

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen
der Universität Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach

Dr.-Ing. Hans Hubschneider
**Mikroskopisches Simulationssystem
für Individualverkehr
und Öffentlichen Personennahverkehr**

Heft 26



1983

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe. Sie wäre ohne die an diesem Institut geleisteten Entwicklungsarbeiten im Bereich mikroskopischer Simulationsmodelle des Verkehrsablaufs nicht möglich gewesen.

Sehr herzlich danken möchte ich zuerst meinem Referenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Wiedemann, der aus eigenen Erfahrungen die Problematik der Simulationsmodelle kennt und durch viele Diskussionen und Ratschläge diese Arbeit förderte. Insbesondere freue ich mich, daß er sich so gründlich mit einer doch etwas theoretischen Dissertationsschrift auseinandergesetzt hat.

In diesen Dank möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Hoffmann einschließen, der freundlicherweise das Korreferat übernommen hat.

Danken möchte ich auch dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach, und allen Mitarbeitern des Instituts für Verkehrswesen, die einen Informatiker in die Geheimnisse der Ingenieurwissenschaften eingeweiht haben.

Schließlich gilt mein herzlicher Dank allen, die mich durch Schreib- und Zeichenarbeiten unterstützt haben oder mit mir Nächte am Rechnerterminal verbrachten (die Rechenarbeiten erfolgten auf einer Großrechenanlage UNIVAC 1106/1108 des Rechenzentrums der Universität).

Hans Hubschneider

K U R Z F A S S U N G

HUBSCHNEIDER, H.:

Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und
Öffentlichen Personennahverkehr

193 Seiten, 51 Abbildungen

Das Simulationsmodell MISSION des Instituts für Verkehrswesen erlaubt die Nachbildung des Fahrverhaltens von Individualverkehr und Öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV) auf Richtungsfahrbahnen und in Netzausschnitten. Die Simulation erfolgt sehr realitätsnah auf der Basis des Verhaltens von Einzelfahrzeugen. Es werden Schnittstellen für beliebige Signalsteuerungsmodelle und Leitsysteme des ÖPNV zur Verfügung gestellt.

Diese Arbeit zeigt die Systematik der Erstellung des Simulationssystems. Dabei wird der gesamte Entwicklungsvorgang (Modellstruktur, Daten- und Ablaufstrukturen) sowie die Realisierung des Modells in einem Programmsystem beschrieben.

S U M M A R Y

HUBSCHNEIDER, H.:

A microscopic simulation system for private and public transport

193 pages, 51 figures

The simulation model MISSION developed at the Institut für Verkehrswesen (Institute of Transportation Engineering) permits the reconstruction of private and public vehicle behaviour on carriageways and in network sections. The simulation is based on a realistic description of individual vehicle behaviour. There are program interfaces for traffic signal and public transport control programs.

The thesis shows the methodology behind the development of the simulation system. The entire development procedure (the derivation of the model and data structure, and the simulation algorithm) as well as the implementation in a computer program is described.

R E S U M E

HUBSCHNEIDER, H.:

Modèle de simulation pour les véhicules particuliers et
les transports publics urbains

193 pages, 51 illustrations

Le modèle de simulation MISSION de l'Institut für Verkehrswesen (Institut du trafic et des transports) permet l'imitation de la conduite des véhicules particuliers et des transports publics urbains sur des chaussées unidirectionnelles et dans un secteur d'un réseau. Proche de la réalité, la simulation se produit sur la base du comportement des véhicules individuels. Pour la compatibilité avec les modèles différents du réglage des feux et les systèmes directrices des transports publics urbains, les interfaces sont fournis.

Ce rapport décrit le système pendant la construction du modèle; à ce sujet tout le développement (la structure du modèle, des données et du déroulement) ainsi que la réalisation du modèle dans un système de programmes est présenté.

INHALT

	Seite
EINLEITUNG UND ÜBERBLICK	1
1. MODELLE ZUR SIMULATION DES STRASSENVERKEHRSABLAUFS	6
1.1 Modelle und Simulationsexperimente	6
1.1.1 Klassifizierung der Modelle	6
1.1.2 Mikroskopische und makroskopische Modelle des Verkehrsablaufs	9
1.1.3 Simulation	11
1.1.4 Diskretisierung	12
1.2 Aspekte der Entwicklung eines Simulationsmodells	14
1.3 Ausgewählte Simulationsmodelle zur mikroskopischen Nachbildung von Verkehrsabläufen	18
1.3.1 Modell NETSIM/UTCS	18
1.3.2 Modell MULTSIM	20
1.3.3 TEXAS-Modell	21
1.3.4 Modelle des Instituts für Verkehrswesen	23
2. ENTWICKLUNGSRAHMEN FÜR DIE MODELLBILDUNG	25
2.1 Anwendungsbereiche des Simulationsmodells	26
2.2 Betrachtete Fahrzeugarten	28
2.3 Nachbildung der Streckengeometrie	29

	Seite	
2.4	Abgrenzung des Modells	32
2.5	Zeitabläufe im Simulationsmodell	34
3.	ENTWICKLUNGSRAHMEN FÜR DIE REALISIERUNG DES MODELLS	36
3.1	Forderungen an das Simulationssystem	36
3.2	Organisationsstrukturen	38
3.3	Schnittstellen und Portabilität	39
3.4	Erweiterungsmöglichkeiten	41
4.	MODELLBILDUNG - GROBSTRUKTUR UND SCHNITTSTELLEN	43
4.1	Grobstruktur des Simulationsmodells	43
4.2	Schnittstellen des Simulationsmodells	48
	4.2.1 Schnittstelle Verkehrsablauf - Signalsteuerung	49
	4.2.2 Schnittstelle Verkehrsablauf - ÖV-System	51
5.	MODELLBILDUNG - BEREICHE DES SIMULATIONSMODELLS	54
5.1	Streckenbeschreibung	54
5.2	Erzeugung von Verkehrsströmen	60
5.3	Entscheidungen	64
	5.3.1 Richtungsentscheidungen	65
	5.3.2 Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen	68

	Seite	
5.4	Störungsquerschnitte	72
5.5	Bereichsorientiertes Verhaltensmodell	75
	5.5.1 Verhalten in Längsrichtung	78
	5.5.2 Spurwechselperhalten	81
5.6	Lokale Detektoren	85
5.7	Haltestellen und Linien für den Öffentlichen Verkehr	88
5.8	Ortung von ÖV-Fahrzeugen	91
5.9	Datenerfassung während der Simulation	92
6.	BEISPIELE ZUR NACHBILDUNG VON NETZAUSSCHNITTEN	94
7.	PROGRAMMIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS - ÜBERBLICK	100
7.1	Programmiersprache	100
	7.1.1 Auswahl der Programmiersprache	100
	7.1.2 Eigenschaften der Programmier- sprache SIMULA 67	102
7.2	Organisationsstrukturen des Simulationsmodells	106
7.3	Zeitliche Strukturen	113
8.	STRUKTUREN DES PROGRAMMSYSTEMS	117
8.1	Prozessoren	117
8.2	Programmumgebungen	120

	Seite	
8.3	Umgebungsklassen für Datenblöcke	121
8.4	Eingabeprozessor MISS	122
8.5	Simulationsprozessor MISSION	126
	8.5.1 Bausteine des Simulations- prozessors	127
	8.5.2 Logische Struktur	131
	8.5.3 Ablaufstruktur des Simulations- prozessors	134
8.6	Schnittstellen	140
	8.6.1 Schnittstellen zu den Modellen SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM	140
	8.6.2 Schnittstellen zu Auswerte- programmen	143
9.	REALISIERUNG DER MODULE DES SIMULATIONSSYSTEMS ³	145
9.1	Programmumgebung	145
	9.1.1 Umgebungsklasse EIN-AUSGABE	146
	9.1.2 Umgebungsklasse ZUFALL	147
	9.1.3 Datenklasse FAHRZEUGE	148
	9.1.4 Datenklasse STRUKTUR	149
9.2	Module des Eingabeprozessors MISS	150
	9.2.1 Klasse DRUCK	150
	9.2.2 Klasse ALLES-LESEN	150
	9.2.3 Klasse AUFBAU	151
	9.2.4 Klasse WEGSCHREIBEN	155
9.3	Module des Simulationsprozessors MISSION	156
	9.3.1 Gemeinsame Struktur von Bearbeitungsmodulen	156
	9.3.2 Klasse INTERAKTION	158

	Seite
9.3.3 Klasse WIEDERAUFBAU	161
9.3.4 Klasse FUNKTIONEN	162
9.3.5 Klasse INPUT	164
9.3.6 Klasse ENTSCHEID	166
9.3.7 Klasse STÖRUNGEN	170
9.3.8 Klasse MESSUNGEN	172
9.3.9 Klasse ÖPNV	172
9.3.10 Klasse TRANSFER	175
10. EIGENSCHAFTEN DES SIMULATIONSSYSTEMS	176
10.1 Umfang des Programmsystems	176
10.2 Speicherbedarf	177
10.3 Rechenzeit	179
10.4 Portabilität	181
11. EICHUNG UND VALIDIERUNG	183
12. MÖGLICHKEITEN ZUR ANWENDUNG DES SIMULATIONSSYSTEMS	185
12.1 Entwicklung von Interaktionsmodellen	185
12.2 Untersuchung und Bewertung von Steuerungsmodellen	186
12.3 Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf und Umweltbelastung	187
LITERATUR	189

Einleitung und Überblick

Der Verkehrsablauf auf Straßen ist ein komplexer Prozeß, der sich aus den Verhaltensweisen einzelner Fahrer in Fahrzeugen mit unterschiedlichen fahrdynamischen Möglichkeiten zusammensetzt. Das wesentlichste Charakteristikum dieser Abläufe ist die Freiheit der Verkehrsteilnehmer, ihre Verhaltensweisen innerhalb gewisser Grenzen frei zu wählen.

Anstrengungen, in die Verkehrsabläufe regelnd einzugreifen, erfordern das Verständnis der grundlegenden Vorgänge im Verkehrsablauf und eine Möglichkeit, Auswirkungen von Beeinflussungsmaßnahmen im voraus abzuschätzen.

Die Durchführung von Experimenten mit der Realität ist im allgemeinen zu teuer oder für Mensch und Umwelt nicht tragbar. Die Verkehrswissenschaft benutzt als Hilfsmittel Modelle des Verkehrsablaufs, die eine Nachbildung interessierender Vorgänge erlauben. Die Durchführung von Experimenten mit solchen Modellen wird als Simulation bezeichnet.

Man kann grundsätzlich unterscheiden zwischen Modellen, die den Verkehrsablauf als Strom betrachten und durch Kenngrößen wie Stärke und Geschwindigkeit beschreiben, und Modellen, die auf der Betrachtung einzelner Fahrer-Fahrzeug-Elemente und deren gegenseitiger Beeinflussung aufbauen.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Simulationssystems für die fahrzeugfeine (mikroskopische) Nachbildung von Verkehrsabläufen auf Straßen vorgestellt.

Das Modell MISSION (mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Nahverkehr) ermöglicht die Nachbildung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen des Individualverkehrs (IV) und des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖV). Die Bewegungsabläufe der einzelnen Fahrzeuge werden sehr realitätsnah auf der Basis eines psycho-physischen Fahrzeug-Folge-Modells nachgebildet, das sich an Wahrnehmungsschranken orientiert. Es können unterschiedliche verkehrliche Umgebungen in Form von Stadtstraßennetzen oder Richtungsfahrbahnen vorgegeben werden.

Das Modell kann zusammen mit beliebigen Steuerungsmodellen für den Individualverkehr und den Öffentlichen Verkehr eingesetzt werden. Es stellt realitätsnahe Schnittstellen zur Nachbildung von Verkehrsdetektoren und Steuerungseinflüssen durch Lichtzeichenanlagen zur Verfügung.

Alle Abläufe während der Simulation können sehr detailliert aufgezeichnet werden. Damit ist die Berechnung beliebiger Kenngrößen des Verkehrsablaufs von Einzelfahrzeugen oder von Verkehrsströmen möglich.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Darstellung der Systematik der Modellentwicklung und der Übertragung des Modells in ein Computerprogramm. Es wird nur kurz auf die Fragen der Eichung und auf Anwendungen eingegangen.

Im einführenden Kapitel werden die grundsätzlichen Möglichkeiten der Modellbildung erläutert und die Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Simulationsmodells dargestellt.

Aus den mit einem Modell zu lösenden Aufgaben folgen die Anforderungen an das Modell. Gleichzeitig müssen die Gesichtspunkte der Realisierung des Modells auf einer Rechenanlage beachtet werden. Diese Bedingungen bilden den Entwicklungsrahmen für ein Simulationsmodell des Verkehrsablaufs. Die Möglichkeiten hierzu werden in den Kapiteln 2 und 3 vorgestellt.

