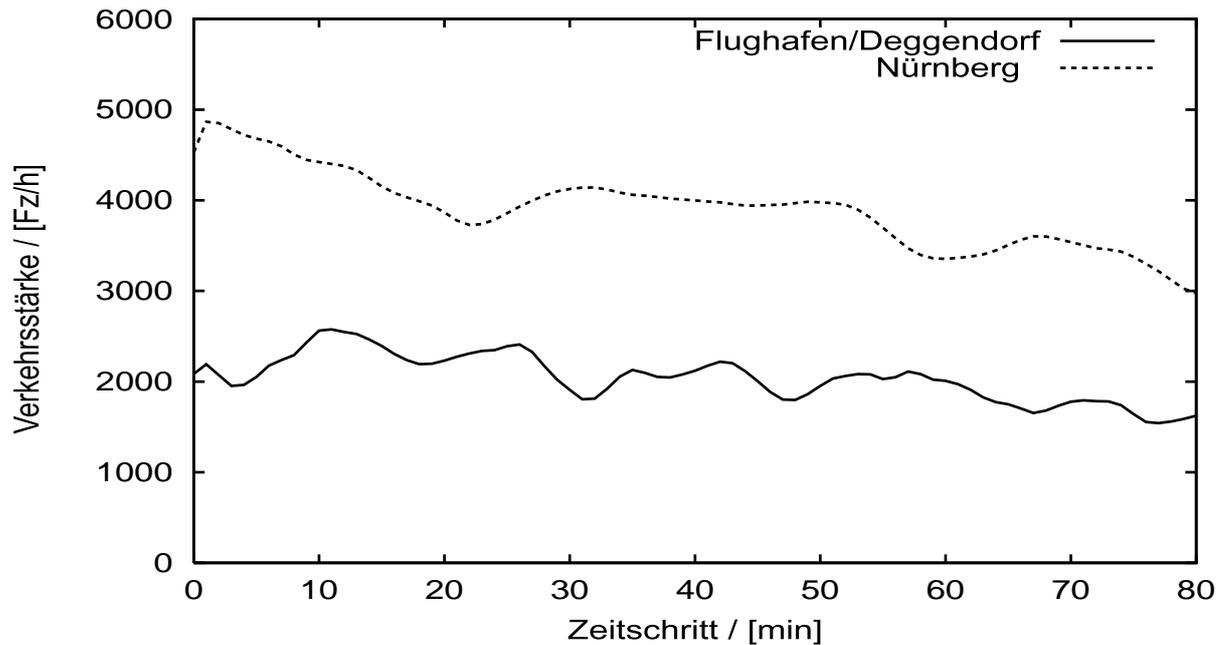


Abbildung 6.7: Nachfrageganglinie

linien der Nachfrage aus Richtung Nürnberg und aus Richtung Flughafen/Deggendorf am Autobahnkreuz Neufahrn. Die Ganglinien sind der Simulation entnommen, die aber mit realen Daten an den Zuflüssen stromaufwärts gespeist wird. Daraus ergeben sich auch in der Simulation Nachfrageschwankungen. Die Nachfrage bezüglich der Hauptroute beträgt unter Berücksichtigung der Kordonmatrix um die 5500 Fz/h .

Auf der Kante 25m+25i wird eine Engstelle mit einer Kapazität von 4300 Fz/h modelliert. In Wirklichkeit befindet sich die Engstelle am Anfang der Kante 29m+44i als Auswirkung der Verflechtung. Sie wurde aber auf die Kante 25m+25i verschoben, um die auch in der Realität nicht auftretenden Staus auf der Alternativroute zu vermeiden; somit wird implizit die Änderung der Kordonmatrix berücksichtigt. Die Verschiebung der Engstelle als Stauwende bewirkt auch eine Verschiebung des Stauanfanges, der sich so näher am Autobahnkreuz Neufahrn befindet als bei realen Schaltungen durch die Operatoren. Die reduzierte Kapazität von 4300 Fz/h entspricht der in der Realität beobachteten (siehe Abschnitt 3.3.7).

Unter Verwendung des erweiterten Verkehrsflußmodells befindet sich die Geschwindigkeit im Stau zwischen 20 km/h und 40 km/h verbunden mit einer vergleichsweise geringen Dichte von unter $50 \text{ Fz}/(\text{km Spur})$; diese Werte werden auch in der Realität beobachtet (siehe Abschnitt 3.3.7).

Bei einer nach KRUX ET AL. (1997) angenommenen Abbiegerate von 0.4 ergibt sich ein beeinflussbarer Strom von circa 2800 Fz/h . Unter Berücksichtigung der Kordonmatrix entspricht dies einer Akzeptanzrate von über 75 %. Aufgrund des tatsächlich vorhandenen Staus wird die Schätzung der Kordonmatrix dahingehend verfälscht, daß nicht die Kordonmatrix im Falle eines ungestörten Verkehrsfluß geschätzt wird, sondern die Verkehrsverlagerung auf das untergeordnete Straßennetz berücksichtigt wird; so tritt zum Beispiel auf der Ausfahrt Lohhof (Kante 264o) ein Strom von bis zu 1000 Fz/h auf, der nicht zum Zielstrom München gehört. Die Akzeptanzrate wird daher in der Simulation auf 50 % gesetzt. Dies entspricht einer maximalen Wirkung von circa 1800 Fz/h . Die Nachfrage bezüglich der Hauptroute kann mittels Umleitung auf 3700 Fz/h gesenkt werden. Ein Stau mit 600 Fz kann nach einer Stunde abgebaut werden.

Die Häufigkeit des Szenariums wird auf Basis der Angaben in THORMANN (1999) auf 90 Tage im Jahr geschätzt. Zudem wird angenommen, daß sich die auf den Tag bezogene Wirkung im Gesamtnetz aus der doppelten Wirkung der Simulation ergibt. Aus diesen Schätzungen kann unter Nutzung der Simulationsergebnisse das jährliche Potential der unterschiedlichen Ausprägungen des Steuerungsverfahrens berechnet werden.

6.5.4 Zusammenfassung

Das beschriebene Verkehrsszenarium bildet das Verkehrsgeschehen auf dem Routenpaar Nord–Süd an diesem Tag gut ab und kann verwendet werden, um alle Kombinationen von Verkehrs- und Steuerungsmodellen so zu bewerten, daß diese vergleichbar sind.

6.6 Ergebnisse

6.6.1 Überblick

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse der unterschiedlichen Ausprägungen beziehungsweise Konfigurationen des Steuerungsverfahrens gezeigt und erläutert. Folgende Konfigurationen werden untersucht:

- NO: Zunächst wird der Fall ohne Netzsteuerung vorgestellt; es wird angenommen, daß die Verkehrsteilnehmer unabhängig vom Verkehrszustand die Hauptroute verwenden.
- BB: Im nächsten Schritt wird die einfache Staulängenberechnung mit dem Zweipunktregler als Schaltplanauswahl verbunden.

Name	Bewertungs- kriterium	Schaltplan- auswahl	Schaltplan- korrektur	Kalman
NO	nein	nein	nein	nein
BB	einfach Stau	Zweipunkt	nein	nein
OD	komplex Stau	Kordonmatrix	nein	nein
LLC	komplex Stau	nein	ja	nein
LLT	Reisezeit	nein	ja	nein
LLTK	Reisezeit	nein	ja	ja
LLTKR	Reisezeit	Abbiegerate real	ja	ja
LLTKS	Reisezeit	Abbiegerate simuliert	ja	ja

Tabelle 6.4: Simulierte Konfigurationen des Steuerungsverfahrens

- OD: In dieser Konfiguration wird die komplexe Staulängenberechnung mit der Matrixschätzung als Schaltplanauswahl verwendet.
- LLC: Diese Konfiguration verwendet die komplexe Staulängenberechnung zusammen mit der Schaltplankorrektur. Eine Schaltplanauswahl wird nicht verwendet.
- LLT: In dieser Konfiguration wird anstelle der komplexen Staulängenberechnung die Reisezeitberechnung verwendet.
- LLTK: In dieser Konfiguration wird das Steuerungsmodell zusammen mit dem Verkehrsmodell bewertet, so daß zwischen der simulierten „Realität“ und der Verkehrsmodellierung Abweichungen auftreten.
- LLTKR: In dieser Konfiguration wird das Steuerungsmodell um die Schaltplanauswahl ergänzt. Die Approximatoren werden an der Realität gelernt, so daß Abweichungen zwischen den geschätzten und „tatsächlichen“ simulierten Wirkungen auftreten können.
- LLTKS: Hier wird die Abbiegeratenschätzung an der Simulation gelernt, so daß die Abweichungen zwischen den geschätzten und simulierten Wirkungen geringer sind.

Die unterschiedlichen Konfigurationen wurden in Tabelle 6.4 zusammengefaßt.

6.6.2 Die Konfigurationen

Die Konfiguration NO

Bild 6.8 zeigt den Reisezeitenverlauf auf der Haupt- und der Alternativroute. Ohne

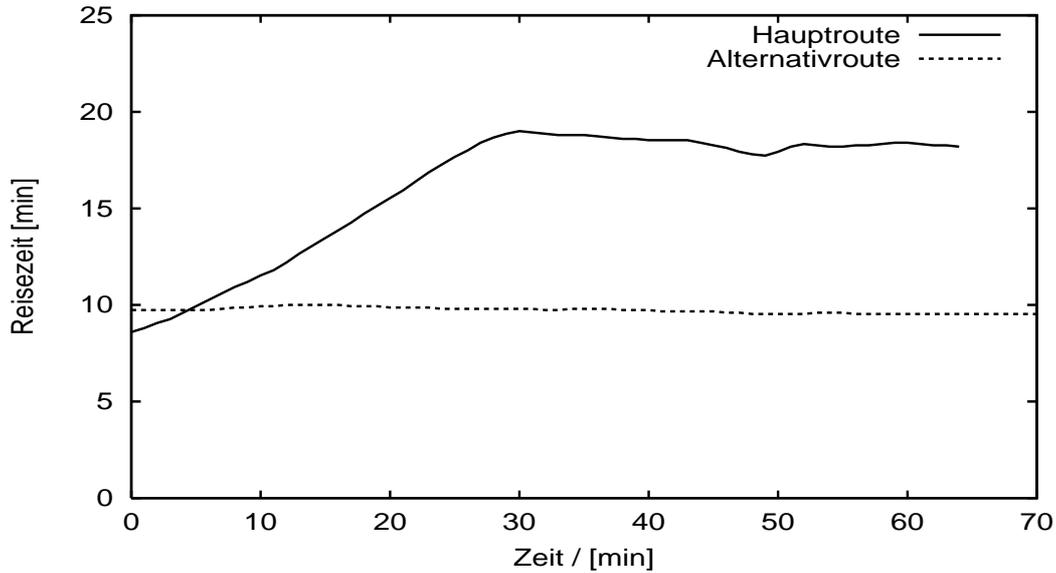


Abbildung 6.8: Reisezeiten der Konfiguration NO

Umleitung von Fahrzeugströmen erreicht der Stauanfang nach 25 Minuten das Autobahnkreuz Neufahrn. Nach 30 Minuten erreicht die Reisezeit ihren endgültigen Wert. Die summierte Reisezeit im Netz während der Simulationsdauer beträgt 6231.8 h.

Die Konfiguration BB

Unter Nutzung des Zweipunktreglers in der Schaltplanauswahl werden nur die Schaltpläne N0 (keine Umleitung) und N5 (maximale Wirkung) verwendet. Daraus resultiert eine Oszillation in der Reisezeit (siehe Bild 6.9) und der Staulänge. Die Längenanpassung wurde zu 4711.11 m gesetzt. Dies entspricht einem Verhältnis der Geschwindigkeit im gebundenen und nicht gebundenen Verkehr von 40/90. Die Regelungsverstärkung wurde zu $2Fz/m$ gesetzt. Das heißt, für jeden Meter Abweichung von der Sollstaulänge werden 2 Fahrzeuge umgeleitet. Bild 6.10 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute. Segment 0 befindet sich am AK Neufahrn, Segment 30 am AK München Nord. Die Oszillation läßt sich zum einen aus der Totzeit zwischen den Entscheidungspunkten und dem Stauanfang erklären. Nach Beginn der Umleitung dauert es mehr als zwei Minuten bis der Stau sich reduziert. In diesen zwei Minuten wächst der Stau noch weiter an. Dann wird der Stau abgebaut, bis die Umleitung zurückgenommen wird. Der Stau wird weiter abgebaut, solange die sich ändernde primäre Wirkung in Form einer geringeren Verkehrsmenge den Stauanfang noch nicht erreicht hat. Dies führt zu den Regelungsschwingungen, die eine implizite Pulsweitenmodulation bewirken. Die Frequenz der Schwingung ist abhängig vom Ort des Stauanfangs. In der Realität ergibt sich eine geringere Frequenz mit höherer Amplitude, da im Falle des Nutzeroptimums

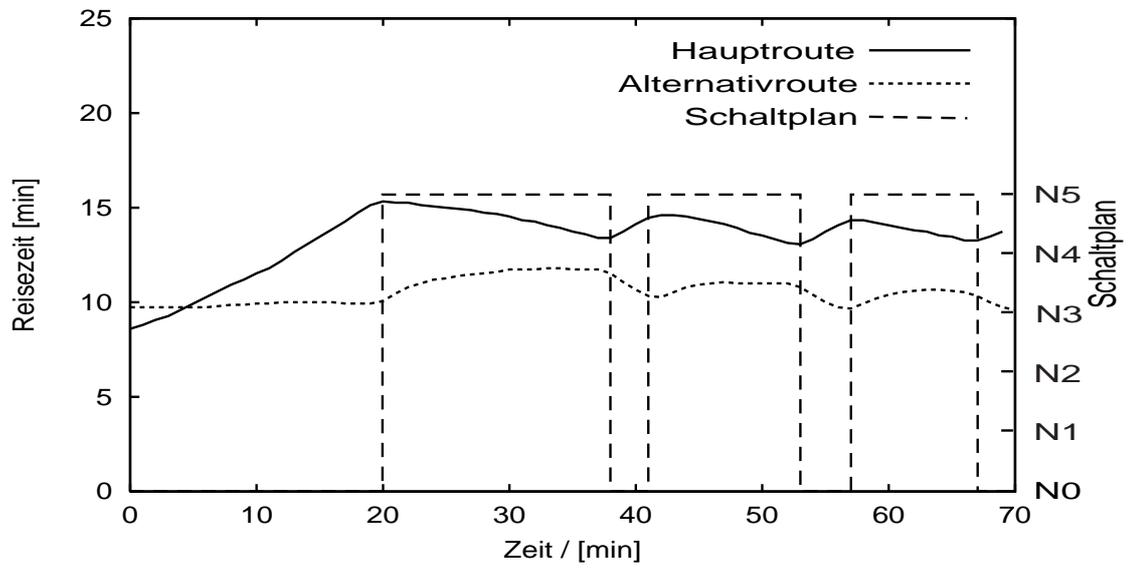


Abbildung 6.9: (BB) Reisezeiten

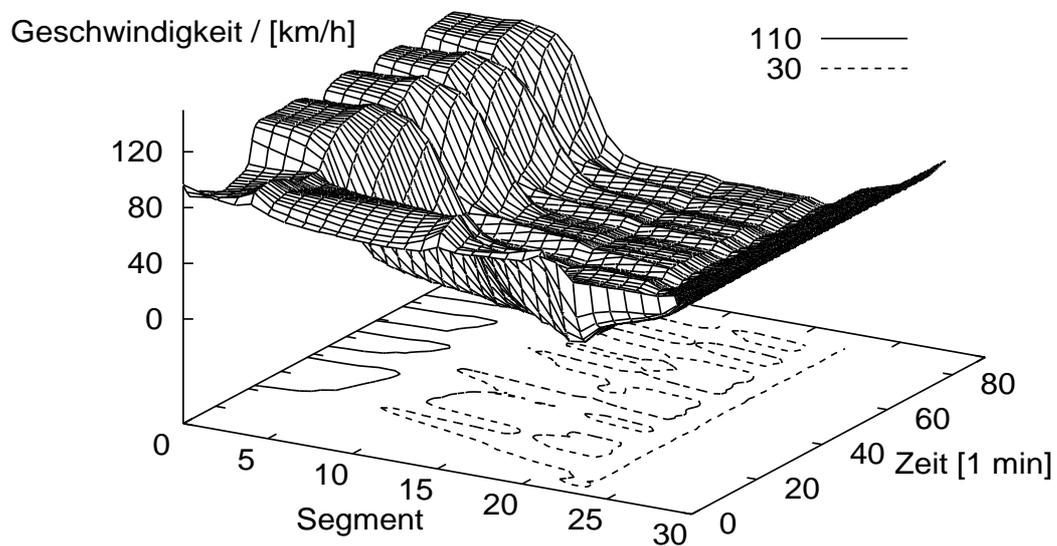


Abbildung 6.10: (BB) Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute

sowohl Stauanfang als auch Stauende weiter entfernt von den Entscheidungspunkten liegen. Die Totzeiten können durch die Nähe des Stauanfangs in den Reisezeitverläufen nicht beobachtet werden.

Die summierte Reisezeit beträgt 5554.0 *h*. Dies ist eine Reduktion um 677.8 *h* gegenüber dem Fall, daß keine Umleitung vorgenommen wird. Auf das Jahr hochgerechnet können damit 122004 *h* Reisezeit eingespart werden. Unter den Annahmen, daß sich das Referenzszenarium im wesentlichen auf den Berufsverkehr bezieht und die mittlere Zahl von Passagieren eines Personenkraftwagens 1.3 Personen beträgt, ergibt sich nach BOBINGER ET AL. (1991) eine Bewertung der Reisezeit von circa 25 *Euro/h* für das Preisniveau des Jahres 1990. Daraus ergibt sich ein finanzielles Potential von 3050100 *Euro/a*. Umwelt-, psychologische und andere Kosten sind in diesen Zahlen noch nicht berücksichtigt. PTV (1996) gibt im Berufsverkehr geringere Kosten von circa 5.5 *Euro/h* an, die allerdings kritisch hinterfragt werden können.

Der Zweipunktregler wird als Referenz für die folgenden Konfigurationen verwendet. Dies beruht auf der Annahme, daß ein menschliches Bedienungspersonal vergleichbare Qualitäten in Bezug auf die eingesparte summierte Reisezeit besitzt.

Die Konfiguration OD

In dieser Konfiguration wird das Normstaumaß verwendet. Anstelle des Zweipunktreglers wird in der Schaltplanauswahl ein Mehrpunktregler auf Basis der Kordonmatrix verwendet. Diese wird direkt aus der Simulation übernommen, so daß der Schätzfehler gegen null geht. Es wird jeweils der Schaltplan ausgewählt, der die geringste Abweichung vom dynamischen Sollwert für die Menge der umzuleitenden Fahrzeuge besitzt. Die Umleitungsregler der Konfigurationen BB und OD sind im strengen Sinne der Regelungstechnik für sich allein nur Steuerungen, da der gemessene Wert für die umgeleiteten Fahrzeuge nicht verwendet wird; im Zusammenhang mit dem Umleitungsalgorithmus können sie aber auch als Regler aufgefaßt werden, da so eine Rückkopplung über die geschätzten Staulängen gegeben ist. In dieser Konfiguration wurde die Anpassung zu 471.11 *m* gesetzt; dies entspricht einem Quotienten von 4/90 im Geschwindigkeitsverhältnis. Aufgrund der Normierung des Staus muß ein geringerer Wert für die Geschwindigkeit im gebundenen Verkehr verwendet werden.

Bild 6.11 zeigt den Reisezeitenverlauf. Obwohl unter Nutzung des Mehrpunktreglers nicht mehr zwischen den Schaltplänen N0 und N5 hin- und hergeschaltet wird, sondern auch die übrigen Schaltpläne verwendet werden, ergibt sich dennoch eine Oszillation im Reisezeitverlauf und der Staulänge. Aufgrund der diskreten Steuerungsvariablen in Form der Schaltpläne ergibt sich ein Fehler zwischen der umzuleitenden Fahrzeugmenge und der tatsächlich umgeleiteten Fahrzeugmenge. Die Auswirkungen dieses Fehlers sind nach einer Totzeit die Änderung der Staulänge, die je nach Vorzeichen des Fehlers abnimmt oder zunimmt, bis der dynamische Sollwert sich so ändert, daß der benach-

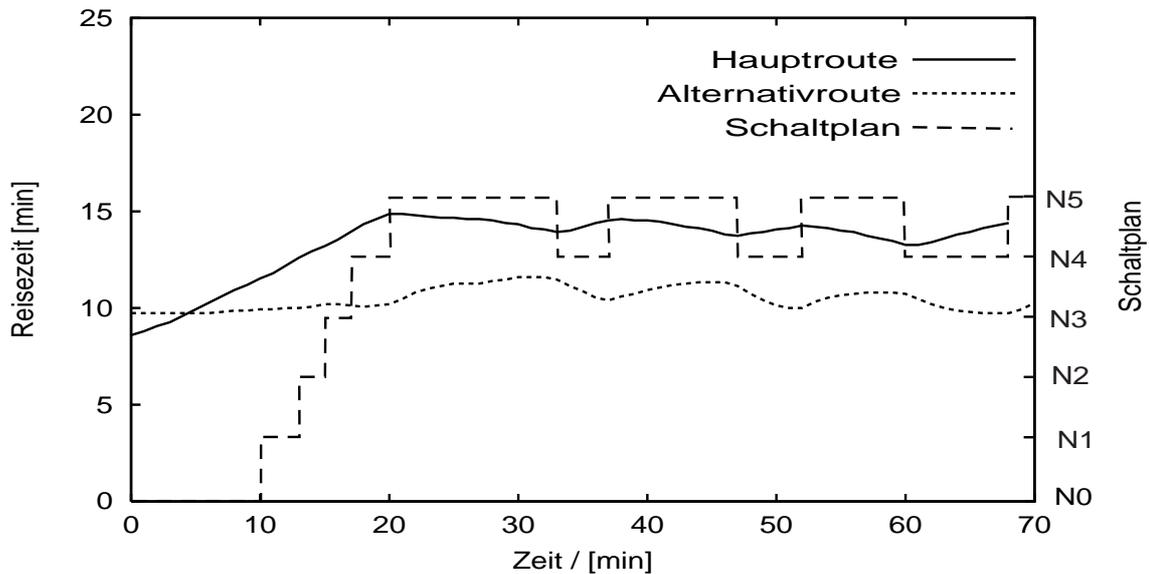


Abbildung 6.11: (OD) Reisezeiten

barte Schaltplan geschaltet wird. Die Überlegungen zum Ablauf der wechselseitigen Vorgänge beim Zweipunktregler gelten analog. Mit diesen Oszillationen muß bei allen Verfahren zur Netzsteuerung gerechnet werden, die die primäre Wirkung des Verfahrens aus fehlerbehafteten Modellen ermitteln. Je nach Größe der Fehler können sich sehr geringe Frequenzen der Oszillation ergeben.

Die summierte Reisezeit beträgt $5548.6 h$. Dies entspricht einer Verbesserung in der Reduktion der Reisezeit von 0.8% beziehungsweise um circa $976 h/a$ gegenüber der Nutzung des Zweipunktreglers.

Diese Konfiguration kann als Referenz für den bisherigen Stand von Netzsteuerungen verwendet werden, die Modelle sowohl zur Schätzung der primären als auch der sekundären Wirkungen benutzen. Wahrscheinlich ist die Güte solcher Verfahren eher schlechter als die Güte der Konfiguration OD, da in dieser Konfiguration davon ausgegangen wurde, daß die Wirkungen, insbesondere die Zahl der umgeleiteten Fahrzeuge beliebig genau ermittelt werden kann.

Daher wird die Konfiguration OD in Näherung auch als Referenz für modellgestützte Prognoseverfahren verwendet.

Die Konfiguration LLC

In dieser Konfiguration wird im Umleitungsgregler anstelle einer Schaltplanauswahl die Schaltplankorrektur verwendet. Im Umleitungsalgorithmus wird als Bewertungskriterium der normierte Stau verwendet. Die Verstärkung des Reglers wird auf $2 Fz/m$, die Anpassung auf $942.22 m$ gesetzt; dies entspricht einem Geschwindigkeitsverhältnis von $8/90$.

Bild 6.12 zeigt die Reisezeiten. Bild 6.13 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf auf der

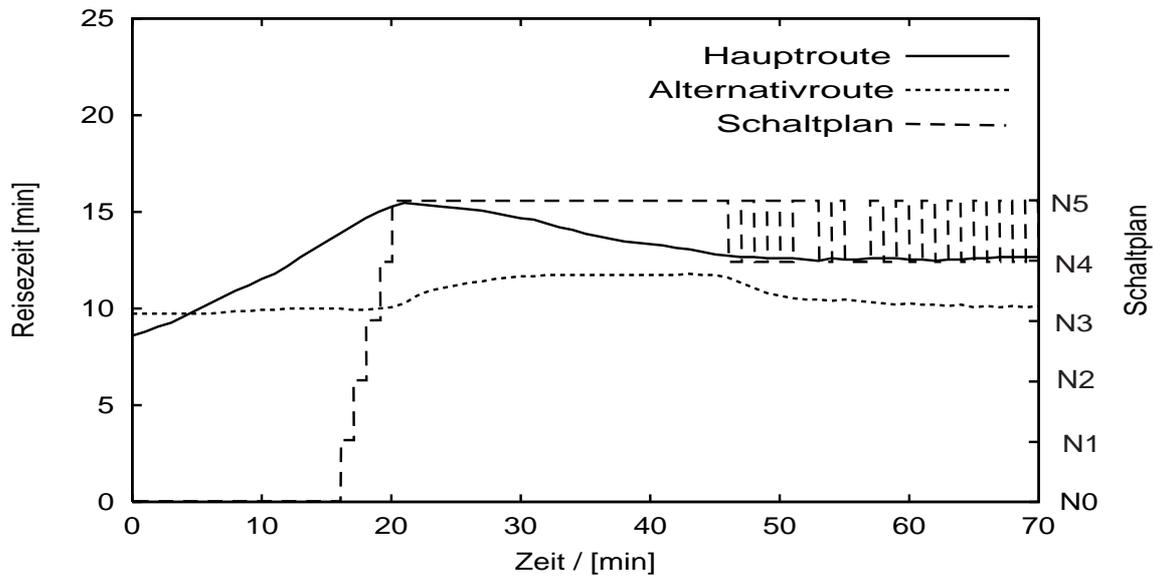


Abbildung 6.12: (LLC) Reisezeiten

Hauptroute. In dieser Konfiguration gibt es keine Oszillation. Die Differenz des dynamischen Sollwerts für die umzuleitende Fahrzeugmenge beziehungsweise die in die Hauptroute einfließende Fahrzeugmenge wird von einem weiteren Regler berücksichtigt, der auf der Beobachtung der primären Wirkung basiert. Die Abweichungen werden daher schon berücksichtigt, bevor sich Änderungen der sekundären Wirkungen in Form der Staulängen und Reisezeiten ergeben.