Zum Aufbau eines Modells müssen die realen Vorgänge so strukturiert werden, daß logisch zusammenhängende Einzelabläufe sichtbar werden, die in entsprechende Modellbereiche übertragen werden können (Kapitel 4). Gleichzeitig ist eine Abgrenzung der durch das Modell nachzubildenden Vorgänge erforderlich. Außerdem müssen im Hinblick auf die Berücksichtigung von Steuerungsverfahren geeignete Schnittstellen vorgesehen werden.

Die Modellbereiche orientieren sich jeweils an abgrenzbaren Teilprozessen des Verkehrsablaufs in der Realität. Die Beschreibung der einzelnen Modellbereiche nimmt Bezug auf die Realität und zeigt vorgenommene Abstraktionen auf (Kapitel 5).

Die Modellvorstellungen bilden ein Gefüge von komplexen, logisch/mathematischen Zusammenhängen. Diese müssen in den streng sequentiellen Ablauf eines Computerprogramms

umgesetzt werden. Hilfsmittel für diese Realisierung des Modells bildet die Programmiersprache (Kapitel 7). Damit können Organisationsstrukturen erstellt werden, in die die einzelnen Modellbereiche eingebunden werden. Insbesondere ist eine Ablaufsteuerung erforderlich, die die zeitrichtige Bearbeitung der einzelnen Modellbereiche ermöglicht.

Die Realisierung eines Modells erfordert eine Übertragung der Modellstrukturen in geeignete Programmbausteine (Module). Diese bilden Programme innerhalb des Simulationssystems (Kapitel 8). Die Strukturierung der Programme unterscheidet sich dabei teilweise von den Modellstrukturen.

Bei der Realisierung der Einzelmodule werden die Funktionen jedes Modellbereichs in einen sequentiellen Ablauf übertragen. In Kapitel 9 werden die Ablaufstrukturen innerhalb der Module und die Zusammenarbeit zwischen den unterschiedlichen Modulen im Gesamtsystem beschrieben.

Die Summe der Einzelmodule bildet das Simulationssystem, das als Werkzeug zur Nachbildung von Verkehrsabläufen dienen kann. Es werden die Eigenschaften des Programmsystems in bezug auf Speicher- und Rechenzeitanforderungen beschrieben und in Beziehung zu anderen Simulationsprogrammen gestellt (Kapitel 10).

Das Simulationssystem besteht im wesentlichen aus organisatorischen Strukturen. In den zentralen Modellbe-

reichen für die Beschreibung des Verhaltens von Einzelfahrzeugen wurden im wesentlichen bereits vorhandene Verhaltensmodelle übernommen. Es wird deshalb nur kurz auf die Verifizierung des Gesamtmodells eingegangen (Kapitel 11).

Abschließend werden einige der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des Simulationssystems aufgezeigt (Kapitel 12).

1. Modelle zur Simulation des Straßenverkehrsablaufs

1.1 Modelle und Simulationsexperimente

Der Begriff der Simulation und des Simulationsmodells wird in der Literatur sehr unterschiedlich verwendet. Es erscheint zweckmäßig, zunächst von der Definition des Modells als zweckbezogenem Abbild eines realen Systems auszugehen, wobei das System allgemein als eine Menge von Elementen aufgefaßt wird, die in einer regelmäßigen Wechselwirkung stehen (GORDON, 1972). Die Simulation ist in diesem (weiten) Sinn die Durchführung von Experimenten mit Modellen (COLELLA et al., 1974; KRÜGER, 1975).

Die folgenden Kapitel sollen die Begriffe des "Modells" und der "Simulation" im Zusammenhang mit Modellen des Verkehrsablaufs erläutern.

1.1.1 Klassifizierung der Modelle

Modelle werden in der Literatur nach mehreren Kriterien klassifiziert. Es werden im wesentlichen folgende Eigenschaften unterschieden:

physikalisch	-	mathematisch
statisch	-	dynamisch
stetig	-	diskret
deterministisch	-	stochastisch

Bei einem physikalischen Modell werden die Systemelemente und deren Verknüpfungen durch physikalische Größen dargestellt. Bei der Durchführung von Simulationsexperimenten laufen physikalische Vorgänge ab, die die Realität nachbilden. Ein mathematisches Modell beschreibt das System durch mathematische Variablen und funktionale Zusammenhänge zwischen diesen Variablen. Bei der Durchführung einer Simulation werden die Werte der Variablen entsprechend den Modellzusammenhängen verändert. Modelle des Verkehrsablaufs sind ausschließlich mathematischer Art.

Ein statisches Modell beschreibt den Zustand eines Systems, das sich im Gleichgewicht befindet. In einem dynamischen Modell werden zeitliche Änderungen von Systemattributen beschrieben; diese werden als Aktivitäten bezeichnet.

Ein stetiges Modell ist dadurch gekennzeichnet, daß Aktivitäten kontinuierliche Änderungen der Attribute bewirken. Im Falle eines mathematischen Modells werden die Aktivitäten durch stetige Funktionen oder durch ein System von Differentialgleichungen beschrieben. Das Fahrzeug-Folge-Modell nach HERMAN (1963) ist ein Beispiel für diese Art der Modellbildung. Dabei wird die Beschleunigung eines Fahrzeugs als Funktion seiner Geschwindigkeit, seines Abstands zum Vordermann und der entsprechenden Differenzgeschwindigkeit angegeben.

Bei diskreten Modellen können sich Parameter sprunghaft ändern; die Zeitpunkte, zu denen Entscheidungen über solche Änderungen getroffen werden, werden als "Ereig-

nisse" bezeichnet. Bei mathematischen Modellen werden zur Beschreibung der Modellaktivitäten oft Zustandsvariable, die endlich viele diskrete Werte annehmen können, oder Differenzgleichungen verwendet. Diskrete Modell sind z. B. die Fahrzeug-Folge-Modelle nach MICHAELS (1965) und TODOSIEV (1963). Diese unterscheiden Verhaltensbereiche aufgrund von Wahrnehmungsschwellen (und sind innerhalb der Verhaltensbereiche stetige Modelle).

Deterministische Modelle zeichnen sich dadurch aus, daß die Modellabläufe bei gleichen Randbedingungen identisch sind. Bei stochastischen Modellen können dagegen durch zufällige Einflüsse bei gleichen Randbedingungen die Modellabläufe bei unterschiedlichen Experimenten variieren. Aus der Streubreite der Ergebnisse nach Durchführung mehrerer Experimente kann auf die Stabilität der nachgebildeten Abläufe geschlossen werden. Im mathematischen Modell werden die stochastischen Einflüsse durch Zufallsvariablen oder durch stochastische Funktionen nachgebildet. Von den oben angesprochenen Fahrzeug-Folge-Modellen ist das Modell nach HERMANN als deterministisch einzuordnen, während die psycho-physischen Abstandsmodelle nach MICHAELS/TODOSIEV stochastische Schwankungen der Wahrnehmungsschwellen und damit des Fahrzeug-Folge-Vorgangs berücksichtigen.

1.1.2 Mikroskopische und makroskopische Modelle des Verkehrsablaufs

"Ein wesentliches Charakteristikum des Verkehrsablaufs auf Straßen ist die stets vorhandene, wenn auch oft recht eng begrenzte Freiheit der Verkehrsteilnehmer, ihre Verhaltensweisen zu wählen" (JACOBS, 1969).

Eine derartige Variation der Verhaltensweisen innerhalb eines Kollektivs kann von einem Beobachter bei Betrachtung der einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten nur als zufällig gewertet werden. Deshalb muß nach JACOBS jedes Modell des Individualverkehrsablaufs diesem Zufallscharakter Rechnung tragen.

Dies kann berücksichtigt werden, indem ein Modell entweder eine Ebene der Realität nachbildet, auf der der Zufallseinfluß vernachlässigt werden kann, oder indem Vorgänge innerhalb des Modells als zufällig im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung betrachtet werden. Man erhält im ersten Fall ein deterministisches, im zweiten Fall ein stochastisches Modell.

Diese Unterscheidung läßt sich bei Modellen des Verkehrsablaufs in der Betrachtung der Fahrzeugströme wiederfinden:

- In makroskopischen Modellen werden Fahrzeugströme als Flüsse kompressibler Materialien betrachtet, die durch Größen wie Stärke, Dichte und Geschwindigkeit beschrieben werden können

(und wo gegebenenfalls auch das Verhalten von Einzelfahrzeugen in Abhängigkeit von Stromkenngrößen nachgebildet wird);

- Mikroskopische Modelle bilden dagegen Bewegungsvorgänge einzelner Fahrzeuge in Abhängigkeit von anderen (Einzel-) Fahrzeugen nach (darüber hinaus können selbstverständlich auch hier äußere Einflüsse wie Streckengeometrie oder Verkehrsregelung berücksichtigt werden).

Die makroskopischen Modelle berücksichtigen meist keine stochastischen Einflüsse und erlauben auch eine Nachbildung des Verkehrsablaufs in Straßennetzen mit relativ kleinem Aufwand. Bei der mikroskopischen Nachbildung des Verkehrsablaufs wird dagegen im allgemeinen der Zufallscharakter der unterschiedlichen verhaltenssteuernden Einflüsse berücksichtigt. Diese Modelle sind deswegen meist sehr aufwendig und in ihrem Anwendungsbereich auf die Untersuchung von mehr temporären oder lokalen Einflüssen eingeschränkt.

Als makroskopische Modelle des Verkehrsablaufs gelten manchmal auch stationäre Modelle, die nur die Nachbildung von zeitinvarianten Einflüssen ermöglichen. Solche Modelle werden im folgenden nicht unter dem Begriff "Simulationsmodelle" subsumiert; diese Bezeichnung wird eingeschränkt auf dynamische Modelle, die Zeitstrukturen aufweisen und instationäre Abläufe nachvollziehen können.

Entsprechend soll der Begriff der Simulation auf das Arbeiten mit dynamischen Modellen eingeschränkt werden.

1.1.3 Simulation

In der Simulation werden mit einem Modell (des Verkehrsablaufs) Experimente durchgeführt, die in der Realität zu teuer und für Mensch oder Umwelt nicht tragbar sind.

Zur Durchführung dieser Simulationsexperimente werden heute ausschließlich digitale Rechenanlagen eingesetzt. Dazu muß das mathematische Modell, das durch eine Menge von Variablen, Konstanten und funktionalen Beziehungen zwischen den Parametern gegeben ist, in ein entsprechendes Computerprogramm umgesetzt werden. Dieser Arbeitsschritt wird im folgenden als Realisierung des Modells bezeichnet.

Bei der Realisierung eines Modells auf einer Rechenanlage müssen insbesondere die funktionalen Beziehungen zwischen den Parametern des Systems in Rechenalgorithmen umgesetzt werden, die sequentiell bearbeitet werden können. Zudem müssen insbesondere bei stetigen Modellen, in denen zudem gekoppelte (gegenseitig abhängige) Funktionen auftreten können, Vereinfachungen des mathematischen Modells durch Diskretisierung vorgenommen werden.

1.1.4 Diskretisierung

Die bei der digitalen Simulation notwendige Diskretisierung der nachzubildenden Prozesse kann auf verschiedene Weise erfolgen. Da grundsätzlich das Verhalten des Systems im zeitlichen Ablauf interessiert, steht die sinnvolle Wahl des Zeitkontrollmechanismus im Vordergrund. Man unterscheidet prinzipiell zwischen ereignisorientierten und zeitschrittorientierten Methoden.

Ereignisorientierte Simulation eignet sich ausschließlich zur Behandlung diskreter Modelle. Zu jedem Zeitpunkt, an dem ein Ereignis eintritt, müssen die Zeitpunkte berechnet werden, zu denen Folgeereignisse auftreten. Alle so vorgegebenen Ereignisse werden nach ihren Eintrittszeitpunkten geordnet und entsprechend abgearbeitet. Jedes Ereignis führt im allgemeinen zu einer Zustandsänderung.

Mit zeitschrittorientierter Simulation können sowohl diskrete als auch stetige Modelle behandelt werden. Dabei wird in einem vorzugebenden, über die Simulationsdauer festen Zeittakt in die durch das Modell beschriebenen Prozesse eingegriffen. Im Fall diskreter Modelle wird zu diesen Zeitpunkten für alle im System befindlichen Elemente festgestellt, ob im jeweils vorausgegangenen Intervall Ereignisse eingetreten sind und welche ihnen zugeordnete Aktivitäten gegebenenfalls ausgelöst werden müssen. Bei kontinuierlichen Modellen, die im allgemeinen auf Gleichungssystemen basieren, werden nach Ablauf jedes Zeitintervalls alle Parameter aktualisiert und die Funktionsgleichungen fortgeschrieben.