Die summierte Reisezeit beträgt $5519.8 h$. Dies entspricht einer Verbesserung um 5% beziehungsweise $6156.0 h/a$ gegenüber der Zweipunktregelung (OD).

Die Konfiguration LLT

Diese Konfiguration entspricht weitgehend der Konfiguration LLC; allerdings wird das standardisierte Staukriterium durch die individuelle Reisezeit ersetzt. Die Verstärkung des Staulängenreglers wird auf $10 Fz/(3.6 sec)$ eingestellt. Dies bedeutet, daß pro $3.6 sec$

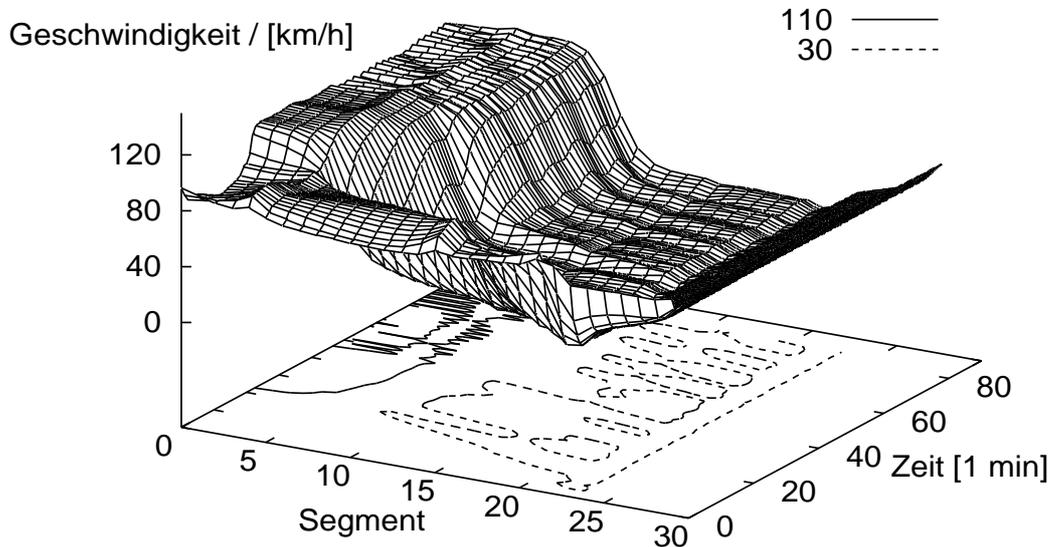


Abbildung 6.13: (LLC) Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute

Regeldifferenz 10 Fahrzeuge umgeleitet werden. Die Anpassung wird zu 0 gesetzt; hierbei sei angemerkt, daß aufgrund der Eigenschaften eines Proportionalreglers noch immer eine Reisezeitabweichung zwischen der Haupt- und Alternativroute zu erwarten ist.

Bild 6.14 zeigt die Reisezeiten. Der Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute ist vergleichbar mit demjenigen der Konfiguration LLTK (siehe Bild 6.15). Der Verlauf der Reisezeiten ist günstiger als bei der Verwendung des Staukriteriums, da in der Reisezeitberechnung im Gegensatz zur Staulängenberechnung auch dichter werdender Verkehr vor dem Stau berücksichtigt wird. Dies zeigt sich auch in der summierten Reisezeit, die $5444.9h$ beträgt und einer Verbesserung um 16% beziehungsweise $19638h/a$ entspricht.

Die Konfiguration LLTK

Die Konfiguration LLT wurde wie die übrigen zuvor behandelten Konfigurationen ohne Berücksichtigung der Verkehrsmodellierung validiert; das heißt, der Verkehrszustand, der normalerweise von der Verkehrsmodellierung ermittelt wird, wurde direkt aus der Simulation zur externen Bewertung entnommen. Dies entspricht der Annahme, daß der Verkehrszustand beliebig gut geschätzt werden kann. Die Konfiguration LLTK

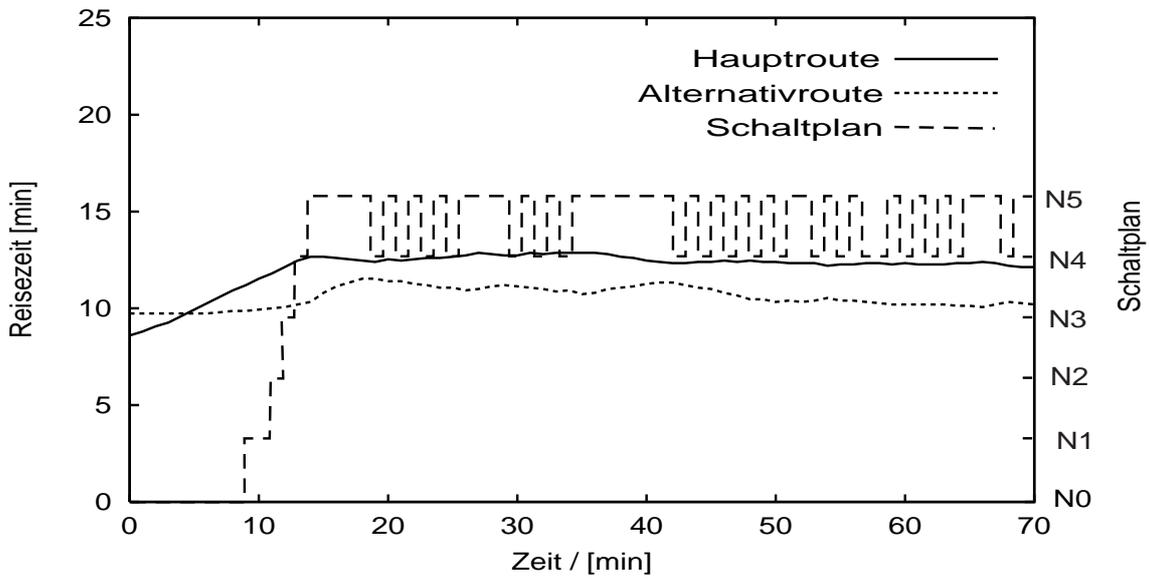


Abbildung 6.14: (LLT) Reisezeiten

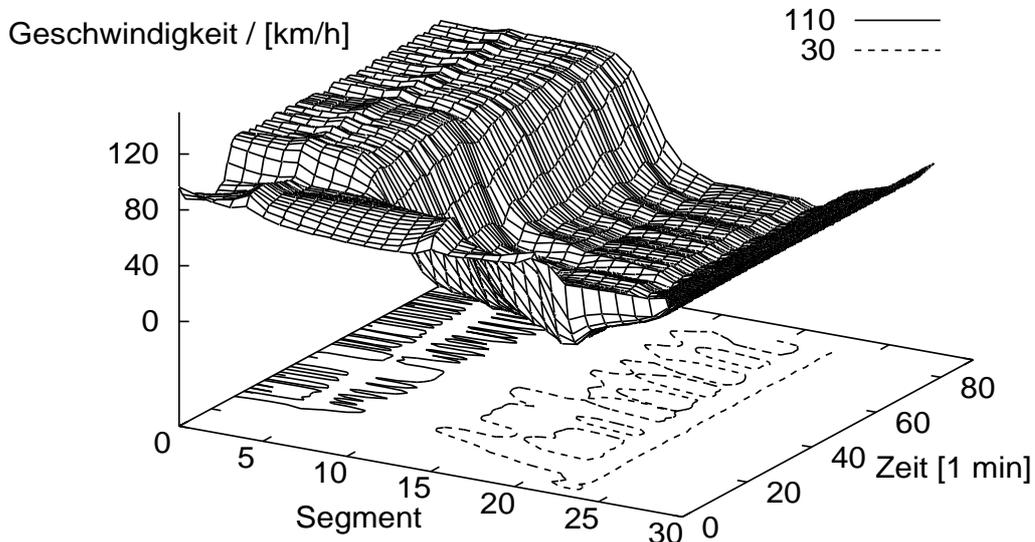


Abbildung 6.15: (LLTK) Realer Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute

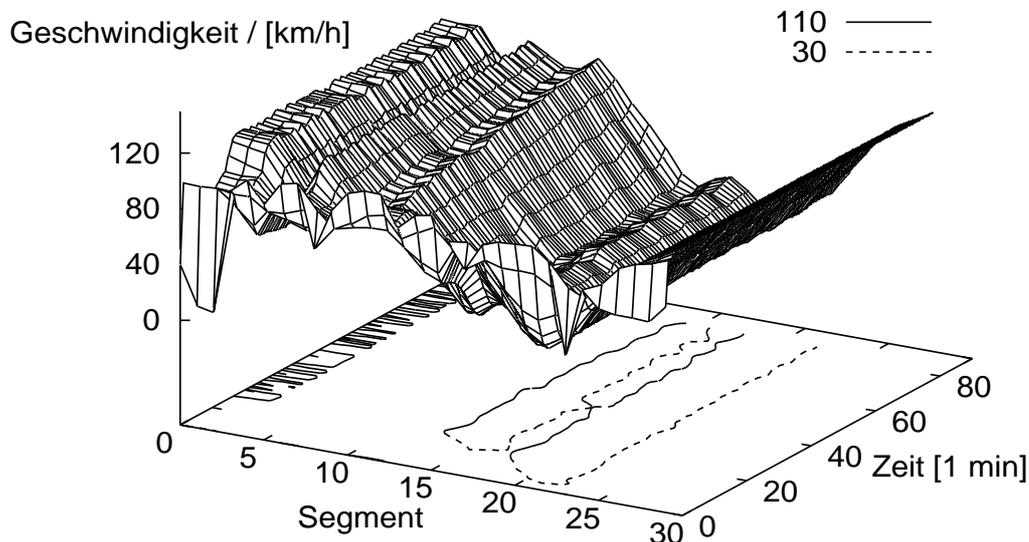


Abbildung 6.16: (LLTK) Geschätzter Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute

entspricht der Konfiguration LLT mit dem Unterschied, daß nun auch die Verkehrsmo-
dellierung und damit das ganze Steuerungsverfahren in die Validierung einbezogen ist,
und die Ungenauigkeiten der Verkehrsabbildung berücksichtigt werden. Die Parame-
trisierung des Umleitungsalgorithmus wurde identisch zur Konfiguration LLT gewählt.

Bild 6.15 zeigt den realen Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute. Bild 6.16 zeigt
den geschätzten Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute. Die Gütekriterien der
Beobachtung der Geschwindigkeit sind in Tabelle 6.5 auf drei gültige Stellen genau
zusammengefaßt. Die Güte der hier verwendeten Zustandsschätzung ist geringer als

Modell	E_l	E_v	E_q
q_{Kalman}	154	333000.0	577
v_{Kalman}	-0.206	399	20.0

Tabelle 6.5: Zustandsbeobachtung mittels Kalmanfilter: Gütekriterien

die in der Realität erreichbare Güte (siehe Tabelle 3.3). Die Ursache hierfür ist die
Verwendung real gemessener Größen an den Netzzufahrten, die zum Teil inkonsistent

zu den „gemessenen“ Größen aus der simulierten Realität sind. Die in der Realität zu erwartenden Ergebnisse sind daher besser als die im folgenden beschriebenen, solange sich die Ausfälle von Meßquerschnitten in Grenzen halten.

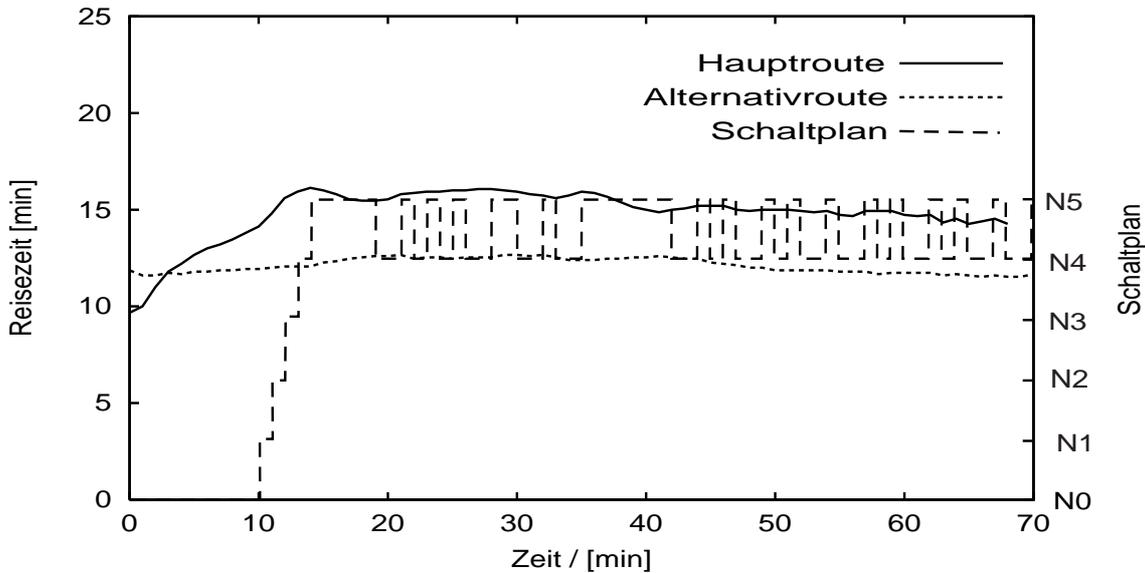


Abbildung 6.17: (LLTK) Reisezeiten

Trotz der Schätzfehler ergeben sich gute Ergebnisse bezüglich der Reisezeiten, die in Bild 6.17 dargestellt sind. Die summierte Reisezeit beträgt $5459.9 h$. Dies ist eine Verbesserung um 13.9% beziehungsweise $16938 h/a$ gegenüber dem Zweipunktregler. Gegenüber der Validierung ohne Berücksichtigung der Verkehrsmodellierung ergibt sich eine um circa 2.1% geringere Verbesserung, so daß die Auswirkungen der Modellierungsfehler als gering einzustufen sind. Die Güte des gesamten Steuerungsverfahrens basiert daher offensichtlich eher auf der Güte der Zustandsschätzung im Sinne des systematischen beziehungsweise mittleren linearen Fehlers als auf dem quadratischen Fehler.