Die zeitschrittorientierte Diskretisierung ermöglicht eine einfache Programmstruktur, da gegenseitige Beeinflussungen verschiedener Modellbereiche quasi "gleichzeitig" bearbeitet werden können. Nachteilig ist dagegen, daß sich der Bearbeitungszeittakt nach dem Modellbereich richten muß, der die höchste Genauigkeit erfordert, und damit auch andere Vorgänge, bei denen seltener Betrachtungen genügen würden, unnötig häufig bearbeitet werden. Solche Unterscheidungen sind bei ereignisorientierter Betrachtung leicht möglich. Hier besteht jedoch die andere Gefahr, daß sich durch komplexe Einflüsse verschiedener Modelleinheiten aufeinander in kurzer Zeit extrem viele zu bearbeitende Ereignisse häufen. Zudem sind bei ereignisorientierter Modellbearbeitung die Auswirkungen von Ereignissen auf andere Modelleinheiten oft schwer zu beschreiben und nur mit großem Aufwand zu programmieren und zu testen.

Die ereignisorientierte Fortschreibung wird insbesondere bei Modellen angewandt, die zwar z. B. im Hinblick auf eine Verfolgung oder Beeinflussung von Fahrzeugen im Netz auf der Behandlung von Einzelfahrzeugen basieren, bei denen aber die gegenseitige Beeinflussung dieser Fahrzeuge nur an bestimmten Stellen (z. B. im Knotenpunktsbereich) berücksichtigt wird. So kann die Ankunft eines Fahrzeugs an einem Knotenpunkt als Ereignis betrachtet werden, während der Fahrtverlauf auf dem freien Streckenabschnitt pauschal abgeschätzt wird (z. B. im Modell von LEICHTER (1981)).

Die zeitschrittorientierte Bearbeitung erlaubt dagegen die Verwendung mathematischer Fahrzeug-Folge-Modelle,

bei denen die Aktivitäten einzelner Fahrzeuge wesentlich durch umgebende Fahrzeuge beeinflusst werden. Solche Modelle können Verkehrsabläufe sehr realistisch nachbilden; allerdings erfordern sie meist einen wesentlich höheren Bearbeitungsaufwand als die vereinfachten Modelle auf der Basis der ereignisorientierten Simulation.

1.2 Aspekte der Entwicklung eines Simulationsmodells

Die Entwicklung eines Simulationsmodells dient im allgemeinen dazu, eine gegebene Aufgabenstellung unter Randbedingungen hinsichtlich der Modellbildung, der Realisierung des Modells und der Durchführung der Simulationsexperimente zu erfüllen.

Die Aufgabenstellung beschreibt die Anforderungen an die mit dem Modell durchzuführenden Experimente. Das hier vorgestellte Modell des Verkehrsablaufs soll z. B. eine Untersuchung der Auswirkungen von Steuerungsmaßnahmen und Verkehrsvorschriften auf einzelne Verkehrsteilnehmer erlauben.

Aus der Aufgabenstellung ist der Detaillierungsgrad und die Funktionsweise nur indirekt ableitbar. Das Modell muß ausschließlich die Lösung der gestellten Aufgabe ermöglichen. Ein gutes Modell muß dazu alle für das jeweilige Problem als wesentlich erachteten Eigenschaften der Realität nachbilden - und die als unwesentlich angesehenen Eigenschaften vernachlässigen (JACOBS, 1969).

Diese Forderung nach Angemessenheit des Modells ist leicht einsichtig für den Fall, daß ein Modell wesentliche Eigenschaften nicht besitzt und damit eine Aufgabenstellung nicht vollständig erfüllen kann. Aber auch die Nachbildung unwesentlicher Eigenschaften schränkt im allgemeinen die Benutzbarkeit eines Modells ein. Der Umfang und die Komplexität eines Simulationsmodells sollte insbesondere im Hinblick auf die Verständlichkeit und Überprüfbarkeit der Modellvorstellungen so weit wie möglich begrenzt werden. Darüber hinaus müssen auch die zur Durchführung eines Experiments erforderlichen Eingabedaten und die Ergebnisse der Simulation - auch in quantitativer Hinsicht - überschaubar sein.

Ein Modell kann seiner Natur nach niemals vollständig oder in einem höheren Sinne wahr sein. Die ihm zugrunde liegenden Vorstellungen dürfen sich jedoch nicht widersprechen, sonst ist das Modell falsch (JACOBS, 1969).

Diese Forderungen sind besonders wichtig im Zusammenhang mit dem Nachweis der Übereinstimmung zwischen Modell und Realität. Bei der Validierung (Prüfung der Gültigkeit) eines Modells werden Ergebnisse aus Simulationsexperimenten mit Meßdaten aus der Realität verglichen. Die Validierung kann allerdings meist nur für ausgewählte Eingabegrößen oder für einzelne Bereiche des Modells durchgeführt werden (wenn alle Ergebnisse bekannt wären, wäre das Modell überflüssig).

Eine Übereinstimmung zwischen Modell und Realität an bestimmten Referenzpunkten kann durch geeignete Anpassung von Modellparametern manchmal auch dann erzielt werden, wenn die Modellvorstellungen allgemein oder einzelne Modellbereiche inkonsistent sind. Es ist dann jedoch nicht zulässig, Simulationsergebnisse aufgrund anderer Kombinationen der Eingangsgrößen (insbesondere mit Werten außerhalb des Validierungsbereichs) auf die Realität zu übertragen: das Modell ist unbrauchbar.

Zu diesen Forderungen an die Angemessenheit, Validität und Widerspruchsfreiheit eines Modells kommen schließlich Randbedingungen aus der Realisierung bzw. der Durchführung von Experimenten mit dem Modell.

Die wesentlichste Einschränkung ist die dem Benutzer einer Rechenanlage zur Verfügung stehende Kapazität; der benötigte Speicherplatz und die erforderliche Rechenzeit zur Durchführung einer Simulation sollten zur Erzielung akzeptabler Bearbeitungszeiten deutlich unter den jeweiligen Grenzen liegen. Dieser Aspekt scheint zwar auf den ersten Blick vor dem Hintergrund einer fortschreitenden Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Rechenanlagen nebensächlich - es darf aber nicht übersehen werden, daß parallel zur Entwicklung der Computertechnik eine ständige Verfeinerung und Erweiterung der Simulationsmodelle infolge immer komplexerer Aufgabenstellungen erforderlich war.

Für die Entwicklung eines Modells im Hinblick auf eine bestimmte Aufgabenstellung steht meist eine begrenzte Arbeitszeit zur Verfügung. Diese Zeit muß so aufgeteilt

werden, daß nicht nur für Entwurf und Programmierung, sondern auch für Test und Eichung des Simulationsmodells genügend Zeit bleibt. Da mit der Komplexität eines Modells insbesondere der Zeitaufwand für Test und Eichung überproportional steigt, sollten auch unter diesen Gesichtspunkten sinnvolle Grenzen gezogen werden.

1.3 Ausgewählte Simulationsmodelle zur mikroskopischen Nachbildung von Verkehrsabläufen

In den letzten Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Modellen zur mikroskopischen Nachbildung des Verkehrsablaufs erstellt. Diese sollten einerseits jeweils bestimmten Zielsetzungen genügen und mußten sich andererseits an den verfügbaren Rechnerleistungen orientieren. In dieser Arbeit wird darauf verzichtet, eine vollständige Aufzählung der im Laufe der Zeit entwickelten Simulationsmodelle zu geben. Entsprechende Übersichten finden sich bei GIBSON/ROSS (1977), LEICHTER (1981) und STEGEMANN (1979). Es werden jedoch vier unterschiedliche Modelle näher betrachtet, die im Hinblick auf die vorliegende Zielsetzung bestimmte Funktionsbereiche abdecken. Es wurden Modelle ausgewählt, mit denen umfangreiche Erfahrungen bei der Anwendung vorliegen und die so weit dokumentiert, flexibel und übertragbar sind, daß sie auch von externen Anwendern eingesetzt werden können.

1.3.1 Modell NETSIM / UTCS

Das Modell NETSIM/UTCS (WORRAL/LIEBERMAN, 1974) erlaubt eine mikroskopische Nachbildung des Verkehrsablaufs. Es ist eine Weiterentwicklung des Modells TRANS (WAGNER/GERLOUGH, 1966) und wurde früher ausschließlich unter dem Namen UTCS-1 (Urban Traffic Control System) geführt.

NETSIM ermöglicht die Nachbildung von innerstädtischen Verkehrsnetzen auf der Basis einzelner Streckenabschnitte und Knotenpunkte. Es dient im wesentlichen zur Untersuchung von komplexen Signalsteuerungssystemen. Im Modell kann Öffentlicher Nahverkehr (ausschließlich Busse) mit Vorgaben wie Routenverlauf, Lage der Haltestellen, Verteilungen von Folgezeiten und Haltestellenaufenthaltszeiten simuliert werden.

Das Simulationsmodell basiert auf der Nachbildung des Fahrverhaltens von Einzelfahrzeugen. Es können verschiedene Verkehrszusammensetzungen aus bis zu sechs Fahrzeugarten vorgegeben werden. Das Interaktionsverhalten basiert auf dem Verallgemeinerten Fahrzeugfolgemodell (HERMANN, 1963), das durch Modelle des Pulkverhaltens und des Abbiegeverhaltens ergänzt wurde. Die Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten werden in einem festen, aber vorgebbaren Zeittakt fortgeschrieben.

Das Modell wurde insbesondere zur Untersuchung von Verkehrsabläufen in umfangreichen Netzen (bis zu 100 Knotenpunkte) angewandt (z. B. WOLFE et al., 1979; LUDWICK, 1976). Entsprechend wurde die Nachbildung des Interaktionsverhaltens der Fahrzeuge so weit als möglich vereinfacht. So sind z. B. die Beschleunigungsvorgänge beim Anfahren von Fahrzeugen oder das Verhalten auf der freien Strecke fest vorgegeben.

Es bestehen keine Möglichkeiten zur Verfolgung von Einzelfahrzeugen im System. Ebenso kann das Verhalten von einzelnen Fahrzeugen (z. B. Abfahrt eines Busses von einer Haltestelle) nicht direkt beeinflußt werden.

NETSIM ist lediglich in der Lage, fest programmierte Signalsteuerungsverfahren nachzubilden. Es stehen insbesondere keine verallgemeinerten Schnittstellen zum Anschluß von Steuerungsmodellen zur Verfügung.

1.3.2 Modell MULTSIM

Das Simulationsmodell MULTSIM (Multi-Lane Traffic Simulation, GIPPS, 1980) wurde in Newcastle-upon-Tyne entwickelt und später im University College in London und bei der "CSERO Division of Building Research" in Melbourne erweitert.

MULTSIM erlaubt die Nachbildung einer Straße mit Richtungstrennung und signalisierten oder unsignalisierten Knotenpunkten. Es ist vor allem eine Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Lichtsignalsteuerungen, der Anordnung von Abbiegespuren sowie der Lage von Bus-/Straßenbahnhaltestellen auf die Reisegeschwindigkeit, den Kraftstoffverbrauch und andere verkehrliche Aspekte möglich. Es wird eine mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs durchgeführt, wobei Geschwindigkeiten und Standorte aller Fahrzeuge in festen Zeitintervallen neu berechnet werden. Das Programm verwendet ein Fahrzeugfolgemodell, das sogenannte "sichere Geschwindigkeiten" in Abhängigkeit vom jeweils vorausfahrenden Fahrzeug, von Lichtsignalanlagen und festen Hindernissen berechnet. Spurwechselentscheidungen basieren auf Abbiegewünschen, festen Hindernissen auf einer Spur oder möglichen Geschwindigkeitsvorteilen auf der Nachbarspur.

Die Möglichkeit zur Durchführung eines Spurwechsels wird durch eine Verteilung angenommener Zeitlücken beschrieben.

Das Modell ist modular programmiert, so daß der Benutzer die Möglichkeit hat, einzelne Programmbausteine (z. B. Fahrzeuggenerierung) seiner Aufgabenstellung anzupassen. Ebenso können Datenerfassungsprozeduren zur Sammlung von Daten während des Simulationslaufs vom Benutzer definiert und in das System eingefügt werden.

Es besteht keine Möglichkeit, auf bestimmte Fahrzeuge (Busse oder Straßenbahnen) Einfluß zu nehmen. Diese können auch nicht ihre vorgegebenen Spuren verlassen. Außerdem ist nicht vorgesehen, Daten zum Verkehrsablauf während des Simulationsvorgangs weiterzuverarbeiten, wie es zur Nachbildung einer verkehrabhängigen Signalsteuerung erforderlich ist.

1.3.3 TEXAS - Modell

Die Entwicklung eines mikroskopischen Simulationsmodells für den Verkehrsablauf an und in Knotenpunkten, das später den Namen TEXAS-Modell erhielt, wurde im Jahre 1971 an der "University of Texas at Austin" begonnen. In diesem Projekt wurden gleichzeitig umfangreiche Datenerhebungen zur Eichung des Modells durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung des Modells wurde im Jahre 1977 veröffentlicht (LEE et al., 1977).

Das Texas-Modell wurde erstellt mit dem Ziel, den Verkehrsablauf an isolierten Knotenpunkten bei verschiedenen Verkehrsregelungen näher untersuchen zu können. Es werden einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheiten mit unterschiedlichen Eigenschaften betrachtet. In wählbaren Zeitintervallen (0,5 - 1 s) werden alle verfügbaren Informationen ausgewertet und zur Berechnung des Fahrverhaltens im nächsten Intervall herangezogen. Der Fahrer kann seine Geschwindigkeit beibehalten, bremsen, beschleunigen und die Spur wechseln. Seine Aktionen sind abhängig von den Charakteristika des Fahrer-Fahrzeug-Elements, der Straßengeometrie, der Verkehrsregelung sowie von den Handlungen anderer Fahrzeuge. Es wird immer die Verhaltensalternative mit der höchsten Priorität ausgeführt, wobei als Einflußgrößen die gewünschte Geschwindigkeit, die Verkehrsregeln, das Sicherheitsbedürfnis und der Komfort dienen. Um eine gewählte Aktion auszuführen, werden auf der Basis einer momentan geltenden Beschleunigungsganglinie Position und Geschwindigkeit für den nächsten Zeitschritt berechnet. Die Berechnung der Beschleunigungsganglinie wird nicht in jedem Zeitschritt neu durchgeführt; diese wird lediglich bei Änderung eines "Verhaltenszustandes" neu festgelegt. Dies verringert den Rechenaufwand wesentlich.

Im TEXAS-Modell werden die Bewegungen innerhalb eines Knotenpunktes (Abbiegeradien, Fahrlinien beim Spurwechsel) sehr genau behandelt. So werden z. B. die Einflüsse der Abbiegeradien auf das Geschwindigkeitsverhalten modellintern abgeschätzt. Der Anwender muß keine Reduktionsfaktoren vorgeben. In gleichem Maß bildet das Modell z. B. die Einflüsse von eingeschränkten Sichtweiten an unsignalisierten Knotenpunkten nach.

Es ist lediglich die Betrachtung eines einzelnen Knotenpunktes möglich. Dieser kann jedoch mehrere Anschlüsse und komplexe Beziehungen zwischen den Zu- und Abfahrten haben. Fahrzeuge des ÖV können nicht betrachtet werden. Es werden auch keine Schnittstellen zur Erfassung von Daten von Einzelfahrzeugen bzw. zur Beeinflussung solcher Fahrzeuge angeboten.

1.3.4 Simulationsmodelle des Instituts für Verkehrswesen

Am Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe wurde in den Jahren 1970 bis 1974 ein Simulationsmodell entwickelt (WIEDEMANN, 1974), das in den folgenden Jahren für verschiedene Anwendungsfälle vervollständigt und erweitert wurde (HUBSCHNEIDER et al., 1977; BRANNOLTE, 1978; HANDSCHMANN, 1978; WILLMANN, 1978; BOLL, 1979; WETTERLING, 1979).

Alle Simulationsmodelle enthalten als zentralen Baustein ein sehr nahe an der Realität orientiertes Interaktionsmodell für das Fahrzeug-Folge-Verhalten. Dieses basiert auf einzelnen Fahrzuständen, die im wesentlichen durch psycho-physische Schranken (Wahrnehmungsschwellen, Risikoschwellen) voneinander abgegrenzt werden. Auch Spurwechsel- und Überholentscheidungen werden auf der Basis solcher Schwellen getroffen. Die Fortschreibung des Modellzustands geschieht in festen Zeitintervallen (0,2 - 1 s).

Die Simulationsmodelle wurden zur Untersuchung eines weiten Spektrums von Verkehrsabläufen angewandt. So wurde neben dem Fahrverhalten auf Richtungsfahrbahnen (Untersuchung von Einflüssen des Geschwindigkeits- und Spurwechselverhaltens sowie von Verkehrsabläufen an Steigungen und Engpässen) der Verkehrsablauf an Knotenpunkten mit Vorfahrtsregelung sowie auf Landstraßen mit Gegenverkehr nachgebildet. Alle Simulationsmodelle erfordern aufgrund des rechenintensiven Interaktionsmodells im Vergleich z. B. mit NETSIM relativ lange Laufzeiten. Allerdings berücksichtigen die Entscheidungen zum Fahrverhalten sehr viele äußere Einflüsse, und die Fahrtverläufe werden sehr realitätsnah nachgebildet.

Alle in Karlsruhe entwickelten Simulationsmodelle haben nur das grundlegende Interaktionsverhalten gemeinsam. Es gibt keine einheitlichen Schnittstellen für die Beschreibung der simulierten Streckenabschnitte, zu Auswerteprogrammen oder zu Steuerungsmodellen. Darüber hinaus sind auch die Organisationsstrukturen durch die Verwendung unterschiedlicher Programmiersprachen nicht einheitlich.

2. Entwicklungsrahmen für die Modellbildung

Ein Modell als Abbild der Wirklichkeit soll auf eine bestimmte Anwendung zugeschnitten sein. Es soll die Realität möglichst genau so weit nachbilden, wie es die Aufgabenstellung erfordert. Ist die Abbildung zu grob, so können unter Umständen wichtige Informationen aus dem Modellablauf nicht abgeleitet werden, oder aber die Parametervariationen zeigen keinen Einfluß auf das Verhalten des Modells. Ist andererseits die Abbildung zu fein, so müssen Vorgänge modelliert werden, deren Einflußgrößen oft nicht bekannt sind - und die damit auch nur sehr schwierig geeicht werden können -, oder die das Arbeiten mit dem Modell sehr viel umständlicher machen, als es erforderlich wäre. Ziel der Modellbildung ist es deshalb, einen auf die Aufgabenstellung zugeschnittenen Feinheitsgrad zu realisieren.

Bei der vorliegenden Modellentwicklung war ein relativ breites Anwendungsspektrum zu berücksichtigen, das nicht immer die gleiche Modellgenauigkeit verlangt. Es mußte deshalb oft ein Kompromiß eingegangen werden zwischen einer Begrenzung des Aufwands bei der Modellbildung und möglichen Ansprüchen der Anwender.

Die folgenden Ausführungen zeigen neben den Anforderungen an das Modell die Folgerungen für die Feinheit der Nachbildungen einzelner Vorgänge auf. Der darin festgelegte Entwicklungsrahmen bildet die Basis für die Modellbildung.

2.1 Anwendungsbereiche des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell MISSION (mikroskopische Simulation von Individualverkehr und Oeffentlichem Nahverkehr) soll die Nachbildung des Verkehrsablaufs auf Straßen und hier insbesondere des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen (Pkw, Lkw, Busse) und Straßenbahnen ermöglichen. Es sollen Schnittstellen zur Nachbildung von externen steuernden oder regelnden Einflüssen (Lichtsignalsteuerung, Fahrplan oder Betriebsleitsystem für den ÖV) vorhanden sein.

Die Simulation soll unterschiedliche Straßentypen berücksichtigen können. Es sind Verkehrsabläufe auf Richtungsfahrbahnen außerorts (Bundesstraßen, Autobahnen) und auf Stadtstraßen nachzubilden. Auf Stadtstraßen soll das Fahrverhalten von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs (Straßenbahnen und Busse) simuliert werden. Entsprechende Fahrwege des ÖV (Gleise, Busspuren, gemeinsam mit dem Individualverkehr genutzte Fahrbereiche) müssen darstellbar sein. Es sollen beliebige Netzausschnitte nachgebildet werden können.

Bei dem Straßentyp "Richtungsfahrbahn" liegt der Schwerpunkt der Anwendungen bei der Simulation von Verkehrsabläufen auf durchgehenden Strecken, wobei Änderungen in Spuranzahl und Neigung berücksichtigt werden können.

Der Streckentyp "Stadtstraßen" sowie die Simulation des ÖV erfordern darüber hinaus die Nachbildung von Streckennetzen mit Einmündungen, Verzweigungen und Knotenpunkten.

Als Obergrenze für die sinnvolle Anwendung des Simulationsmodells soll die Nachbildung mittlerer Netzausschnitte (ca. 10 - 15 Knotenpunkte) gelten.

Die Anwendung des Simulationsmodells zur Nachbildung des Verkehrsablaufs in den oben beschriebenen topologischen Umgebungen soll insbesondere der Untersuchung mikroskopischer (einzelfahrzeugbezogener) Verhaltensweisen und der Wechselwirkung zwischen Steuerungsmaßnahmen und mikroskopischen Abläufen dienen. Beispiele hierfür sind Einflüsse durch Geschwindigkeitsregelungen, verkehrsunabhängige Lichtsignalsteuerungen oder die Führung von Linksabbiegern in Kreuzungsbereichen.

Die Beurteilung von Steuerungseinflüssen auf mikroskopische Abläufe ist nur sinnvoll, wenn das Steuerungsverfahren lokal und fahrzeugfein Daten erfassen und einzelne Fahrzeuge beeinflussen kann. Eine großräumige Beeinflussung von Fahrzeugströmen in Netzen erfordert z. B. keine Betrachtung des Fahrzeugfolgeverhaltens von einzelnen Fahrzeugen. Hier wäre der Modellansatz zu detailliert und das Arbeiten mit dem Modell zu aufwendig. Dagegen ist aber die Anwendung des Modells sinnvoll, wenn die Auswirkungen von Richtungsempfehlungen auf den Verkehrsablauf vor einem Knotenpunkt untersucht werden sollen (wo z. B. die erforderlichen Spurwechsel Störungen verursachen können), oder wenn die Auswirkungen von Priorisierungsmaßnahmen an Lichtsignalanlagen zu beurteilen sind.

2.2 Betrachtete Fahrzeugarten

Die Verkehrsarten werden unterschieden nach Individualverkehr und Öffentlichem Verkehr. Im Individualverkehr werden die Fahrzeugarten Pkw und Lkw berücksichtigt; im Öffentlichen Verkehr wird zwischen Bussen und Straßenbahnen differenziert.

Die Fahrzeugarten unterscheiden sich in den fahrdynamischen Möglichkeiten und in fahrerspezifischen Verhaltensweisen. Entsprechend der mikroskopischen Anlage des Simulationsmodells ist es insbesondere vor dem Hintergrund der relativ hohen gefahrenen Geschwindigkeiten auf Autobahnen bzw. relativ weitgehender Ausnutzung der fahrdynamischen Möglichkeiten einzelner Fahrzeuge bei Anfahrvorgängen an Lichtsignalanlagen erforderlich, innerhalb einer Fahrzeugart weiter zu differenzieren. Es müssen Variationspektren von Höchstgeschwindigkeiten und Beschleunigungsmöglichkeiten nachgebildet werden. Außerdem sind bei Lkw, Bussen und Straßenbahnen auch die unterschiedlichen Fahrzeuglängen innerhalb einer Fahrzeugart zu berücksichtigen.

Die Nachbildung fahrerspezifischer Eigenschaften ist von den Eingangsgrößen des jeweils verwendeten Interaktionsmodells abhängig. Das psycho-physische Verhaltensmodell (WIEDEMANN, 1974) berücksichtigt vier Parameter, die das Sicherheitsbedürfnis, das Schätzvermögen, die Gaspedalkontrolle (Fähigkeit, eine konstante Geschwindigkeit einzuhalten) und die Wunschgeschwindigkeit kennzeichnen. Zusammenhänge zwischen fahrerspezifischen Kenngrößen und Parametern des Fahrzeugs werden teilweise berücksichtigt (z. B. in der Wahl der Wunschgeschwindigkeit abhängig von der Höchstgeschwindigkeit).

2.3 Nachbildung der Streckengeometrie

Das Simulationsmodell soll die Nachbildung unterschiedlicher Strecken- und Netzgeometrien für Stadtstraßen und Richtungsfahrbahnen außerorts ermöglichen. Es kann unterschieden werden nach der freien Strecke (durchgehenden Strecke ohne einmündenden oder abzweigenden Verkehr) und Knotenpunkten (Verknüpfungen von Verkehrsströmen).

Das Fahrverhalten auf der freien Strecke wird im wesentlichen geprägt durch das Geschwindigkeitsverhalten und das Spurwechselverhalten. Die gewünschte Geschwindigkeit (ohne Berücksichtigung von Behinderungen durch andere Verkehrsteilnehmer) ist in der Realität primär von der Trassierung (Straßenbreite, Steigungen und Krümmungen), dem Fahrbahnzustand und geschwindigkeitsregelnden Vorschriften abhängig. Das Spurwechselverhalten wird darüber hinaus durch die Anzahl verfügbarer Fahrspuren und Spurwahlvorschriften (z. B. Rechtsfahrgebot) geprägt.

In der Simulation kann das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer in Abhängigkeit von der Streckengeometrie entweder intern oder extern beschrieben werden. Bei der internen Nachbildung des Fahrerverhaltens müssen alle wesentlichen Parameter in der Streckenbeschreibung angegeben werden. Im Modell wird dann die Geschwindigkeitswahl entsprechend nachgebildet - es werden z. B. Reaktionen auf Kurven oder unterschiedlichen Querschnittsausbau in Änderungen der Wunschgeschwindigkeiten umgesetzt. Die externe Beschreibung des Geschwindigkeitsverhal-

tens verlangt vom Anwender des Simulationsmodells die Vorgabe von Wunschgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Streckenabschnitte.