Bild 6.18 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf auf der Alternativroute. Trotz der umgeleiteten Verkehrsmengen entstehen auf der Alternativroute wie auch in Realität keine Stauungen. Auch die durch Verflechtungsvorgänge und die Rampen verursachte Geschwindigkeitsreduktion unmittelbar nach dem Autobahnkreuz Neufahrn wird nachgebildet.

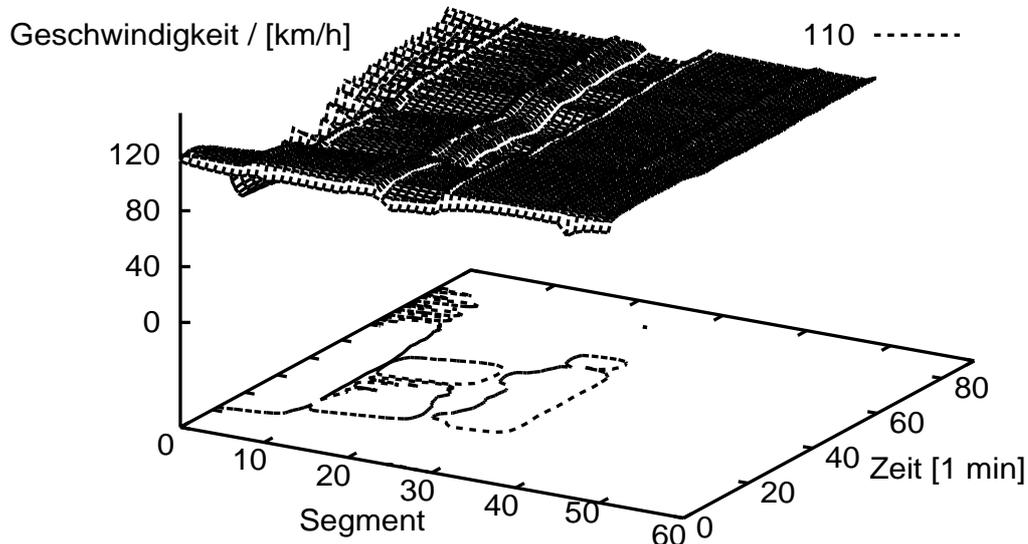


Abbildung 6.18: (LLTK) Realer Geschwindigkeitsverlauf auf der Alternativroute

Die Konfiguration LLTKR

In der Konfiguration LLTK werden alle Schaltpläne von N0 bis N5 durchlaufen, sobald das Nutzeroptimum gegeben ist, obwohl der dynamische Sollwert einer Wirkung entspricht, die zwischen dem Schaltplan N4 und N5 liegt. Entsprechend den Überlegungen aus Abschnitt 4.6 kann dies durch Hinzunahme eines Optimierungsansatzes vermieden werden.

In dieser Konfiguration wird daher die Schaltplanauswahl eingebunden, die hier auf der Schätzung beziehungsweise Prognose der Abbiegeraten als primärer Wirkung der Umleitungsempfehlung mittels Neuro/Fuzzy-Approximatoren besteht. Die Approximatoren wurden an der Realität gelernt (siehe Abschnitt 3.7.4).

Bild 6.19 zeigt die sich ergebenden Reisezeiten. Bild 6.20 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute. Die Reisezeit auf der Hauptroute verkürzt sich nach Beginn der Umleitung im Vergleich zur Konfiguration LLTK. Es ergibt sich eine summierte Reisezeit von 5445.9 h. Dies stellt eine Verbesserung um 15.9 % gegenüber dem Zweipunktregler dar. Somit wird eine um 2 % höhere Verbesserung als in der Konfiguration LLTK erreicht. Die Einbußen durch die Modellfehler um 2.1 % zwischen der Konfiguration LLTK und der Konfiguration LLT, bei der angenommen wird, daß es keinen

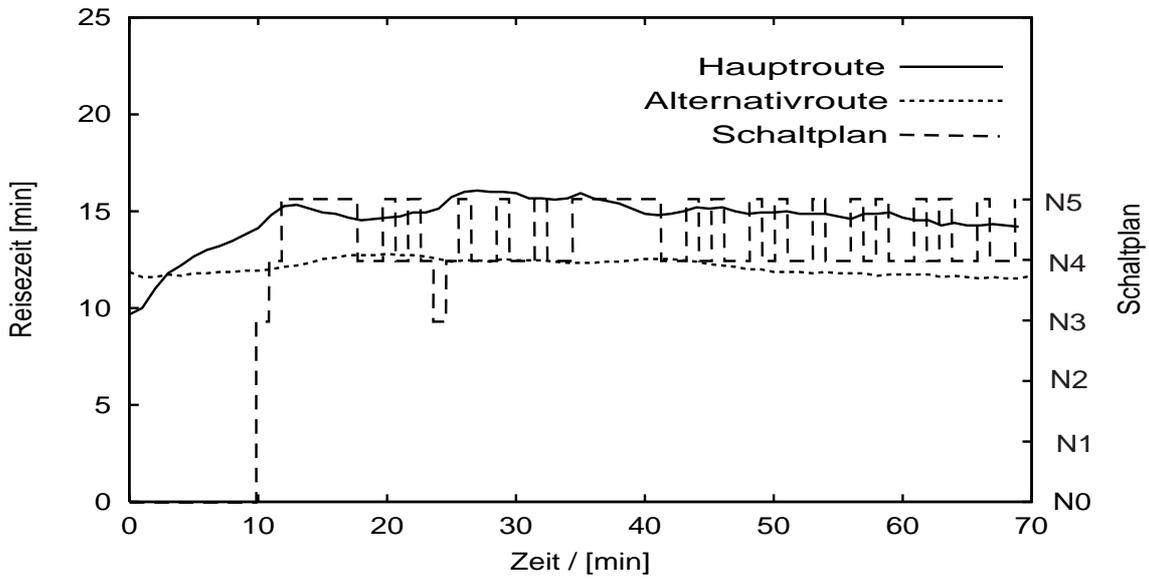


Abbildung 6.19: (LLTKR) Reisezeiten

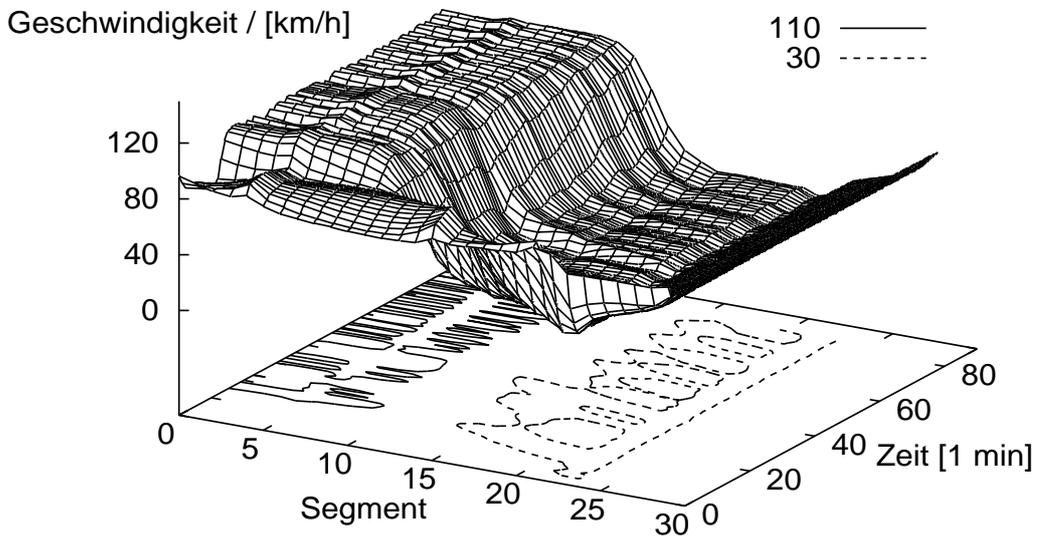


Abbildung 6.20: (LLTKR) Geschwindigkeitsverlauf auf der Hauptroute

Fehler gibt, können damit aufgewogen werden.

Der tatsächlich optimale Schaltplan nach Erreichen des Nutzeroptimums ist der Schaltplan N5. Aufgrund der Prognoseungenauigkeit liefert die an Realdaten gelernte Schaltplanvorauswahl den Schaltplan N3: In der Realität konnten nur die Auswirkungen eines Teiles der Zielströme gelernt werden. Die Hinzunahme des Zieles Salzburg führt daher zu einer unbestimmten Wirkung, so daß nur für die Zielpläne N0, N1 und N3 Werte vorliegen. Der Neuro/Fuzzy-Approximator wurde während des Simulationslaufs aber weiter adaptiert beziehungsweise gelernt. Dieses Wissen kann in einem weiteren Simulationlauf benutzt werden, um die bestmögliche Verbesserung der Güte des Verfahrens durch die Schaltplanauswahl zu ermitteln.

Die Konfiguration LLTKS

Diese Konfiguration entspricht der Konfiguration LLTKR mit der Ausnahme, daß die Abbiegeratenschätzung mit dem an der Simulation gelernten Wissen initialisiert wird. Bild 6.21 zeigt die sich ergebenden Reisezeiten. Die summierte Reisezeit ergibt sich zu

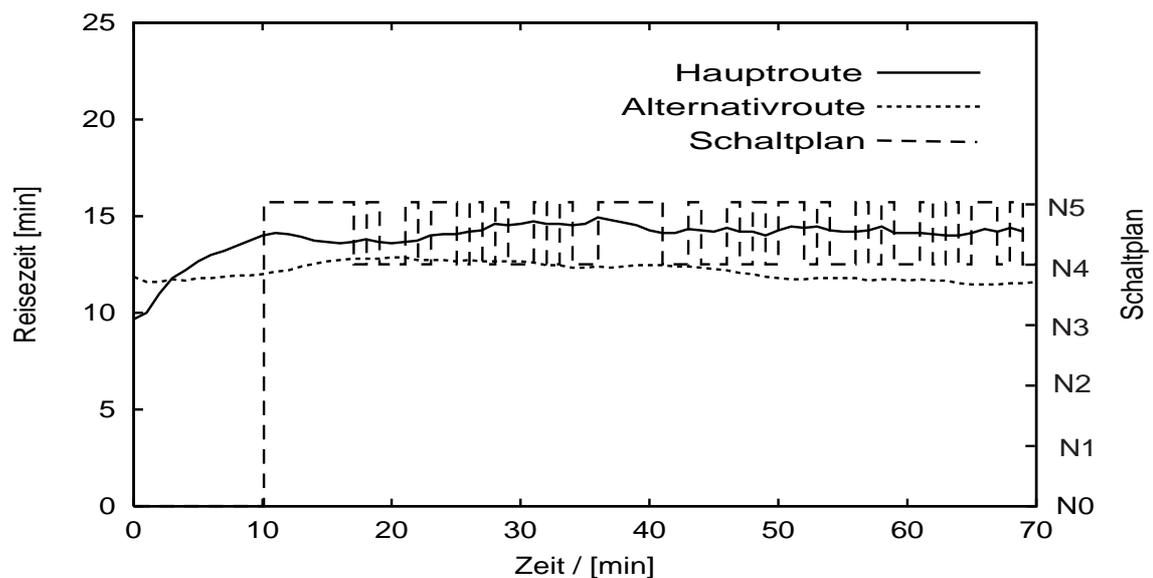


Abbildung 6.21: (LLTKS) Reisezeiten

5411.2 h. Dies entspricht einer Verbesserung von 21.1 % beziehungsweise 25696.8 h/a gegenüber dem Zweipunktregler.