Im Modell MISSION soll in Anbetracht des sehr breiten Anwendungsspektrums einerseits und der komplexen (und weitgehend unbekannt) Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeitsverhalten und Umgebungsparametern andererseits dieses Verhalten extern vorgegeben werden. Diese Vorgehensweise erlaubt eine vereinfachte Beschreibung der Streckengeometrie durch Angabe der Länge und der Anzahl verfügbarer Fahrspuren.

In einem Streckenabschnitt stehen für die Fahrer, solange keine zusätzlichen Restriktionen angegeben werden, potentiell alle Fahrspuren zur Verfügung. Die Spurwahl wird durch Behinderungen und Verhaltensvorschriften (z. B. Rechtsfahrgebot) beeinflusst.

Die Verknüpfung von Streckenabschnitten ist im einfachsten Fall durch Angabe einer einmündenden oder abzweigenden Spur möglich. Eine einmündende Spur kann dabei behandelt werden wie eine Reduzierung der Spuranzahl eines geraden Streckenabschnitts, wobei ggf. besondere Verflechtungsvorschriften gelten. Eine abzweigende Spur entspricht einer Spuraddition, allerdings findet der Wechsel auf eine solche Spur nicht im Rahmen des normalen Spurwechselverhaltens, sondern aufgrund von Abbiegewünschen statt.

Die Verknüpfungsbereiche werden wie durchgehende Strecken durch Angabe der Länge und der Anzahl der verfügbaren Spuren beschrieben. Zusätzlich ist eine Nachbildung der Fahrtrichtungswünsche erforderlich.

Auch komplexe Knotenpunkte können aus funktioneller Sicht in eine Menge von Verzweigungen und Einmündungen zerlegt werden. Die räumliche Dichte solcher Funktionen innerhalb eines Knotens erfordert jedoch eine verallgemeinerte Definition der Einmündung bzw. Abzweigung, die sich primär an den funktionellen Eigenschaften dieser Grundbausteine orientiert. Es müssen insbesondere Überlagerungen von Entflechtungs- bzw. Verflechtungsbereichen in räumlicher Sicht möglich sein. Das Spürwahlverhalten in Knotenpunkten wird gleich wie in einfachen Abzweigungen durch gewünschte Fahrtrichtungen und daraus abgeleiteten Abbiegespuren beschrieben.

Ähnlich wie bei der Nachbildung des Geschwindigkeitsverhaltens wird auch das Abbiegeverhalten nicht intern (z. B. durch Vorgabe von Routen im Netz), sondern extern gesteuert. Es wird für jede mögliche Abbiegerichtung explizit vorgegeben, welcher Anteil eines Fahrzeugstroms diese Fahrtrichtung wählt. Diese Vorgehensweise ermöglicht keine Vorgabe von festen Fahrtrouten im Netz. Sie gibt jedoch dem Anwender bessere Möglichkeiten zur Nachbildung mikroskopischer Vorgänge, indem z. B. auf den Spuren einer Knotenpunktzufahrt jeweils unterschiedliche Abbiegeanteile vorgegeben werden. Nachteilig ist dabei, daß bei der Simulation eines Straßennetzes Fahrzeiten auf bestimmten Routen innerhalb des Netzes nur durch die Überlagerung von Fahrzeitverteilungen auf

den einzelnen Streckenabschnitten berechnet werden könnten (es gibt keine Fahrzeuge, die vorgegebene Routen fahren). Für weitergehende Anwendungen wäre jedoch auch eine Ergänzung des Modells um eine "Routenvorgabe" möglich.

2.4 Abgrenzung des Modells

Das Modell MISSION soll der Nachbildung des Verkehrsablaufs dienen. Es soll mit Steuerungsmodellen kommunizieren können und Daten über die simulierten Abläufe verfügbar machen. Die Informationen aus Steuerungsmodellen werden "mikroskopisch" erwartet: Es sind für alle relevanten Lichtsignale, Geschwindigkeitsanzeigen usw. die Zustandsdaten zu übergeben (Abb. 2.4-1).

Die Datenerfassung für Steuerungsmodelle wird im Modell MISSION durchgeführt. Es werden mikroskopische Daten übergeben. Eine Aggregation oder logische Verknüpfung von Meßdaten wird nicht vorgenommen.

Die Nachbildung von Verkehrsabläufen des ÖV setzt eine entsprechende Steuerung der Fahrzeuge durch ein Modell "ÖV-System" voraus. Dieses muß alle Aktivitäten der ÖV-Fahrzeuge, die nicht direkt mit dem Verkehrsablauf zusammenhängen, steuern. So muß z. B. die Einfahrt von ÖV-Fahrzeugen in die betrachteten Netzausschnitte und die Abfahrt aus Haltestellen explizit angestoßen werden. Im Modell des Verkehrsablaufs werden die ÖV-Fahrzeuge bis zum Erreichen der jeweils nächsten Haltestelle fortbewegt. Die Haltestellenankünfte werden an das ÖV-System gemeldet.

2.5 Zeitabläufe im Simulationsmodell

In der Simulation sind die zeitlichen Abläufe verschiedener Modellbereiche nachzubilden und zu koordinieren. Das Verhalten der Einzelfahrzeuge wird insbesondere im Hinblick auf die sehr häufigen Interaktionen bei Verkehrsabläufen auf Stadtstraßen zeitschrittorientiert nachgebildet. Dabei wird zu jedem Betrachtungszeitpunkt die Verhaltensweise jedes einzelnen Fahrzeugs für das nächste Zeitintervall festgelegt. Bei der Fortschreibung der Simulationszeit werden alle Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten neu berechnet.

Im Modell MISSION können prinzipiell beliebige Zeitschritte nachgebildet werden. Das eingebrachte Interaktionsmodell basiert auf einem Bearbeitungsintervall von einer Sekunde. Dieses Zeitintervall erlaubt eine implizite Berücksichtigung der Reaktionszeiten von Fahrern (WIEDEMANN, 1974).

Die Kommunikation mit Steuerungsmodellen erfolgt ebenfalls sinnvoll auf der Basis von Zeitintervallen. Im Hinblick auf die Genauigkeit der nachgebildeten Vorgänge ist ein Zeitintervall von höchstens 1 Sekunde zulässig (Mindestgenauigkeit für die Berücksichtigung der Schaltung von Lichtsignalanlagen).

Da aber andererseits die Informationen aus den Steuerungsmodellen im Interaktionsmodell nur zu den Zeitpunkten der Fahrzeugbearbeitung berücksichtigt werden können, ist der Interaktionszeitschritt das kleinste sinnvolle Zeitin-

tervall für den Datenaustausch. Entsprechendes gilt für die Erfassung der Systemzustände. Da sich diese nur im festen Bearbeitungszeitraster ändern, ist es nur zu diesen Zeitpunkten sinnvoll, die Systemzustände zu speichern. Es sollte aber auch jede Änderung der Zustände festgehalten werden.

Die Einfahrt von Fahrzeugen in das simulierte System findet dagegen nicht in solchen Zeitrastern statt. Es sind kontinuierliche Verteilungen von Ankunftszeitlücken nachzubilden. Die Fahrzeugankünfte könnten zwar wie oben zeitschrittorientiert verarbeitet werden (es würde zu jedem Bearbeitungszeitschritt geprüft, ob während des letzten Zeitintervalls Fahrzeuge angekommen sind), eine ereignisorientierte Bearbeitung erfordert hier jedoch weniger Rechenaufwand, da die Fahrzeugankünfte auf einer Spur in Relation zur Länge des Zeitschritts relativ selten sind.

3. Entwicklungsrahmen für die Realisierung des Modells

Erst die Realisierung eines Modells (hier in Form eines Computerprogramms) macht es möglich, dieses für Simulationsuntersuchungen zu benutzen. Bei der Umsetzung des Modells in ein Programm, das übersichtlich gestaltet, leicht handhabbar und effizient sein soll, müssen programmtechnische Möglichkeiten und Anforderungen berücksichtigt werden. In den folgenden Kapiteln soll der Entwicklungsrahmen für das Simulationsmodell unter dem Aspekt der Realisierung weiter spezifiziert werden. Zur Unterscheidung vom Modell des Verkehrsablaufs wird dessen Realisierung in einem oder mehreren Computerprogrammen im folgenden als Simulationssystem bezeichnet.

3.1 Forderungen an das Simulationssystem

An das Simulationssystem des Verkehrsablaufs werden Anforderungen gestellt, die dessen Anwendung für unterschiedliche Aufgabenstellungen erleichtern. Diese Anforderungen lassen sich unter den Oberbegriffen Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit und Erweiterbarkeit zusammenfassen. Darüber hinaus soll das Simulationssystem aber auch eine effiziente Lösung der Problemstellungen ermöglichen, d. h. der Speicher- und Rechenzeitbedarf soll in einem sinnvollen Verhältnis zum Problemumfang stehen.

Das Simulationssystem muß flexibel sein. Der Anwender soll unter einer Anzahl von Modulen auswählen können, die es ihm erlauben, ein auf seine Aufgabe zugeschnittenes

nes Simulationsprogramm zu erstellen. Dies kann durch die Vordefinition bestimmter Modulkombinationen noch vereinfacht werden. Trotz unterschiedlicher Vorgänge im Modell sollen jedoch insbesondere alle Schnittstellen zum Benutzer, zu Auswerteprogrammen und zu anderen Teilprogrammen des Simulationssystems einheitlich sein. Die Forderung nach Flexibilität des Programmsystems schließt insbesondere auch eine mögliche Nutzung des Systems auf unterschiedlichen Rechenanlagen ein. Zugunsten dieser Portabilität muß u. U. sogar eine eingeschränkte Effizienz des Simulationssystems in Kauf genommen werden.

Das Simulationssystem muß leicht handhabbar sein. Der Anwender muß klare Eingabeschnittstellen haben. Das Programmsystem muß bei der Verarbeitung der Eingabedaten, die im vorliegenden Fall den nachzubildenden Netzausschnitt beschreiben, weitestgehende Plausibilitätsprüfungen vornehmen. Im Simulationsablauf selbst sind möglichst viele potentielle Fehler abzufangen. Außerdem müssen für den Benutzer Möglichkeiten vorgesehen werden, die es ihm erlauben, Detailvorgänge im Simulationsablauf näher zu untersuchen. Diese Forderung nach umfangreichen und komfortablen Trace-Möglichkeiten ist bei Simulationsprogrammen deshalb ganz besonders wichtig, weil hier die interessierenden Vorgänge manchmal erst nach sehr langer Simulationszeit auftreten und nicht reproduziert werden können, ohne die gesamte "Vorgeschichte" zu wiederholen.

Das Programmsystem muß erweiterbar sein. Das Simulationsmodell des Verkehrsablaufs soll für ein breites Spektrum

von Anwendungen eingesetzt werden können. Viele Anwendungen erfordern aber die Erweiterung oder Anpassung einzelner Modellbereiche an die spezifische Aufgabenstellung. Erweiterungen können vom Anwender mit überschaubarem Aufwand durchgeführt werden, wenn diese potentiellen Ergänzungen beim Entwurf des Systems bereits berücksichtigt wurden. So müssen insbesondere organisatorische Bereiche des Systems, in denen im allgemeinen keine Änderungen durchgeführt werden sollen, von zur Erweiterung vorgesehenen Teilen des Systems klar getrennt werden.

Im folgenden sollen die Anforderungen an das Simulationssystem in Verbindung mit dem Entwicklungsrahmen für das Simulationsmodell die Grundlagen zur Realisierung aufzeigen.

3.2 Organisationsstrukturen

Eine weitgehende Flexibilität des Simulationssystems ist erreichbar, wenn eine sehr strenge Aufteilung des Programmsystems in einzelne Module möglich ist. Das Simulationssystem muß dazu auf einer organisatorischen Basis aufbauen, die es erlaubt, einzelne Bereiche des Modells unabhängig von anderen zu realisieren. Daraus folgt aber, daß bereits im Modell logisch zusammenhängende, untereinander aber unabhängige Funktionsbereiche vorliegen müssen.

Die Organisationsbasis muß alle Grundprozeduren zur Datenverwaltung, Simulationssteuerung und für den Be-

nutzerdialog zur Verfügung stellen. Darüber hinaus sollten alle Schnittstellenfunktionen in der Organisationsbasis enthalten sein.

Die Module des Systems, die einzelnen Modellbereichen entsprechen, können alle Funktionen des Organisationsrahmens nutzen. Wird diese Trennung streng eingehalten, so muß lediglich im jeweiligen Steuerprogramm, das die einzelnen Abläufe synchronisiert und überwacht, die genaue Spezifikation der im System vorhandenen Module bekannt sein.

3.3 Schnittstellen und Portabilität

Die Schnittstellen des Programmsystems gegenüber dem Benutzer, parallel laufenden Programmen und nachgeschalteten Auswerteprogrammen sollen einheitlich, zentralisiert und flexibel sein.

Einheitliche Schnittstellen sind insbesondere für den Anwender bzw. für nachgeschaltete Auswerteprogramme wichtig. Es müssen unabhängig vom inneren Aufbau des Simulationsprogramms gleiche Spezifikationen der Ein- und Ausgabedaten aus syntaktischer und semantischer Sicht gelten.