6.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 6.6 zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Konfigurationen. Die Ergebnisse

Name	summierte Reisezeit im Simulationszeitraum	gesparte Reisezeit im Jahr	Verbesserung in % (Vergleich BB)	Schwingungen
NO	6231.8 <i>h</i>	–	–	–
BB	5554.0 <i>h</i>	122004 <i>h</i>	–	ja
OD	5548.6 <i>h</i>	122976 <i>h</i>	0.8 %	ja
LLC	5519.8 <i>h</i>	128160 <i>h</i>	5 %	nein
LLT	5444.9 <i>h</i>	141642 <i>h</i>	16 %	nein
LLTK	5459.9 <i>h</i>	138942 <i>h</i>	13.9 %	nein
LLTKR	5445.9 <i>h</i>	141462 <i>h</i>	15.9 %	nein
LLTKS	5411.2 <i>h</i>	147708 <i>h</i>	21.1 %	nein

Tabelle 6.6: Zusammenfassung der Ergebnisse

zeigen, daß bei rein modellgestützten Verfahren zur Schätzung der Wirkung von Umleitungsempfehlungen mit Schwingungen in den Bewertungsgrößen gerechnet werden muß. Zudem ergibt sich bei modellgestützten Verfahren aufgrund der Schwingungen nur eine kleine Verbesserung in der summierten Reisezeit gegenüber dem Zweipunktregler, der ohne Modellwissen und ohne erweiterter Nutzung von Meßdaten arbeitet.

Demgegenüber sind realdatenbasierte Verfahren in der Lage, diese Schwingungen zu vermeiden und die Ergebnisse bezüglich der summierten Reisezeit erheblich zu verbessern. Auch die Kombination beider Ansätze bringt einen spürbaren Mehrwert. Die Überlegungen aus Abschnitt 4.6 bezüglich der Zusammenhänge zwischen den dynamischen Sollwerten zur Nutzung von Realdaten einerseits und der modellgestützten Optimierung andererseits bestätigen sich in den zufriedenstellenden Ergebnissen.

Weiterhin kann festgestellt werden, daß bereits sehr einfache Steuerungsverfahren sehr gute Ergebnisse bezüglich der summierten Reisezeit gegenüber dem Nullfall ohne einer Nutzung der Alternativroute liefern. Allerdings müßte untersucht werden, inwieweit die Schwingungen in den Bewertungsgrößen Auswirkungen auf die Akzeptanzraten haben.

6.7 Zusammenfassung der Bewertung

Das Verfahren wurde an einem realen Autobahnnetz validiert. Es wurden die realen Daten eines Tages verwendet, um die Simulation zur externen Bewertung zu speisen. Die Simulation wurde so parametrisiert, daß ein typisches Referenzszenarium nachgebildet wurde, das auch in der Realität zu beobachten ist. Die Validierung des Verfahrens erfolgte in drei Schritten:

- Im ersten Schritt wurden die Verkehrsmodelle anhand der Realdaten vorab validiert. In diesem Schritt wurden auch die Modelle zur externen Bewertung gete-

stet.

- Im zweiten Schritt wurden die Steuerungsmodelle anhand der Simulation ohne Berücksichtigung der Fehler der Verkehrsmodelle validiert. Die Ergebnisse sind daher ein Maß für die Güte der Steuerungsmodelle und enthalten keine Aussagen über die Verkehrsmodelle und das Zusammenwirken zwischen den Verkehrsmodellen und den Steuerungsmodellen. Zu diesem Bewertungsschritt gehören die im Abschnitt 6.6.2 beschriebenen Konfigurationen BB, LLC und LLT.
- Im dritten Schritt wurden die Verkehrsmodelle in die Bewertung eingebunden, um die Güte des gesamten Steuerungsverfahrens bewerten zu können. Hierzu zählen die Konfigurationen LLTK und LLTKR.

Die Konfiguration LLTKS verwendet Informationen aus vorangegangenen Simulationen, die in den Neuro/Fuzzy-Approximatoren gespeichert wurden. Diese Konfiguration zeigte abschließend das Potential der Kombination von dynamischen Sollwerten zur erweiterten Verwendung von Realdaten und modellbasierter Optimierung, wobei das Modell der Optimierung aus den gelernten Approximatoren besteht.

Die Modelle der externen Bewertung unterscheiden sich grundlegend von den innerhalb des Verfahrens verwendeten Modellen. Dies zeigt sich an den Schätzfehlern, die in Tabelle 6.5 festgehalten sind. Da die in der Realität zu erwartenden Modellfehler auch kleiner sein können als die hier nachgebildeten (siehe Tabelle 3.3), können bei realer Anwendung des Verfahrens ähnliche oder sogar bessere Ergebnisse erwartet werden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit wurde die Erweiterung der Architektur von Steuerungsverfahren zur Verkehrsbeeinflussung vorgestellt, am Beispiel der Netzsteuerung auf Bundesautobahnen konkretisiert und programmtechnisch implementiert. Die Ansätze wurden aus einer qualitativen, aber systematischen Untersuchung des bisherigen Standes von Netzsteuerungen abgeleitet.

Bisherige Steuerungsverfahren basieren entweder auf einfachen Schwellenwertvergleichen oder auf Optimierungsansätzen. Die Nutzung von Schwellenwertvergleichen erlaubt in der Regel keine explizite Berücksichtigung von Bewertungsgrößen und auch keine Berücksichtigung der Wirkung. Steuerungsverfahren, die auf Prognosen beruhen, hängen von mehreren Verkehrsmodellen ab, die zur Gesamtgüte beitragen; obwohl die Güte des *Steuerungsmodells* meist gut ist, und die Wirkung der Steuerungseingriffe berücksichtigt wird, ergibt sich vor allem aufgrund der hohen Anforderungen an die *Verkehrsmodelle* eine geringe Güte des *gesamten* Steuerungsverfahrens, das aus Verkehrs- und Steuerungsmodellen besteht.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde ein Ansatz entwickelt, der soweit wie möglich auf Verkehrsmodelle, insbesondere zur Schätzung der primären Wirkung in Form der umgeleiteten Verkehrsmengen, zum Beispiel mittels der Schätzung von netzhaften Verkehrsströmen und Akzeptanzraten, verzichten kann. Hierzu wurde das Steuerungsmodell des Steuerungsverfahrens um ein Reglermodul erweitert.

Eine Verkehrszustandserkennung mittels eines kalmangefilterten makroskopischen Verkehrsflußmodells und eine Prognose der Wirkung von Umleitungsempfehlungen in Form einer Abbiegeratenschätzung, die auf einem Neuro/Fuzzy-Approximator basiert, dienen als Verkehrsmodell. Das Steuerungsmodell basiert zum einen auf einem Umleitungsalgorithmus, der dynamische Sollwerte für die primäre Wirkung der Umleitungsempfehlung in Form der umzuleitenden Fahrzeugmenge beziehungsweise der Fahrzeugmenge auf der Hauptroute liefert und zum anderen auf einem Umleitungsregler, der den dynamischen Sollwert und die Verkehrsmodellierung nutzt, um einerseits eine mo-

dellgestützte Schaltplanauswahl und andererseits eine realdatengestützte Schaltplan-korrektur durchzuführen.

In der Arbeit wurden unterschiedliche Konfigurationen des Steuerungsverfahrens – jeweils mit und ohne Nutzung des Modellwissens und mit und ohne die erweiterte Nutzung von Realdaten – untersucht und bewertet. Dabei stellte sich heraus, daß die Einbringung von Modellwissen die Güte des Steuerungsverfahrens zwar verbessern kann, aber nicht in dem Maße wie durch die Nutzung von Realdaten. Es konnte zudem gezeigt werden, daß sich beide Ansätze kombinieren lassen und dies zu einem Mehrwert führt, da die Nachteile des einen die Vorteile des anderen sind und umgekehrt.

Wesentliche neue Beiträge der Arbeit sind:

- Die Erweiterung des Steuerungsmodells um einen Regler, der mit dem Algorithmus durch dynamische Sollwerte verbunden ist.
- Die erweiterte Nutzung von Realdaten im Umleitungsregler.
- Die Kombination der erweiterten Nutzung von Realdaten mit Modellwissen.

Weitere bedeutende neue Beiträge sind:

- Die Verwendung dynamischer Sollwerte im Umleitungsalgorithmus als Ersatz für prognosebasierte Optimierungen mit dem Vorteil geringerer Anforderungen an die Verkehrsmodellierung.
- Die Erweiterung der Kalmanfilterung von dynamischen makroskopischen Modellen für Strecken auf Netze.
- Die Schätzung und Prognose von Abbiegeraten mittels eines Neuro/Fuzzy-Approximators als primäre Wirkung von Umleitungsempfehlungen.
- Die geschlossene Erweiterung des makroskopischen Verkehrsflußmodells nach CREMER/PAYNE zur Verbesserung der Nachbildung des gebundenen Verkehrs und zur Vermeidung von heuristischen Abfragen, die unmögliche Zustände wie negative Geschwindigkeiten oder zu hohe Dichten verhindern.

Ferner erwähnenswerte neue Beiträge sind:

- Eine qualitative aber systematische Untersuchung der Problematik von Netzsteuerungen mit Aussagen über die Zuverlässigkeit der Steuerungsverfahren.
- Die Anwendung von Entwurfsmustern zur programmtechnischen Umsetzung eines Steuerungsverfahrens zur Verkehrsbeeinflussung – insbesondere die Kombination der Modulverwaltung als Ausprägung des Facettenmusters, der Klassenfamilien als Ausprägung des Strategiemusters und der räumlich-logischen Datenverteilung als Ausprägung des Kompositionsmusters.

Die offene Architektur des Ansatzes erlaubt vielfältige Weiterentwicklungen des Verfahrens. So könnte zum Beispiel die nicht implementierte Funktion der Berücksichtigung zukünftiger Geschwindigkeiten stromabwärts zur Reisezeitberechnung weiterverfolgt werden. Hierzu muß das Verkehrsmodell um eine Prognose erweitert werden. Diese Prognose könnte nachfolgend genutzt werden, um den dynamischen Sollwert für die umzuleitende Fahrzeugmenge zu optimieren. Weiterhin könnte das Verfahren auf komplexere Netze erweitert werden; dies kann zunächst durch Aufteilung des Netzes in Alternativroutenpaare geschehen. Aufwendigere Ansätze könnten für Netztopologien nötig werden, bei denen zum Beispiel eine Teilroute als Alternativroute für zwei Hauptrouten dient, so daß zwei Entscheidungsknoten dieselbe Teilroute regeln – in diesem Fall kann es derzeit nicht ausgeschlossen werden, daß Regelschwingungen aufgrund dieser Koppelung entstehen.

Aufgrund der Bewertungsergebnisse ist das Verfahren allerdings schon jetzt soweit entwickelt, daß es für die in der Praxis häufig vorkommenden einfachen Alternativroutenpaare eingesetzt werden kann. Die aus der praktischen Anwendung gewonnenen Erkenntnisse sollten dann wieder zur Weiterentwicklung der algorithmischen Ansätze genutzt werden.

Auch die in der Arbeit entwickelten Modelle zur netzhaften dynamischen Simulation des Verkehrsablaufes, der Schätzung des aktuellen Verkehrszustandes und der Schätzung und Prognose der Abbiegeraten als Funktion des Schaltplans können weiterentwickelt beziehungsweise auf andere Problemstellungen übertragen werden.

Die dynamische Simulation des Verkehrsablaufes wurde in dieser Arbeit soweit entwickelt, daß der Verkehr in einem *geschlossenen* Ansatz qualitativ gut nachgebildet wird. Weitere Entwicklungen sollten die quantitative Kalibrierung des Modells sowie die Weiterentwicklung der Geschwindigkeitsgleichung eventuell unter Nutzung des für die Abbiegeratenschätzung entwickelten Fuzzy/Neuro-Approximators umfassen.

Die auf dem kalmangefilterten Verkehrsflußmodell basierende und zur Schätzung des Verkehrsablaufes auf Straßennetzen erweiterte Zustandsbeobachtung kann auf weitere Teilnetztopologien angewandt und validiert sowie gegebenenfalls erweitert werden. Zudem könnte neben der Berücksichtigung der stochastischen Meßfehler auch eine Berücksichtigung von systematischen Meßfehlern integriert werden.

Literaturverzeichnis

- BERENJI, H. R. und KHEDAR, P. (1992): Fuzzy rules for guiding reinforcement learning. In *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Seiten 511–514.
- BIORA, F.; BIGOTTI, R. und MORELLO, E. (1998): *COSMOS Report on Torino's Demonstrator for Congestion and Incident Detection and Management*. MIZAR Automazione.
- BOBINGER, R.; FLOWERDEW, T.; HAMMOND, A.; HIMANEN, V.; KELLER, H.; KILL, H. und SERWILL, D. (1991): *Evaluation Process for Road Transport Informatics, EVA-MANUAL*. EVA-Consortium.
- BOTHE, H.-H. (1998): *Neuro-Fuzzy-Methoden*. Springer Verlag, Berlin, München.
- BRAESS, D. (1968): Über ein Paradoxon der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*, Band 12, Seiten 258–268.
- BUSCHMANN, F.; MEUNIER, R.; ROHNERT, H.; SOMMERLAD, P. und STAL, M. (1996): *Pattern-orientierte Software-Architektur*. Addison-Wesley Publishing Company, Deutschland.
- CREMER, M. (1976): A new scheme for traffic flow estimation and control with a two component model. In *Prepr. of the IFAC/IFIP/IFORS 3rd Int. Symposium on Control in Transportation Systems*, Seiten 19–37. Columbus, Ohio.
- CREMER, M. (1979): *Der Verkehrsfluß auf Schnellstraßen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- CREMER, M. und BREDEHÖFT, M. (1988): Ein physikalisches Beobachtbarkeitskriterium für den Entwurf von Zustandsbeobachtern für Systeme größerer Komplexität. *Automatisierungstechnik*, Band 36(3).
- CREMER, M. und FLEISCHMANN, S. (1987): Entwicklung eines regelungstechnischen Konzepts zum verkehrsabhängigen Einsatz von Wechselverkehrszeichen und Zufahrtsdosierungen in Schnellstraßennetzen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Band 505.