Die Zentralisierung von Schnittstellenfunktionen ist wichtig bei Systemschnittstellen und bei Schnittstellen zu parallel ablaufenden Teilprogrammen. Als Systemschnittstellen werden hier alle rechner- bzw. betriebs-

systemspezifischen Funktionen verstanden, die im Simulationssystem verwendet werden. Solche Funktionen sollten im Hinblick auf bestmögliche Portabilität wenig verwendet werden. Oft ist jedoch der Rückgriff auf solche außerhalb des Definitionsbereichs der Programmiersprache liegenden Prozeduren aus Effizienz- oder Komfortgründen sinnvoll und notwendig. Eine Zusammenfassung solcher Funktionen in einem Modul erlaubt eine relativ einfache Anpassung des Simulationssystems an andere Rechnerumgebungen, da ausschließlich innerhalb des zentralen Schnittstellenmoduls Programmänderungen erfolgen müssen.

Die Zentralisierung von Schnittstellen zu parallel laufenden Programmen erlaubt wie bei den Systemschnittstellen eine einfache Anpassung an unterschiedliche Gegebenheiten. Darüber hinaus wird dadurch die Überprüfung der ausgetauschten Daten und der Statusinformationen der kommunizierenden Programme vereinfacht.

Schnittstellen müssen flexibel sein, wenn über einen Kommunikationsweg Daten unterschiedlichen Umfangs oder unterschiedlicher Bedeutung übertragen werden müssen. Dies gilt im Simulationssystem insbesondere für die Schnittstellen zu den parallel ablaufenden Programmen der Steuerungssysteme. Die Flexibilität kann implizit durch Vereinbarung der semantischen Bedeutung von einzelnen Feldern eines reservierten Kommunikationsbereichs zur Programmlaufzeit (üblicherweise während der Initialisierungsphase) oder explizit durch eine Identifikation jedes übertragenen Datenblocks erreicht werden.

3.4 Erweiterungsmöglichkeiten

Der Anwender des Simulationssystems muß die Möglichkeit haben, dieses an spezielle Aufgabenstellungen anzupassen bzw. entsprechend zu erweitern. Die Struktur des Systems soll diese Option so weit wie möglich unterstützen.

In der einfachsten Stufe werden Algorithmen innerhalb einer Funktionseinheit erweitert. Dies ist vom Benutzer einfach durchzuführen. Die Programmstruktur muß jedoch sicherstellen, daß Änderungen in den dem Benutzer auf dieser Ebene zugänglichen Programmteilen keine Seiteneffekte haben.

In der zweiten Erweiterungsstufe können innerhalb eines Moduls (Modellbereich) neue Funktionseinheiten definiert werden. Zur Unterstützung solcher Ergänzungen muß der Benutzer Zugriff auf modulbezogene organisatorische Grundfunktionen haben. Eine klare und insbesondere einheitliche Strukturierung aller Funktionseinheiten eines Moduls erleichtert diese Aufgabe. Die besten Voraussetzungen findet der Anwender vor, wenn innerhalb des Moduls bereits Daten- und Ablaufstrukturen für die funktionelle Erweiterung vordefiniert sind, die nur noch um die Berechnungsalgorithmen ergänzt werden müssen.

Während die erste und die zweite Erweiterungsstufe nur sehr wenig bzw. lediglich auf ein Modul begrenztes

Wissen über die programmtechnische Realisierung des Simulationssystems voraussetzen, erfordern Erweiterungen, die ganze Modellbereiche oder Organisationsstrukturen betreffen, detaillierte Kenntnisse aller Zusammenhänge. Erweiterungen auf dieser Ebene können nur noch durch übersichtliche Strukturierung des Simulationssystems, saubere Abgrenzung der Module und durch einheitliche Daten- und Ablaufstrukturen unterstützt werden.

4. Modellbildung - Grobstruktur und Schnittstellen

Durch den Entwicklungsrahmen sind die Anforderungen an das Simulationsmodell vorgegeben. Es wurde eine Unterteilung des Modells in einzelne Bereiche vorgenommen, die einerseits logische Einheiten bilden und andererseits eine sinnvolle Realisierung als Programmmodule erlauben.

Die Modellbereiche werden abgegrenzt durch die vorgegebenen Modellschnittstellen, deren logische Funktionen in diesem Kapitel beschrieben werden. Die Datenschnittstellen zu Auswerteprogrammen werden in Kapitel 8 erläutert, da diese nicht parallel zum Modell des Verkehrsablaufs bearbeitet werden.

4.1 Grobstruktur des Simulationsmodells

Die Struktur des Simulationsmodells orientiert sich an Modellbereichen, in denen gleichartige Funktionen zusammengefaßt sind (Abb. 4.1-1). Die Funktionen eines Modellbereichs sind für die unterschiedlichen Anwendungen im allgemeinen ähnlich. Es werden jedoch häufig nicht alle Funktionen für die jeweilige Aufgabenstellung benötigt.

Grundlage der Simulation des Verkehrsablaufs ist die Beschreibung der topologischen Umgebung, d. h. des nachzubildenden Streckenabschnitts bzw. Netzausschnitts und der damit verbundenen funktionellen Zusammenhänge. Im Anwendungsbereich "Richtungsfahrbahn" werden nur durchgehende Streckenabschnitte (ohne Knotenpunkte) nachge-

Modellbereiche	Anwendung		
	Richtungsfahrbahn	Stadtverkehr IV	Stadtverkehr IV + ÖV
Streckenbeschreibung	Freie Strecke, Spuraddition, Spursubtraktion	+ Verzweigung, Einmündung, Kreuzung	+ Haltebucht
Erzeugung von Verkehrsströmen	Zeitlückenverteilung am Streckenanfang	Zeitlückenverteilung an mehreren Netzgrenzen	+ vorgegebene Zeitpunkte an Haltestellen
Entscheidungen	Wunschgeschwindigkeitsänderung	+ gewünschte Fahrtrichtung	+ Fahrtrichtung durch Liniennr. vorgegeben
Störungsquerschnitte	-	Lichtsignal, Fußgänger, Radfahrer, Querverkehr	wie IV
Verhaltensmodell	hohe Geschwindigkeiten, Rechtsfahrgebot	niedrige Geschwindigkeiten, freie Spurwahl, Abbiegen und Verflechten	+ Anfahrt an Haltestelle, Abfahrt aus Haltestelle
lokale Fahrzeug- erfassung	Querschnittsmessungen	+ Detektoren	+ Detektoren für ÖV
Linien mit Haltestellen, Fahrzeugortung	-	-	für ÖV-Fahrzeuge
Datenerfassung	Fahrzeugein/ausfahrt, Fahrzeugpositionen und -zustände	+ Störungen	-
Steuerprogramm	Kordinierung aller Abläufe		

Legende: IV Individualverkehr
 ÖV Öffentlicher Verkehr
 + zusätzlich zu vorstehenden Möglichkeiten

Abb. 4.1-1 Bereiche des Simulationsmodells MISSION

bildet. Es sind auf einer Strecke Änderungen in der Anzahl der Fahrspuren (Spuraddition bzw. Spursubtraktion) und der Neigung möglich.

Zur Nachbildung des Verkehrsablaufs auf Stadtstraßen sind sowohl einfache Verknüpfungsfunktionen in Form von einmündenden oder abzweigenden Spuren als auch komplexe Verknüpfungen in Form von Kreuzungen möglich. Für die Verkehrsanlagen des Öffentlichen Verkehrs ist außerdem die Beschreibung einer Haltebucht vorgesehen.

In der Streckenbeschreibung wird die Nutzung der Spur oder eines Streckenabschnitts durch Individualverkehr und/oder Öffentlichen Verkehr nicht vorgesehen. Es ist jedoch im Modellbereich "Entscheidungen" (siehe unten) möglich, Spurwahlverhalten und Abbiegevorgänge von Fahrzeugen des IV bzw. des ÖV so zu steuern, daß unterschiedliche Fahrspur- bzw. Fahrbahnnutzungen nachgebildet werden können.

Aus der Beschreibung der topologischen Umgebung werden die Organisationsstrukturen für die betrachteten Fahrzeuge abgeleitet. Es werden Spurketten gebildet, in denen alle Fahrzeuge einer durchgehenden Spur des simulierten Netzausschnitts erfaßt sind. Dabei trägt jedes Fahrzeug einen Verweis auf das in der gleichen Spur folgende Fahrzeug (Nachfolger).

An den Rändern des simulierten Netzausschnitts werden die Einfahrt von Fahrzeugen bzw. das Verlassen des Netzausschnitts nachgebildet. Die Basis für die Einfahrt von

Fahrzeugen bilden Zeitlückenverteilungen zwischen den einzelnen Fahrzeugankünften. Fahrzeuge des Öffentlichen Verkehrs können an Haltestellen des ÖV (siehe unten) eingesetzt werden. Jedes Fahrer-Fahrzeug-Element (FFE) erhält bei seiner Erzeugung in Abhängigkeit von der Fahrzeugart individuelle Parameter, die seine Eigenschaften und Möglichkeiten beschreiben. Alle neu generierten Fahrzeuge werden in die Spurketten eingefügt.

Zur Anpassung der Wunschgeschwindigkeiten von Fahrern an äußere Bedingungen und zur Nachbildung von Abbiegevorgängen im Netz können im Modell Entscheidungsquerschnitte definiert werden. Dieser Modellbereich erlaubt die Änderung entsprechender Parameter der Fahrer-Fahrzeug-Elemente. Die Entscheidungsvorgänge werden querschnittsbezogen nachgebildet, indem jedes FFE nach Überfahren der entsprechenden Wegkoordinaten diesen Entscheidungen unterzogen wird.

Der Modellbereich "Störungen" erlaubt die Nachbildung von Behinderungen des Verkehrsablaufs durch Lichtsignale, Fußgänger, Radfahrer usw. Darüber hinaus werden gegenseitige Beeinflussung unterschiedlicher Verkehrsströme als "Störungen" beschrieben.

Störungen können im Modell ausschließlich an festen, bei der Beschreibung der Störungseinflüsse festgelegten Querschnitten auftreten. Alle Störungen werden in Form von Sperrungen bestimmter Spuren nachgebildet.

Das "Verhaltensmodell" bildet die Verhaltensweisen der Fahrer-Fahrzeug-Elemente unter den durch die geometrische Umgebung, Störungen und fahrzeuginternen Steuerparameter (gewünschte Fahrspur, Wunschgeschwindigkeit) gesetzten Randbedingungen nach.

Das Verhaltensmodell ist der Kern des gesamten Simulationsmodells. Alle anderen Modellbereiche haben mehr oder weniger organisatorische Aufgaben und übertragen im Modell die Vorgaben aus dem nachzubildenden Verkehrsablauf auf die simulierten Fahrzeuge bzw. setzen Umgebungsparameter für das Verhaltensmodell. Es werden ausschließlich Parameter berücksichtigt, die für ein Einzelfahrzeug zum Zeitpunkt der Bearbeitung verfügbar sind. Wirksam sind hier die Streckenbeschreibung (geometrische und funktionelle Umgebung), Einflüsse auf den Verkehrsablauf in Form von Störungen und schließlich die Parameter des Fahrzeugs selbst.

Die lokale Erfassung von Fahrzeugbewegungen ermöglicht die Nachbildung von Querschnittsmessungen. Darüber hinaus können Detektoren für Steuerungsmodelle simuliert werden, die querschnittsorientiert Daten erfassen. Im Modell wird nach der Fortbewegung von Fahrzeugen geprüft, ob Erfassungsquerschnitte passiert wurden.

Für die Nachbildung von Verkehrsabläufen des ÖV können innerhalb der geometrischen Umgebung Haltestellen definiert werden. Die Verknüpfung von Haltestellen in einer Anfahrreihenfolge führt zur Beschreibung von Linien.

Die im Simulationssystem geführten Fahrzeuge des ÖV bilden zusammen mit den Haltestellenketten eine Organisationsstruktur, die für Fahrzeuge des Individualverkehrs nicht erforderlich ist. Die ÖV-Fahrzeuge haben dadurch die Möglichkeit, ihre jeweils nächste Halteposition zu erkennen und anzufahren. Gleichzeitig können die Positionen aller ÖV-Fahrzeuge direkt ermittelt werden, um die durch ein rechnergesteuertes Betriebsleitsystem mögliche Fahrzeugortung nachzubilden.

Im Modellbereich "Datenerfassung" werden zentral die Zustände aller im System befindlichen Fahrzeuge erfaßt und auf Datei gespeichert. Es können so nach der Durchführung eines Simulationslaufs beliebige Auswertungen der Verkehrsabläufe durchgeführt werden.

Die Aktivitäten aller Modellbereiche werden zentral durch das Steuerprogramm koordiniert und überwacht.

4.2 Schnittstellen des Simulationsmodells "Verkehrsablauf"

Das Modell des Verkehrsablaufs muß mit Modellen der Signalsteuerung und des ÖV-Systems kommunizieren. Diese verarbeiten Informationen aus dem Verkehrsablauf und geben Steuerungsinformationen zurück. Das Modell "Verkehrsablauf" aktiviert beide Steuerungsmodelle über eine gemeinsame Prozedurschnittstelle. Die jeweils übertragenen Daten sind jedoch sehr unterschiedlich, so daß eine getrennte Betrachtung der Schnittstellenfunktionen sinnvoll ist.

4.2.1 Schnittstelle Verkehrsablauf - Signalsteuerung

Zwischen den Modellen des Verkehrsablaufs und der Signalsteuerung ist ein zweiseitiger Datenverkehr notwendig.

Vom Verkehrsablauf an die Signalsteuerung müssen Meßdaten von Verkehrsdetektoren übergeben werden. Diese Detektoren bilden alle üblicherweise verwendeten Anlagen zur Detektion und Messung von Fahrzeugen des Individualverkehrs und des Öffentlichen Verkehrs nach (Anforderungskontakte, Zählschleifen, Belegschleifen usw.).

Das Modell der Signalsteuerung bestimmt, wann die Daten ausgewertet und wie sie verarbeitet werden. Die Daten werden deshalb vom Modell des Verkehrsablaufs kontinuierlich bereitgestellt. Beide Modelle können unabhängig voneinander auf die Datenpuffer zurückgreifen (Abb. 4.2-1).

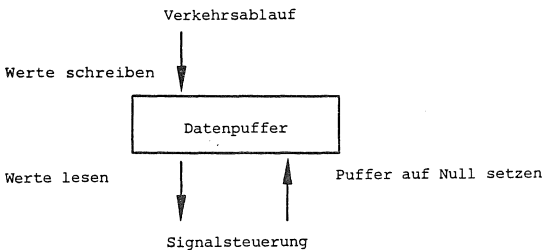


Abb. 4.2-1 Zugriffe auf Puffer für Detektordaten

Zur Übergabe der Daten besteht eine Zuordnung zwischen einer Messung (Identifizierung durch eine Nummer) und einem Feld des Pufferbereichs. Alle Meßwertfelder können damit direkt angesprochen werden.

Vom Modell der Signalsteuerung werden zwei Arten von Informationen übergeben:

Zum ersten werden die Meßdatenpuffer, die evtl. zurückgesetzt wurden, wieder für das Modell des Verkehrsablaufs verfügbar gemacht.

Des weiteren werden jeweils alle Signalzustände an das Modell des Verkehrsablaufs übergeben. Es werden dabei Zustandsvariablen verwendet, die folgende zwei Signalzustände wiedergeben: Durchfahrt frei (grün, gelb) und Durchfahrt nicht frei (rot, rotgelb). Die Übergänge von einem Zustand in den anderen werden intern im Simulationsmodell des Verkehrsablaufs erkannt, und entsprechende Reaktionen der Verkehrsteilnehmer werden nachgebildet.

Zwischen den einzelnen Kreuzungen mit ihren Signalgruppen und den Übergabefeldern wird eine feste Zuordnung getroffen (wie bei der Übergabe der Detektordaten). Damit ist auch hier ein Direktzugriff auf die einzelnen Signaldaten möglich.

Die Datenübergabe in festen Feldern ohne explizite Angabe von Nummern oder Kennungen erfordert eine Vereinbarung der internen Indizes dieser Übergabebereiche. Das Modell der Signalsteuerung trifft eine feste Indexzu-

ordnung, die bei der Initialisierung vom Modell des Verkehrsablaufs übernommen wird. Dabei wird in MISSION geprüft, ob die Anzahl und die externen Nummern und Kennungen der Signale und Detektoren in beiden Modellen übereinstimmen (Prüfung auf Konsistenz und Vollständigkeit).

4.2.2 Schnittstelle Verkehrsablauf - ÖV-System

Zwischen dem Modell des Verkehrsablaufs und dem Modell zur Nachbildung des ÖV-Betriebsleitsystems besteht wie zwischen Signalsteuerung und Verkehrsablauf ein zweiseitiger Datenverkehr. Dabei sind zur organisatorischen Abwicklung des Öffentlichen Verkehrs im Modell folgende Daten auszutauschen:

- Einfahrt in den simulierten Netzausschnitt;
- Anfahrt einer Haltestelle;
- Abfahrt von einer Haltestelle;
- Verlassen des simulierten Netzausschnitts.

Für die Nachbildung des Betriebsleitsystems sind folgende Funktionen vorgesehen:

- Fahrzeugverfolgung;
- Überwachung von Abfahrtszeitpunkten;
- Rücksetzen der Wegzähler.

Vom Modell des Verkehrsablaufs werden an das ÖV-System neben der Ankunftsmeldung an einer Haltestelle ebenso Daten zur Fahrzeugverfolgung übergeben.

Die Fahrzeuge des ÖV werden durch eine Nummer identifiziert. Da mehrere Fahrzeuge gleichzeitig im System sein können, müssen diese Identifikationsnummern für alle gleichzeitig geführten Fahrzeuge eindeutig sein ("interne Fahrzeugnummer").

Bei der Haltestellenanfahrt wird der Ankunftszeitpunkt am Fahrgastwechselplatz gemeldet. Es werden die interne Fahrzeugnummer und die Haltestellennummer übergeben. Der Ankunftszeitpunkt liegt implizit durch die Ankunftsmeldung vor. Die Meldung muß vom Modell des ÖV-Betriebsleitsystems sofort ausgewertet werden.

Im Hinblick auf die Fahrzeugverfolgung wird für jedes Fahrzeug des Öffentlichen Verkehrs zu jedem Zeitschritt ein Datenblock übergeben, der die Fahrzeugnummer und den Abstand des Fahrzeugs von der letzten Haltestelle enthält. Das Modell des Betriebsleitsystems kann die Daten in Abhängigkeit vom Ortungsintervall bei Bedarf auswerten.

Das Modell des ÖV-Systems veranlaßt die Abfahrt eines Fahrzeugs von einer Haltestelle. Dazu wird an das Modell des Verkehrsablaufs zum gewünschten Abfahrtszeitpunkt ein Datenblock übergeben, der die interne Fahrzeugnummer, die Linie und die Haltestellennummer enthält.

Im Modell des Verkehrsablaufs wird geprüft, ob ein Fahrzeug dieser Nummer bereits existiert. Ist das nicht der Fall, so wird ein neues Fahrzeug des Öffentlichen Verkehrs an dieser Haltestelle auf der entsprechenden Linie eingesetzt. Dieses Fahrzeug ist im folgenden im System

bekannt und fährt weitere Haltestellen entsprechend seinem Linienverlauf an. Die Entscheidung zum Einsetzen eines Fahrzeugs von seiten des ÖV-Systems fällt unter Berücksichtigung des Fahrplans und der vorgegebenen Verteilung der Ankunftszeitverspätungen.

Betrifft der Abfahrtsbefehl ein Fahrzeug, das im Verkehrsablaufmodell bereits bekannt ist, so wird der Wegzähler des Fahrzeugs zurückgesetzt und das Fahrzeug fährt aus der Haltestelle heraus.

5. Modellbildung - Bereiche des Simulationsmodells

Die einzelnen Bereiche des Simulationsmodells orientieren sich jeweils an abgrenzbaren Ausschnitten des Verkehrsablaufs in der Realität. Die Beschreibung der Funktionsbereiche nimmt entsprechend jeweils die Realität zum Vorbild und zeigt vorgenommene Abstraktionen auf. Die resultierenden Modellvorstellungen werden in Bezug gesetzt zu den Organisationsstrukturen des Gesamtmodells. Darüber hinaus werden die einzelnen modellierten Vorgänge, d. h. die verfügbaren Simulationsbausteine, beschrieben.

5.1 Streckenbeschreibung

Der Modellbereich "Streckenbeschreibung" dient zur Nachbildung der aufgrund einer realen Streckengeometrie vorgegebenen Randbedingungen für den Verkehrsablauf.

Der Modellansatz geht davon aus, daß reale Netzausschnitte in Bereiche unterteilt werden können, die bestimmte Charakteristiken (gleichbleibende Randbedingungen - Übergangscharakteristik) haben. Entsprechend wird die zu simulierende Strecke aus Bausteinen aufgebaut, die im Modell vordefiniert sind und die es erlauben, komplexe Netzausschnitte nachzubilden. Diese Bausteine enthalten alle wesentlichen, durch die Streckencharakteristik gegebenen Randbedingungen für das Fahrverhalten von Fahrzeugen im jeweiligen Streckenbereich.

Die verfügbaren Bausteintypen sind (Abb. 5.1-1):

- Richtungsfahrbahn mit konstanter Charakteristik;
- Verzweigung (Übergangscharakteristik):
Abzweigung einer Spur von einem durchgehenden Streckenabschnitt, Angabe der Länge des Entflechtungsbereichs;
- Einmündung (Übergangscharakteristik):
Verflechtung genau einer Spur von links oder rechts mit einer definierten Anzahl von durchgehenden Fahrspuren. Es werden die Längen der Verflechtungstrecken und die Verkehrsregelung (Reißverschlußverfahren, Vorfahrt beachten) angegeben;
- Haltebucht:
Die Haltebucht ist eine Kombination aus einer Ent- und einer Verflechtung. Sie dient zur Nachbildung einer speziellen Haltestelle des öffentlichen Verkehrs (Busbucht);
- Kreuzungsbaustein mit komplexen Abbiege- und Übergangsfunktionen:
Ein Kreuzungsbaustein kann aus beliebig vielen sogenannten "Hauptspuren" und "Übergangsspuren" bestehen. Die Hauptspuren repräsentieren durchgehende Fahrbahnen, während die Übergangsspuren Möglichkeiten zum Wechsel von einer Hauptspur in eine andere beschreiben.

Ein Baustein ("Funktionsblock") wird gekennzeichnet durch die Angabe seines Typs, einer Identifikationsnummer und typspezifischer Parameter.

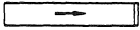
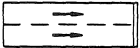



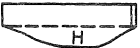
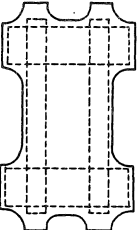
<u>Form</u>	<u>Symbole</u>
gerade Strecke	 
Verzweigung	 
Einmündung	
Haltebucht	
Kreuzung	

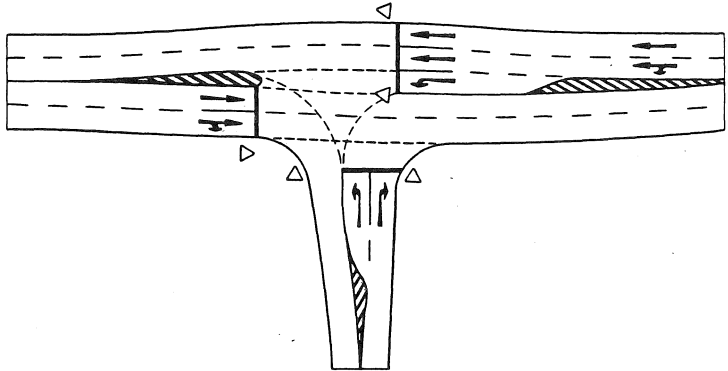
Abb. 5.1-1 Vordefinierte Streckenbausteine im Modell MISSION

Für jeden Bausteintyp müssen die genauen Spezifikationen angegeben werden. Diese sind insbesondere

- Länge des Bausteins;
- Anzahl der Spuren auf der durchgehenden Fahrbahn;
- Steigung bzw. Gefälle;
- Spurwechselrestriktionen (Spurwechselverbot für Lkw, absolutes Spurwechselverbot für alle Fahrzeuge, nur Spurwechsel rechts erlaubt, nur Spurwechsel links erlaubt);
- Richtung einer Verzweigung oder Zusammenführung;
- Vorfahrtsregelung bei Verflechtungsstrecken und Haltebuchten (Wartepflicht oder Reißverschlußverhalten);
- durchgehende Spuren (Hauptspuren) und Übergangsspuren (Wechsel aus einer Hauptrichtung in eine andere) innerhalb eines Kreuzungsbausteins;
- Identifikationsnummern aller angrenzenden Streckenbausteine

Zur Erstellung der Streckenbeschreibung wird der nachzubildende Netzausschnitt in einzelne Abschnitte mit konstanter oder mit Übergangscharakteristik unterteilt (Abb. 5.1-2). Jeder dieser Abschnitte wird als Block mit seinen Spezifikationen beschrieben. Die Streckenabschnitte werden hinsichtlich der Befahrbarkeit durch den öffentlichen Verkehr oder den Individualverkehr bei der Definition nicht unterschieden. Die Zulässigkeit eines bestimmten Bausteins für den ÖV oder den IV wird ausschließlich durch Richtungsentscheidungen geregelt (siehe Abschnitt 5.3).