- CREMER, M. und KELLER, H. (1987): A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows. *Transportation Research*, Band 21B(2), Seiten 117–132.
- CREMER, M.; MEISSNER, F. und SCHRIEBER, S. (1993): On predictive control schemes in dynamic rerouting strategies. In *Transportation and Traffic Theory*, Seiten 407–426.
- CREMER, M. und PUTENSEN, K. (1992): A macroscopic simulation model for urban traffic flow and its application for traffic control systems. In *Proceedings of the 2nd International Capri Seminar on Urban Traffic Networks*. Capri.
- CREMER, M. und SCHÜTT, H. (1990): A comprehensive concept for simultaneous state observation, parameter estimation and incident detection. In *Transportation and Traffic Theory*, Herausgeber Koshi, M., Seiten 95–112. Elsevier, New York, Amsterdam, London.
- DAGANZO, C. F. (1994): Requiem for second order fluid approximations of traffic flow. Forschungsbericht, Department of Civil Engineering and Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley CA 94720.
- DITTRICH, W. und KUSCHK, B. (1997): Sensortechnik für die Verkehrszustandserfassung. Forschungsbericht, Heusch Boesefeldt für die BMW AG Verkehrsforschung/Verkehrstechnik, Berlin.
- DRAKE, J.; SCHOFER, J. und MAY, A. (1967): A statistical analysis of speed-density hypothesis. In *Proceedings of the Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, Seiten 112–117. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.
- DRÖSCHEL, W. und HEUSER, W. (1998): *Inkrementelle und objektorientierte Vorgehensweise mit dem V-Modell*. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- ENGELS, J. (1998): Prediction systems in traffic information and management centres. In *DACCORD Short Term Forecasting Workshop*. Heusch Boesefeldt, TU Delft.
- FOWLER, M. und KENDALL, S. (1998): *UML konzentriert*. Addison-Wesley Publishing Company, Deutschland.
- GAMMA, E. (1996): The facet pattern. In *Plop*. Washington University. Technical Paper.
- GAMMA, E.; HELM, R.; JOHNSON, R. und VLISSIDES, J. (1996): *Entwurfsmuster*. Addison-Wesley Publishing Company, Deutschland.

- GAZIS, D.; HERMAN, R. und ROTHERY, R. (1961): Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations Research*, Band 9, Seiten 545–567.
- GRAU, R. und BARCELO, J. (1992): Packsim: An experience in using traffic simulation in a demand responsive traffic control system. Technischer Bericht, Dept. d'Estadística e Investivació Operativa, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- GREENBERG, H. (1959): An analysis of traffic flow. *Operations Research*, Band 7, Seiten 79–85.
- GREENSHIELDS, B. D. (1935): A study in highway capacity. In *Highway Research Board*, Band 14, Seiten 469–477.
- HANGLEITER, S. und KÜHNE, R. (1999): Prognose kritischer Verkehrssituationen in städtischen Netzen. In *HEUREKA '99*, Seiten 383–397. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Karlsruhe.
- HAUER, E. und HURDLE, V. (1979): Discussion of FREFLOW: A macroscopic simulation model of freeway traffic. *Transportation Research Records*, Band 722, Seiten 75–76.
- HECHT-NIELSEN, R. (1987): Counterpropagation networks. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Seiten 19–32.
- HECHT-NIELSEN, R. (1990): *Neurocomputing*. Addison–Wesley.
- HEIDEMANN und HOTOPI (1979): Auswertung von Fundamentaldiagrammen. In *Straßenverkehrstechnik*, Seiten 4–10.
- HELBING, D. (1995): Advanced macroscopic simulation models for flow optimization on freeways. In *Modeling and Simulation*, Herausgeber Snorek, M.; Sujansky, M. und Verbraeck, A., Seiten 353–357. The Society for Computer Simulation International, Istanbul.
- HENNINGER, T. (1999): Eine kombinierte Methode zur Schätzung von Kantenbelastungen, Abbiegequoten und Störungen in Stadtstraßennetzen. In *HEUREKA '99*, Seiten 345–357. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Karlsruhe.
- HILLIGES, T. (1994): *Ein phänomenologisches Modell des dynamischen Verkehrsflusses in Schnellstraßennetzen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Theoretische Physik.
- HOCHSTÄDTER, A. und CREMER, M. (1997): Investigating the potential of convoy driving for congestion dispersion. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Boston*, Seite 333 (Digest).

- JANKO, J. (1994): *Probleme der Reisezeitprognose in einem Leitsystem für den Straßenverkehr*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- KALMAN, R. E. (1960): A new approach to linear filtering and prediction problems. In *Trans. ASME J. of Basic Engeneering*, Seiten 35–45.
- KALMAN, R. E. und BUCY, R. S. (1961): New results in linear filtering and prediction theory. In *Proc. ASME J. of Basic Engeneering*, Seiten 95–108.
- KATES, R. (1994): The interplay of viscosity, instability, and nonlinearity in deterministic traffic flow models: Numerical simulations and possible applications. Forschungsbericht, Astrophysical Institute 11482 Potsdam, Germany. preprint.
- KATES, R. E. (1995): Studie über die Anwendbarkeit von makroskopischen Verkehrsablaufmodellen. Forschungsbericht, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München. preprint.
- KAYSER; KRAUSE; HARTLICH und LEVEN (1986): Überprüfung und Bewertung eines Verkehrslenkungssystems für das Autobahndreieck Dernbach und das Autobahnkreuz Koblenz. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Band Heft 491.
- KELLER, H. (1988): Problem und Stand der Kunst. In *Workshop Schätzung der Verkehrsbeziehungen aus Querschnittszählungen*, Herausgeber Keller, H. und Ploss, G., Seiten 6–8. Fachgebiet Verkehrstechnik und Planung, München. Kurzfassung der Vorträge und Materialien.
- KELLER, H. und PLOSS, G. (1987): Real-time identification of O-D flows from counts for urban traffic control. In *Transportation and Traffic Theory*, Herausgeber Gartner, N. H. und Wilson, N. H., Seiten 267–284. Elsevier, New York, Amsterdam, London.
- KELLER, H.; PLOSS, G.; SYKORA, R.; KORNIENKO, D.; PHILLIPS, P. und CREMER, M. (1995): Systemdynamische Schätzung der Matrix der Verkehrsbeziehungen in Außerortsstraßennetzen als Grundlage für die Steuerung von Verkehrsleitsystemen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Band 702.
- KERNER, B.; KLENOV, S. und KONHÄUSER, P. (1997): Asymptotic theory of traffic jams. *Physical Review*, Band E(56), Seiten 4200–4216.
- KERNER, B. und KONHÄUSER, P. (1993): Cluster effect in initially homogenous traffic flow. *Physical Review*, Band E(48), Seiten 2335.
- KLÖFKORN; GHIO und TILLY (1991): Pflichtenheft Wechselwegweisung A9 / A92 / A99. Technischer Bericht, SIEMENS AG.
- KOHONEN, T. (1982): Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, Band 43, Seiten 59–69.

- KRUSE, R.; GEBHARDT, J. und KLAWONN, F. (1995): *Fuzzy Systeme*. B. G. Teubner, Stuttgart, zweite Auflage.
- KRUX, W.; OVERKAMP, K.; KATHMANN, T.; OFFERMANN, F. und DETERMANN, D. (1997): Wechselwegweisung A9/A92/A99 des Verkehrsleitsystems München Nord – Justierung und Optimierung der Parameter für den Automatikbetrieb der Wechselwegweisung. Technischer Bericht, Institut für Straßenwesen RWTH Aachen.
- KÜHNE, R. (1993): Verkehrsflußmodelle. In *Zur Theorie des Straßenverkehrs*, Seiten 44–61. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. Vortragsveranstaltung.
- KÜHNE, R. D. (1984): Macroscopic freeway model for dense traffic. In *Transportation and Traffic Theory*, Herausgeber Vollmuller, I. und Hamerslag, R., Seiten 21–42. VNU Science Press.
- KÜHNE, R. D. (1987): Freeway speed distribution and acceleration noise – calculations from a stochastic continuum theory and comparison with measurements. In *Transportation and Traffic Theory*, Herausgeber Gartner, N. H. und Wilson, N. H., Seiten 119–137. Elsevier, New York, Amsterdam, London.
- KÜHNE, R. D.; PALEN, J.; GARDNER, C. und RITCHIE, S. (1997): Section-related measures of traffic system performance. In *76th Annual Meeting*. Transportation Research Board, Washington, D.C. preprint.
- KÜHNE, R. D.; PALEN, J.; GARDNER, C. und RITCHIE, S. (1998): Loop-based travel time measurement. In *Proceedings of the 5th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*. Newport Beach, California.
- LEUTZBACH, W. (1988): *Introduction to the Theory of Traffic Flow*. Springer Verlag.
- LIGHTHILL, M. und WHITHAM, G. (1955a): On kinematic waves - i. flood movement in long rivers. *Proc.Roy.Soc.*, Band A 229, Seiten 281–316.
- LIGHTHILL, M. und WHITHAM, G. (1955b): On kinematic waves - ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc.Roy.Soc.*, Band A 229, Seiten 317–345.
- LUDMANN, J. (1998): *Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Straßen. Analyse mit dem fahrzeugorientierten Simulationsprogramm PELOPS*. Dissertation, Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen.
- MAMDANI, E. H. (1976): Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine-Studies*, Band 7, Seiten 1–13.
- MAY, A. D. und KELLER, HARTMUT, E. M. (1967): Non-integer car-following models. *Highway Research Record*, Band 199, Seiten 19–32.

- MEISSNER, F. (1997): Dateiformatbeschreibungen für das Simulationspaket SIMONE. Technischer Bericht, Technische Universität Hamburg–Harburg. preprint.
- MEISSNER, F. (1998): *Die Prädiktion der Verkehrsentwicklung in großen Straßennetzen und ihre Realisierung in einem Rechnerverbund*. Dissertation, Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik der Technischen Universität Hamburg Harburg.
- MEISSNER, F. und BÖKER, G. (1997): Bedienungsanleitung für das Simulationspaket SIMONE. Technischer Bericht, Technische Universität Hamburg–Harburg.
- MESSMER, A. (1994): *Anwendung regelungstechnischer Verfahren zur dynamischen Routenführung in Schnellstraßennetzen*. Dissertation, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität München.
- MEYBERG, K. und VACHENAUER, P. (1990): *Höhere Mathematik 1*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- MOBINET KONSORTIUM (1998): MOBINET Technische Beschreibung. Technischer Bericht, München. Stand 3.8.98.
- MORIN, J.-M.; RICQUEZ, P. und GABARD, J.-F. (1994): Aid-to-decision for motorway management: The expert system OPERA. In *Proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*. ERTICO, Paris.
- NAUCK, D. (1994): *Modellierung Neuronaler Fuzzy-Regler*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- NAUCK, D.; KLAWONN, F. und KRUSE, R. (1994): *Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme*. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden.
- NELSON, L. (1999): Seeing is believing. *ITS International*, Band July / August, Seiten 38–40.
- PAPAGEORGIU, M. (1990): Dynamic modelling, assignment, and route guidance in traffic networks. *Transportation Research*, Band 24B(6), Seiten 471–495.
- PAPAGEORGIU, M. (1991): *Optimierung*. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- PAPAGEORGIU, M.; BLOSSEVILLE, J. M. und HADJ-SALEM, H. (1990): Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris: Part II: Coordinated on-ramp metering. *Transportation Research*, Band 24A(5), Seiten 371–380.
- PAPAGEORGIU, M. und MESSMER, A. (1990): *METANET A Simulation Program for Motorway Networks*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik. Documentation.

- PAYNE, H. J. (1971): Models of freeway and traffic control. In *Simulation Council Proceedings*, Band 1, Seiten 51–61.
- PISCHNER, T.; SCHAAF, B.; KÜHNE, R.; HAAG, G.; NAUMANN, L. und HUGO, J. (1999): Auswirkungen von telematischer Beeinflussung verkehrsinfrastruktureller Kapazitäten auf die volkswirtschaftliche Rentabilität von Projekten der Bundesverkehrswegeplanung. Technischer Bericht, SSP Consult Beratende Ingenieure GmbH und Steinbeis Transfer Zentrum Angewandte Systemanalyse, Stuttgart. Abschlußbericht Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (FE 96.481/1997).
- PLOSS, G. (1993): *Ein dynamisches Verfahren zur Schätzung von Verkehrsbeziehungen aus Querschnittszählungen*. Dissertation, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München.
- POPOVIĆ, A. (1997): *Implementierung des Kalmanfilters zur Zustandsschätzung auf Bundesautobahnen*. Praktikumsbericht, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München.
- POPOVIĆ, A. (1998): *Implementierung eines universellen Approximators an Fallbeispielen aus der Verkehrstechnik*. Diplomarbeit, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München.
- POSCHINGER, A. (1994): *Regelungskonzepte für einen parallelen Hybridantriebsstrang*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für elektrische Antriebstechnik, Technische Universität München.
- POSCHINGER, A. (1995): Untersuchung zur Anwendbarkeit neuronaler Netze im Verkehr. unveröffentlichte Notiz.
- POSCHINGER, A. (1996): Some aspects for the development of a new motorway control algorithm. In *4th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, Newcastle upon Tyne*. preprint of extended abstracts.
- POSCHINGER, A. (1997): Alternativroutensteuerung Saarland, die Algorithmen. Technischer Bericht, TransVer, München.
- POSCHINGER, A. und BUSCHMEIER, C. (1996): ARES Version 0.1. Technischer Bericht, Fachgebiet Verkehrstechnik- und Planung der TU München, BMW AG Verkehrsforschung. nicht veröffentlicht.
- POSCHINGER, A.; CREMER, M. und KELLER, H. (1997a): A control scheme for variable direction signs using dynamic reference values. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Boston*, Seite 121 (Digest).