Geometrie einer Abzweigung



Struktur im Modell

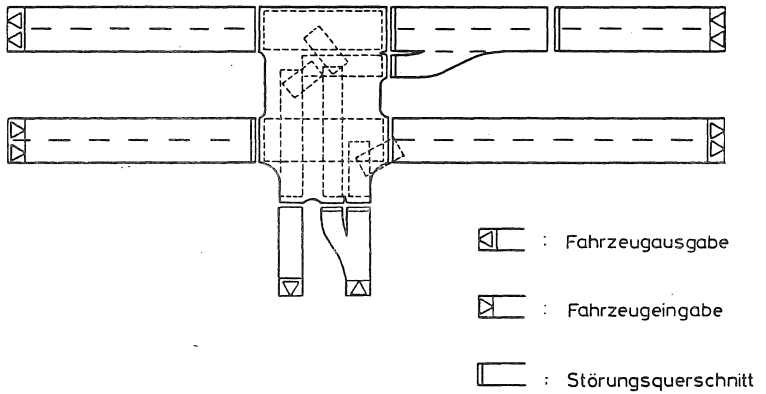


Abb. 5.1-2 Darstellung eines Netzausschnittes durch Streckenbausteine

Zur Verknüpfung der einzelnen Strecken werden jeweils alle Vorgänger- und Nachfolgerstrecken angegeben. Die hierbei erreichte Redundanz ermöglicht Plausibilitätskontrollen beim Aufbau der Simulationsstrukturen.

Aus den einzelnen Streckenbausteinen werden für die Bearbeitung des Simulationsmodells durch Verknüpfung der durchgehenden Fahrbahnen aneinandergrenzender Bausteine sogenannte Hauptspuren gebildet, die eindeutige Nummern bekommen. Jeder Hauptspur entspricht eine durchgehende Fahrzeugkette. Die Hauptspuren werden mit Koordinaten versehen, die bei jedem Einfahrtquerschnitt mit der Koordinate "0" beginnen. Abzweigende Hauptspuren erhalten, soweit möglich, angepasste Koordinaten. Bei einem Übergang von einer Hauptspur auf eine andere (z. B. innerhalb einer Kreuzung) können Koordinatensprünge auftreten. In diesem Fall werden von den Prozeduren zur Durchführung von Spurwechseln (Wechsel von einer Fahrzeugkette in eine andere) entsprechende Anpassungen der Fahrzeugkoordinaten vorgenommen.

Jede mögliche Fahrzeugposition im simulierten Netz ist dann durch Angabe der Nummer der Hauptspur und einer Koordinate eindeutig bestimmt.

5.2. Erzeugung von Verkehrsströmen

An den Grenzen des im Modell nachgebildeten Netzausschnitts zur Umgebung muß die Einfahrt von Verkehrsströmen in das Netz bzw. die Ausfahrt von Fahrzeugen simuliert werden.

Die Ausfahrt von Fahrzeugen ist einfach zu realisieren: Fahrzeuge, welche einen Ausfahrtquerschnitt überfahren haben, verschwinden aus dem betrachteten Kollektiv. Es ist keine Beschreibung dieser Modellaktivität durch den Anwender erforderlich. Bei der Aktualisierung von Fahrzeugpositionen wird das Überfahren eines Ausfahrtquerschnittes programmintern festgestellt und die entsprechende Bearbeitung veranlaßt.

Zur Nachbildung der Einfahrt von Verkehrsströmen in die simulierten Strecken müssen die Fahrzeuge an den Einfahrtquerschnitten entsprechend den realen Bedingungen erzeugt werden.

Diese Bedingungen werden insbesondere durch die Verteilung der Zeitlücken zwischen den einzelnen Fahrzeugankünften (bezogen auf eine Spur oder einen Fahrbahnquerschnitt) und Fahrzeugkenngrößen (Fahrzeugart, Fahrer-Fahrzeug-Parameter) beschrieben.

In der Realität (insbesondere auf Schnellverkehrsstraßen) bestehen aufgrund der "Vorgeschichte" des Verkehrsablaufs stromaufwärts vom betrachteten

Querschnitt Korrelationen zwischen den Arten aufeinanderfolgender Fahrzeuge (Pkw, Lkw) bzw. den Folgezeitlücken. Diese Zusammenhänge sind allerdings noch sehr wenig erforscht (vgl. BRANNOLTE, 1978) und werden in den realisierten Modulen auch nicht berücksichtigt.

Im Simulationsmodell wird ein Einfahrtquerschnitt beschrieben durch:

- Baustein, an dessen Beginn die Fahrzeuge eingesetzt werden;
- Spurspezifikation (Fahrbahnquerschnitt oder einzelne Spur);
- Verkehrsstärke (Fz/h);
- Verkehrszusammensetzung (Anteil Lkw; Aufteilung der Lkw in Fahrzeuge ohne und mit Anhänger);
- Form der Verteilung der Zeitlücken zwischen den ankommenden Fahrzeugen;
- Wunschgeschwindigkeitsverteilung für die erzeugten Fahrzeuge (evtl. unterschieden nach Fahrzeugarten).

Die Fahrzeuge werden entsprechend den Vorgaben pseudozufällig erzeugt. Dabei wird die Generierung von Zeitlücken zwischen den Fahrzeugankünften und die Bestimmung der Fahrzeugart entsprechend den beschriebenen Verteilungen vorgenommen. Für die Zeitlückenverteilung kann neben realistischen Verteilungen auch eine nur theoretisch realisierbare Exponentialverteilung ver-

wendet werden (Poisson-verteilte Fahrzeugankünfte). Es werden dann modellintern Korrekturen im Hinblick auf die Einhaltung von Mindestzeitlücken und zur Vermeidung extrem großer Zeitlücken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen vorgenommen.

Gilt die Definition des Einfahrtquerschnitts für mehrere Fahrspuren gleichzeitig, so muß zusätzlich die Spur ausgewählt werden, auf der das Fahrzeug eingesetzt werden soll. Diese Auswahl orientiert sich bei den realisierten Modulen an den Zeitlücken zu vorausfahrenden Fahrzeugen auf allen Alternativspuren.

Die Prozesse zur Fahrzeuggenerierung arbeiten unabhängig von den Modulen zur Fortschreibung der Fahrzeugpositionen. Die Zeitpunkte der Fahrzeugankünfte an den Einfahrtquerschnitten sind deshalb nicht mit dem Raster des Bewegungsprozesses synchronisiert. Um eine koordinierte und zeitrichtige Bearbeitung auch der neu eingesetzten Fahrzeuge zu erreichen, werden die Fahrzeugpositionen auf den Zeitpunkt der nächsten Aktivierung des Bewegungsprozesses hochgerechnet. Dazu wird ein vereinfachter Baustein des Interaktionsmoduls benutzt.

Jedes erzeugte Fahrer-Fahrzeug-Element erhält in Abhängigkeit von seinem Typ eine Charakteristik entsprechend dem in der Realität anzutreffenden Spektrum von Fahrern und Fahrzeugen. Dabei werden sowohl fahrzeugspezifische Größen wie

- Höchstgeschwindigkeit bei Pkw bzw. spezi-

fische Leistung bei Lkw (hieraus werden jeweils die Beschleunigungsmöglichkeiten abgeleitet),

- Fahrzeuglänge,
- maximal mögliche Bremsverzögerung

als auch fahrerspezifische Kennzahlen wie

- Parameter für das gewünschte Geschwindigkeitsniveau (Lage der individuellen Wunschgeschwindigkeit innerhalb der Wunschgeschwindigkeitsverteilung eines Fahrzeugkollektivs),
- Sicherheitsbedürfnis,
- Schätzvermögen,
- Kontrollvermögen

mit Hilfe von modellintern vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen gesetzt. Diese FFE-spezifischen Werte bleiben während des Aufenthalts eines FFE im simulierten System konstant.

Die Erzeugung von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs wird ausschließlich vom ÖV-Leitsystem angestoßen.

5.3 Entscheidungen

Bei Fahrten in Netzen bzw. auf Richtungsfahrbahnen mit Verzweigungen werden u.a. Entscheidungen zur Wahl der Fahrspur (z.B. im Hinblick auf einen Abbiegevorgang) oder zum Geschwindigkeitsverhalten (Reaktion auf Geschwindigkeitsbegrenzung oder Änderung der Streckencharakteristik) getroffen. In der Realität sind dies individuelle Entscheidungen aufgrund von äußeren (Strassengeometrie, Geschwindigkeitsbegrenzung) und inneren (allgemeines Geschwindigkeitsverhalten, gewünschte Route im Netz) Bedingungen. Insbesondere sind aufeinanderfolgende Entscheidungen im allgemeinen konsistent (Verfolgen einer bestimmten Route, ähnliches Geschwindigkeitsverhalten bei vergleichbaren Situationen).

Im vorliegenden Modell des Verkehrsablaufs werden Verkehrsströme insoweit als eine Menge von Individuen angesehen, als die Kenngrößen einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit während des Aufenthalts im System konstant bleiben. Die realen Vorgänge werden aber dahingehend vereinfacht nachgebildet, daß alle Entscheidungen an vorher festgelegten Querschnitten getroffen werden, und daß aufeinanderfolgende Entscheidungen voneinander unabhängig sind.

Der Anwender des Simulationsmodells hat damit einerseits eine einfache Möglichkeit zur Beschreibung von Entscheidungsvorgängen, andererseits muß er die Lage der Entscheidungsquerschnitte im Netz sinnvoll definieren, da das Modell hier keine impliziten Aktivitäten durchführt.

Die Entscheidungen zum Richtungs- und Geschwindigkeitsverhalten werden bei den realisierten Modulen jeweils

als konstant für die gesamte Simulationszeit vorgegeben. Die Modellstruktur bietet jedoch die Voraussetzung, die Wirkung der Entscheidungsquerschnitte über die Schnittstelle zur Signalsteuerung zu beeinflussen. Dies würde z.B. die dynamische Änderung von Geschwindigkeitsvorgaben (Geschwindigkeitstrichter vor Lichtsignalanlagen) zulassen.

Entscheidungsquerschnitte können an beliebigen Stellen innerhalb des simulierten Netzausschnitts definiert werden. Die Entscheidungsblöcke sind untereinander unabhängig. Die Organisationsumgebung des Simulationsmodells prüft in jedem Zeitschritt, ob ein Fahrzeug einen Entscheidungsquerschnitt überfahren hat und veranlaßt dann die zugeordneten Aktivitäten. Diese beeinflussen ausschließlich Parameter des jeweiligen Fahrzeugs.

5.3.1 Richtungsentscheidungen

Alle Fahrzeuge, die an einem Eingabequerschnitt erzeugt werden, folgen im Normalfall ihrer durch eine Folge von Funktionsblöcken definierten durchgehenden Strecke. Diese kann eine beliebige Zahl von Spuren umfassen.

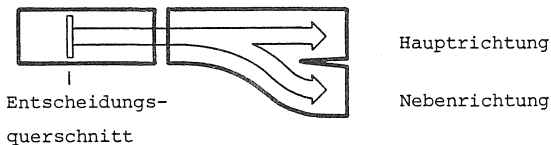


Abb. 5.3-1 Richtungsentscheidung

Ein Abbiegen vom durchgehenden Spurverlauf ist nur möglich durch Angabe einer gewünschten Abbiegerichtung. Dabei werden ein Stromanteil (prozentualer Anteil der Fahrzeuge eines Stroms) sowie besondere Nebenbedingungen spezifiziert.

Im einzelnen können folgende Daten angegeben werden:

- Lage des Entscheidungsquerschnitts innerhalb eines Streckenbausteins;
- Abbiegewahrscheinlichkeiten (z.B. 30% Rechtsabbieger, 20% Linksabbieger); die Fahrzeuge werden dabei pseudo-zufällig aus dem Strom ausgewählt;
- Einschränkung auf eine bestimmte Spur innerhalb des Bausteins (im Normalfall gilt die Entscheidung für den gesamten Querschnitt);
- Einschränkung auf eine bestimmte Fahrzeugart (bei Individualverkehr Pkw oder Lkw, im Öffentlichen Verkehr auf eine bestimmte Linie);
- Abbiegebereich (Wegbereich, in dem der Abbiegevorgang vollzogen sein muß; im anderen Fall wird der Abbiegewunsch zurückgesetzt).

Bei der "Richtungsentscheidung" kann auch eine bestimmte Spur innerhalb der durchgehenden Strecke (Haupttrichtung) angegeben werden. Auf diese Weise kann innerhalb einer Haupttrichtung gezielt die Aufteilung der Fahrzeuge auf die Spuren beeinflußt werden.

Die zur Durchführung des Abbiegevorgangs erforderlichen Spurwechsel werden vom FFE selbst festgestellt (z. B. sind bei einem Abbiegen nach rechts für ein Fahrzeug, das auf der linken Spur einer dreispurigen Richtungsfahrbahn fährt, drei Spurwechsel notwendig). Das Fahrzeug versucht, die Spurwechsel im vorgegebenen Bereich durchzuführen, ohne andere Fahrzeuge wesentlich zu behindern. Allerdings wird im letzten Abschnitt des Spurwechselbereichs versucht, den Spurwechsel