- POSCHINGER, A.; KELLER, H. und CREMER, M. (1999): Zustandsbasierte Netzeinflussung. In *HEUREKA '99*, Seiten 399–413. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Karlsruhe.
- POSCHINGER, A.; SCHMID, H. und FRIEDRICH, B. (1997b): Pflichtenheft Alternativroutensteuerung Saarland. Technischer Bericht, TransVer, München.
- PTV (1993): Baubeschreibung der Verkehrsbeeinflussungsanlage Saarland. Technischer Bericht, ptv Consult.
- PTV (1996): Empfehlung für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Straßen, EWS-97. Technischer Bericht, PTV Consult GmbH Beratende Verkehrsingenieure, Karlsruhe. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr.
- RATZENBERGER, R.; HILD, R. und LANGMANTEL, E. (1995): Vorausschätzung der Verkehrsentwicklung in Deutschland bis zum Jahr 2010. Forschungsbericht, ifo Institut für Wirtschaftsforschung, München.
- REUSCHEL, A. (1950): Fahrzeugbewegungen in der Kolonne. *Österreichisches Ingenieurarchiv*, Band 4, Seiten 193–215.
- RICHARDS, P. (1956): Shockwaves on the highway. *Operation Research*, Band 4, Seiten 42–51.
- ROJAS, R. (1993): *Theorie der neuronalen Netze, Eine systematische Einführung*. Springer Verlag, Berlin.
- RUMELHART, D.; HINTON, G. und WILLIAMS, R. (1986): Learning internal representations by back-propagating errors. *Nature*, Band 323, Seiten 533–536.
- SACHSE, T. (1998): *Alternativroutensteuerung in Autobahnnetzen auf der Grundlage einer erweiterten Analyse des Verkehrsablaufs*. Dissertation, Technische Universität München, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung.
- SCHMID, H. und SACHSE, T. (1995): Variable message sign control on the basis of advanced traffic analysis and prognosis. In *Computing in Civil and Building Engineering*, Band 2, Seiten 1439–1443.
- SCHMIDT, G. (1987): *Grundlagen der Regelungstechnik*. Springer-Verlag, zweite Auflage.
- SCHNABEL, W. und LOHSE, D. (1997): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*, Band 1. Verlag für Bauwesen, Berlin, zweite Auflage.
- SCHRÜFER, E. (1988): *Elektrische Meßtechnik*. Carl Hanser Verlag, München Wien.
- SHELL (1997): Pkw-Szenarien. Deutsche Shell Aktiengesellschaft Abt. Energie- und Wirtschaftspolitik. Reihe: Analysen und Vorträge.

- SIEGENER, W.; BUSCH, F.; EVERTS, K.; KELLER, H. und MÜLLER, F. (1992): Hinweise für Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen. Forschungsbericht, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit.
- SLOTINE, J.-J. E. und LEE, W. (1991): *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- SMULDERS, S. (1987): Modeling and filtering of freeway traffic flow. In *Transportation and Traffic Theory*, Herausgeber Gartner, N. H. und Wilson, N. H., Seiten 139–158. Elsevier, New York, Amsterdam, London.
- STROUSTRUP, B. (1994): *The C++ Programming Language*. Addison-Wesley Publishing Company, zweite Auflage.
- SUGENO, M. (1974): *Theory of Fuzzy Integral and its Application*. Dissertation, Tokyo Institute of Technology.
- TAKAGI, T. und SUGENO, M. (1985): Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Band 15, Seiten 116–132.
- THORMANN, B. (1999): *Szenarien als Basis für simulative Untersuchungen*. Diplomarbeit, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München. Einzureichen.
- TREIBER (1999): Dynamische Verkehrsflußmodellierung an Engstellen. Vortrag im Arbeitsausschuß der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen.
- TSAVACHIDIS, M.; MCLEAN, T.; BRADER, C.; HANGLEITER, S.; DAMAS, C.; MAXWELL, B. und BARBER, P. (1998): Urban integrated traffic control. TABASCO Deliverable number 8.3.
- UNDERWOOD, R. (1961): Speed, volume, and density relationships. In *Quality and Theory of Traffic Flow*, Seiten 141–188. Yale Bureau of Highway Traffic.
- VIA BERATENDE INGENIEURE (1999): Verkehrsbeeinflussungsanlage A99/A92. Vorentwurf, Freistaat Bayern Autobahndirektion Südbayern.
- WARDROP, J. (1952): Some theoretical aspects of road traffic research. In *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Band II/1, Seiten 325–378.
- WERBOS, P. (1974): *Beyond Regressions: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Science*. Dissertation, Harvard University, Cambridge, M.A.
- WIEDEMANN, R. (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen 8, Universität Karlsruhe.

- WOLFF, G. D. (1990): *Simulationstechnische Untersuchung von regelungstechnischen Konzepten zur Wechselwegweisung in Schnellstraßennetzen*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Steuerung- und Regelungstechnik der Technischen Universität München.
- ZACKOR, H. (1972): Beurteilung verkehrsabhängiger Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Band 128.
- ZADEH, L. (1965): Fuzzy sets. *Information and Control*, Band 8, Seiten 338–353.
- VAN ZUYLEN, H. und WILLUMSEN, K. (1980): The most likely trip matrix estimation from traffic counts. *Transportation Research*, Band 14B, Seiten 281–293.

Anhang A

Linearisierung des Modells

A.1 Ermittlung der Systemmatrix

A.1.1 Linearisierung des Cremer/Payne-Modells

Von den Zuständen des Vorgängersegments ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

$$\partial v_i / \partial v_{i-1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} v_i \quad (\text{A.1})$$

$$\partial v_i / \partial k_{i-1}^{(*)} = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\partial k_i / \partial v_{i-1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} \alpha \cdot k_{i-1} \quad (\text{A.3})$$

$$\partial k_i / \partial k_{i-1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} \alpha \cdot v_{i-1} \quad (\text{A.4})$$

Diese Gleichungen gelten nur dann, wenn das Vorgängersegment längenbehaftet und keine Meßstelle ist; ansonsten sind alle Komponenten gleich null.

Von den eigenen Zuständen ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

$$\partial v_i / \partial v_i = 1 - \frac{T}{\tau} + \frac{T}{L_i} (v_{i-1} - 2v_i) \quad (\text{A.5})$$

$$\partial v_i / \partial k_i = \frac{\nu T}{L_i \cdot \tau} \frac{\kappa + k_{i+1}}{(k_i + \kappa)^2} + \frac{T}{\tau} \frac{\partial V_i}{\partial k_i} \quad (\text{A.6})$$

$$\partial k_i / \partial v_i = -\frac{T}{L_i} k_i (1 - 2 \cdot \alpha) \quad (\text{A.7})$$

$$\partial k_i / \partial k_i = 1 + \frac{T}{L_i} v_i (1 - 2 \cdot \alpha) \quad (\text{A.8})$$

Folgende Gleichungen beschreiben die Abhängigkeiten vom Nachfolgersegment:

$$\partial v_i / \partial v_{i+1}^{(*)} = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$\partial v_i / \partial k_{i+1}^{(*)} = -\frac{\nu T}{L_i \cdot \tau} \frac{1}{k_i + \kappa} \quad (\text{A.10})$$

$$\partial k_i / \partial v_{i+1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} (\alpha - 1) k_{i+1} \quad (\text{A.11})$$

$$\partial k_i / \partial k_{i+1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} (\alpha - 1) v_{i+1} \quad (\text{A.12})$$

Diese Gleichungen gelten nur dann, wenn das Nachfolgersegment keine Meßstelle ist, ansonsten sind alle Komponenten gleich null.

Von der freien Geschwindigkeit $V_{fA(i)}$ des Segmentes i ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

$$\partial v_i / \partial V_{fA(i)} = \frac{T}{\tau} \frac{\partial V_{A(i)}}{\partial V_{fA(i)}} \quad (\text{A.13})$$

Die Ableitungen nach allen anderen Zuständen ergeben 0.

Für die Linearisierung an Knoten werden zum Nachdifferenzieren die partiellen Ableitungen der Verkehrsflüsse benötigt. Diese lauten:

$$\partial q_i / \partial v_i = \alpha k_i \quad (\text{A.14})$$

$$\partial q_i / \partial k_i = \alpha v_i \quad (\text{A.15})$$

$$\partial q_i / \partial v_{i+1} = (1 - \alpha) k_{i+1} \quad (\text{A.16})$$

$$\partial q_i / \partial k_{i+1} = (1 - \alpha) v_{i+1} \quad (\text{A.17})$$

A.1.2 Linearisierung des erweiterten Modells

Von den Zuständen des Vorgängersegments ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

$$\partial v_i / \partial v_{i-1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} v_i \quad (\text{A.18})$$

$$\partial v_i / \partial k_{i-1}^{(*)} = 0 \quad (\text{A.19})$$

$$\partial k_i / \partial v_{i-1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} \frac{k_{max_i} - k_i}{k_{max_i}} k_{i-1} \quad (\text{A.20})$$

$$\partial k_i / \partial k_{i-1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} \frac{k_{max_i} - k_i}{k_{max_i}} v_{i-1} \quad (\text{A.21})$$

Diese Gleichungen gelten nur dann, wenn das Vorgängersegment längenbehaftet und insbesondere keine Meßstelle ist, ansonsten sind alle Komponenten gleich null.

Von den eigenen Zuständen ergeben sich die Abhängigkeiten:

$$\partial v_i / \partial v_i = 1 - \frac{T}{L_i} (v_{i-1} - 2 \cdot v_i) - \frac{T}{\tau} \quad (\text{A.22})$$

$$\partial v_i / \partial k_i = \frac{T}{\tau} \left(\frac{0.5V_i(k_i)}{kmax_i} + 0.5 \left(\frac{k_i}{kmax_i} + \frac{L_i - lmin}{lmax - lmin} \right) \frac{\partial V_i}{\partial k_i} - \frac{0.5V_{i+1}(k_{i+1})}{kmax_i} \right) \quad (\text{A.23})$$

$$\partial k_i / \partial v_i = \frac{T \cdot k_i}{L_i} \left(\frac{k_i}{kmax_i} + \frac{k_{i+1} - kmax_{i+1}}{kmax_{i+1}} \right) \quad (\text{A.24})$$

$$\partial k_i / \partial k_i = 1 + \frac{T}{L_i} \left(\left(\frac{2k_i}{kmax_i} + \frac{k_{i+1} - kmax_{i+1}}{kmax_{i+1}} \right) v_i - \frac{v_{i-1}k_{i-1}}{kmax_i} \right) \quad (\text{A.25})$$

Folgende Gleichungen beschreiben die Abhängigkeiten vom Nachfolgersegment:

$$\partial v_i / \partial v_{i+1}^{(*)} = 0 \quad (\text{A.26})$$

$$\partial v_i / \partial k_{i+1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} \left(1 - 0.5 \left(\frac{k_i}{kmax_i} + \frac{L_i - lmin}{lmax - lmin} \right) \right) \frac{\partial V_{i+1}}{\partial k_{i+1}} \quad (\text{A.27})$$

$$\partial k_i / \partial v_{i+1}^{(*)} = -\frac{T}{L_i} \left(\frac{k_{i+1}^2}{kmax_{i+1}} \right) \quad (\text{A.28})$$

$$\partial k_i / \partial k_{i+1}^{(*)} = \frac{T}{L_i} \left(\frac{k_i \cdot v_i}{kmax_{i+1}} - \frac{2 \cdot v_{i+1} \cdot k_{i+1}}{kmax_{i+1}} \right) \quad (\text{A.29})$$

Diese Gleichungen gelten nur dann, wenn das Nachfolgersegment keine Meßstelle ist, ansonsten sind alle Komponenten gleich null.

Für die freien Geschwindigkeiten ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

$$\partial v_i / \partial V_{f_{A(i)}} = \frac{T}{\tau} \left(0.5 \left(\frac{k_i}{kmax_i} + \frac{L_i - lmin}{lmax - lmin} \right) \right) \frac{\partial V_i}{\partial V_{f_{A(i)}}} \quad (\text{A.30})$$

$$\partial v_i / \partial V_{f_{A(i+1)}} = \frac{T}{\tau} \left(0.5 \left(\frac{k_i}{kmax_i} + \frac{L_i - lmin}{lmax - lmin} \right) \right) \frac{\partial V_i}{\partial V_{f_{A(i+1)}}} \quad (\text{A.31})$$

Die Ableitungen nach allen anderen Zuständen ergeben 0.

Für die Linearisierung an Knoten werden zum Nachdifferenzieren die partiellen Ableitungen der Verkehrsflüsse benötigt. Diese lauten:

$$\partial q_i / \partial v_i = \left(1 - \frac{k_{i+1}}{kmax_{i+1}} \right) k_i \quad (\text{A.32})$$

$$\partial q_i / \partial k_i = \left(1 - \frac{k_{i+1}}{kmax_{i+1}} \right) v_i \quad (\text{A.33})$$

$$\partial q_i / \partial v_{i+1} = -\frac{k_{i+1}^2}{kmax_{i+1}} \quad (\text{A.34})$$

$$\partial q_i / \partial k_{i+1} = \frac{2k_{i+1}v_{i+1}}{kmax_{i+1}} - \frac{v_i k_i}{kmax_{i+1}} \quad (\text{A.35})$$

A.1.3 Linearisierung der statischen Geschwindigkeit $V(k)$

Die statische Geschwindigkeit muß sowohl nach der Dichte k als auch der freien Geschwindigkeit V_f partiell differenziert werden. Für das Fundamentaldiagramm nach GREENSHIELDS (1935) (Gleichung 3.4) ergeben sich folgende Ableitungen:

$$\partial V / \partial k = \frac{V_f}{k_{max}} \quad (\text{A.36})$$

$$\partial V / \partial V_f = 1 - \frac{k}{k_{max}} \quad (\text{A.37})$$

Für das Fundamentaldiagramm nach DRAKE ET AL. (1967) (Gleichung 3.8) ergeben sich die partiellen Ableitungen zu:

$$\partial V / \partial k = \frac{-a \cdot b \cdot V_f}{k_{max}} \left(1 - \left(\frac{k}{k_{max}}\right)^a\right)^{b-1} \left(\frac{k}{k_{max}}\right)^{a-1} \quad (\text{A.38})$$

$$\partial V / \partial V_f = \left(1 - \left(\frac{k}{k_{max}}\right)^a\right)^b \quad (\text{A.39})$$

Die partiellen Ableitungen für das Fundamentaldiagramm aus Gleichung 3.13 lauten:

$$\partial V / \partial k = \frac{-V_f}{k_c} \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{k}{k_c}\right)^a\right) \left(\frac{k}{k_c}\right)^{a-1} \quad (\text{A.40})$$

$$\partial V / \partial V_f = \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{k}{k_c}\right)^a\right) \quad (\text{A.41})$$

A.1.4 Linearisierung am Knoten

In den folgenden Gleichungen wird die Indizierung nach Bild 3.12 verwendet. Die partiellen Ableitungen der Größen der logischen Segmente von den Verkehrsgrößen der physikalischen Vorgängersegmente berechnen sich zu:

$$\partial v_j^* / \partial v_i = \frac{\sum_{i=1}^I (q_i) \left(q_i + v_i \frac{\partial q_i}{\partial v_i}\right) - \sum_{i=1}^I (q_i \cdot v_i) \frac{\partial q_i}{\partial v_i}}{\left(\sum_{i=1}^I (q_i)\right)^2} \quad (\text{A.42})$$

$$\partial v_j^* / \partial x_i = \frac{\sum_{i=1}^I (q_i) \left(v_i \frac{\partial q_i}{\partial x_i}\right) - \sum_{i=1}^I (q_i \cdot v_i) \frac{\partial q_i}{\partial x_i}}{\left(\sum_{i=1}^I (q_i)\right)^2}, \quad x_i \neq v_i \quad (\text{A.43})$$

$$\partial q_j^* / \partial x_i = b_j \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (\text{A.44})$$

Die Größe x_i ist eine beliebige Verkehrsgröße eines beliebigen Vorgängersegments¹ i am Knoten. Diese Gleichungen gelten nur dann, wenn die betreffenden Vorgängersegmente längenbehaftet und insbesondere keine Meßstellen sind; ansonsten sind die jeweiligen Komponenten gleich null.

Die Ableitungen nach den Abbiegeraten berechnen sich zu:

$$\partial q_{j1}^*/\partial b_{j2} = \sum_{i=1}^I q_i \quad , \text{ mit } j1 = j2, \quad (\text{A.45})$$

und

$$\partial q_{j1}/\partial b_{j2} = 0 \quad , \text{ mit } j1 \neq j2, \quad (\text{A.46})$$

wenn b_{j1} ein Zustand ist; ansonsten gilt die Formel:

$$\partial q_{j1}/\partial b_{j2} = - \sum_{i=1}^I q_i \quad , \text{ mit } j1 \neq j2 \quad (\text{A.47})$$

Folgende partielle Ableitungen beschreiben die Abhängigkeiten logischer Segmente vor einem Knoten von den physikalischen Nachfolgersegmenten:

$$\partial v_i^*/\partial v_j = \frac{\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \sum_{j=1}^J (k_j) \left(q_i k_j + \sum_{j=1}^J (v_j k_j) \frac{\partial q_i}{\partial v_j} \right)}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \right)^2} - \quad (\text{A.48})$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J (k_j) \sum_{j=1}^J (q_i v_j k_j) \sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I \frac{\partial q_i}{\partial v_j}}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \right)^2}$$

$$\partial v_i^*/\partial k_j = \frac{\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \sum_{j=1}^J (q_i v_j k_j)}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \right)^2} + \quad (\text{A.49})$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \sum_{j=1}^J (k_j) \left(q_i v_j + \sum_{j=1}^J (v_j k_j) \frac{\partial q_i}{\partial k_j} \right)}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \right)^2} -$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J (k_j) \sum_{j=1}^J (q_i v_j k_j) \left(2k_j \sum_{i=1}^I (q_i) + \sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I \frac{\partial q_i}{\partial k_j} \right)}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \right)^2}$$

¹Der Index i bezieht sich auf die Knotensegmentierung!

$$\partial v_i^* / \partial x_i = \frac{\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \sum_{j=1}^J (k_j) \sum_{j=1}^J (v_j k_j)}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \right)^2} - \quad (\text{A.50})$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J (k_j) \sum_{j=1}^J (q_i v_j k_j) \sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I \frac{\partial q_i}{\partial x_i}}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j^2) \sum_{i=1}^I (q_i) \right)^2}$$

$$\partial k_i^* / \partial v_j = 0 \quad (\text{A.51})$$

$$\partial k_i^* / \partial k_j = \frac{2k_j \sum_{j=1}^J (k_j) - \sum_{j=1}^J (k_j^2)}{\left(\sum_{j=1}^J (k_j) \right)^2} \quad (\text{A.52})$$

Diese Gleichungen gelten nur dann, wenn das jeweilige Nachfolgersegment keine Meßstelle ist; ansonsten sind die betreffenden Komponenten gleich null.

A.2 Ermittlung der Meßmatrix

Die Linearisierung der Meßgleichung nach den Zuständen des Vorgängersegments einer Meßstelle geschieht nach folgenden Formeln:

$$\partial q_m / \partial v = k \quad (\text{A.53})$$

$$\partial q_m / \partial k = v \quad (\text{A.54})$$

$$\partial v_m / \partial v = 1 \quad (\text{A.55})$$

$$\partial v_m / \partial k = 0 \quad (\text{A.56})$$

- q_m gemessener Verkehrsfluß
- v_m gemessene Geschwindigkeit
- v Geschwindigkeit auf dem letzten Segment vor der Meßstelle
- k Dichte auf dem letzten Segment vor der Meßstelle

Die Gleichungen müssen an Knoten entsprechend der Kettenregel nachdifferenziert werden (Gleichungen A.42–A.52). Die partiellen Ableitungen nach allen übrigen Zuständen sind null.

Anhang B

Die verwendeten Variablen

Grundlegende verkehrstechnische Variablen

k	Verkehrsdichte [$Fz/(km \text{ Fahrstreifen})$]
q	Verkehrsstärke [Fz/h]
qm	gemessene Verkehrsstärke
qr	Verkehrsstärke (Rohdaten)
v	Geschwindigkeit [km/h]
vm	gemessene Geschwindigkeit
vr	Geschwindigkeit (Rohdaten)

Variablen der Systemtheorie

variable	Vektor von Variablen
$\hat{\cdot}$	geschätzter Wert
A	Systemmatrix
B	Systemdurchgriff
C	Meßmatrix
D	Durchgriff der Störungen
F_0	Übertragungsfunktion
H	Korrekturmatrix (Filtermatrix)
K_p	Verstärkung eines Proportionalreglers
n	Zeitschritt
\cdot_p	prognostizierter Wert
Π	Kovarianzmatrix des Zustandes
s	(dynamischer) Sollwert
T	Zeitschrittweite
T_I	Zeitkonstante eines Integrators
T_T	Totzeitkonstante

u	Steuerungsvariable
w	Meßrauschen
x	Zustandsvariable
y	Meßwert
z	Systemrauschen
\mathbf{Z}	Erwartungswert für die Kovarianzmatrix des Systemrauschens

Fundamentaldiagramm

a	Anpassungsparameter
b	Anpassungsparameter
c	Kapazität
k_c	Dichte bei maximalem Verkehrsfluß
k_{max}	maximale Dichte
u	relative Geschwindigkeitsbegrenzung
v_{max}	absolute Geschwindigkeitsbegrenzung
V	statische Geschwindigkeit
V_f	Geschwindigkeit bei Dichte $k = 0$
V_c	Geschwindigkeit bei maximalem Verkehrsfluß

Dynamische Verkehrsmodellierung

α	Parameter der Verkehrsflußgleichung
f	dynamischer Faktor der Modellerweiterung
i	Segmentindex
k_{max}	maximale Dichte nach Fundamentaldiagramm
κ	Korrekturfaktor der Geschwindigkeitsgleichung
l	Zahl der Fahrstreifen
l_{max}	maximale Segmentlänge
l_{min}	minimale Segmentlänge
L	Segmentlänge
met	Implementierung nach Metanet
n	Zeitschritt
ν	Parameter der Geschwindigkeitsgleichung
sim	Implementierung nach Simone
τ	Zeitkonstante
V	stationäre Geschwindigkeit
W	Länge der deterministischen Warteschlange

Netzhafter Verkehrsflußmodellierung

$.$	Kennzeichnung logischer Segmente
b	Abbiegerate
β	prozentuale Wirkung einer Schaltung
i	Segmentbezogener Index einer in einen Knoten mündenden Kante i
$(i$	wahre Quelle in der Quelle–Zielmatrix)
I	Zahl der Zuflüsse eines Knotens
j	Segmentbezogener Index einer aus dem Knoten kommenden Kante j
$(j$	wahres Ziel in der Quelle–Zielmatrix)
J	Zahl der Abflüsse eines Knotens
k	Quelle eines Kordons
l	Ziel eines Kordons
m	Quelle an Knotenpunkt
n	Ziel an einem Knotenpunkt
r	Routenindex
R	Zahl der Routen (über ein Segment)
s	aktiver Schaltplan

Neuro/Fuzzy–Approximator

a	Erfüllungsgrad (Fuzzymaß, Zugehörigkeitswert)
A	Fuzzymenge passend zur r -ten Regel
E	Fehler, Lernsignal
f	Abbildung der Eingangsgrößen ξ auf die Ausgangsgröße y
i	Index der Fuzzymenge
I	Zahl der Fuzzymengen (für eine Eingangsgröße)
j	Index der Eingangsmenge
J	Zahl der Eingangsgrößen
lr_1	Lernrate der Fuzzymengen
lr_2	Lernrate der Fuzzyregeln
m	Mittelpunkt einer Fuzzymenge
p	Wert einer Prämisse
r	Index der Regel
R	Zahl der Regeln
x	normierter Eingangswert
X	unnormierter Eingangswert
X_{min}	minimaler Eingangswert

X_{max}	maximaler Eingangswert
ξ	unscharfer Eingangswert
y	normierter Ausgangswert
Y	unnormierter Ausgangswert
Y_{min}	minimaler Ausgangswert
Y_{max}	maximaler Ausgangswert
Z	Zahl der Lernbeispiele in der Epoche

Umleitungsalgorithmus

d	Nachfrage
c	Kapazität
i	Routenindex
ir	Segmente vor dem Stauanfang
j	Routenindex, Segmentindex
k_m	geringste mittlere Dichte
ki	Reglerverstärkung (Integralteil)
kp	Reglerverstärkung (Proportionalteil)
lc	(normierte) Staulänge
lcs	(dynamischer) Sollwert für Staulänge
L_0	Staulängen Anpassung
q_{aus}	Stauabflüsse
q_{in}	Stauzuflüsse
qs	Sollwert für die Verkehrsmenge
q_{1aus}	Abflüsse aus der Hauptroute
q_{1in}	Zuflüsse in die Hauptroute
q_{us}	Sollwert für die <i>umzuleitende</i> Verkehrsmenge
$sfac$	Sicherheitsfaktor
S	Störgröße
tr	Reisezeit
tr_1	Reisezeit auf der Hauptroute
tr_2	Reisezeit auf der Alternativroute
tr_B	Differenzreisezeit
trs	(dynamischer) Sollwert für die Reisezeit
T_0	Reisezeit Anpassung
vb	Geschwindigkeitsschwellenwert
vm	geringste mittlere Geschwindigkeit
x	Ort ab Routenanfang

Umleitungsregler

β	Akzeptanzrate
d	Schaltplan
d_1	Schaltplan mit Wirkung $0 Fz/h$
d_D	Schaltplan mit maximaler Wirkung
D	gewählter Schaltplan
D_m	aktiver Schaltplan
D_r	Schaltplan (Rohdaten)
i	Schaltplanindex
j	Schaltplanindex
q_b	Schwellenwert
r	Routenindex
t_j	Zeitanteil bei Pulsweitenmodulation

Bewertung

A	Ausfallwahrscheinlichkeit
E_l	mittlerer linearer Fehler
E_q	mittlerer quadratischer Fehler
E_v	Varianzmaß
G	Güte
Z	Zuverlässigkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit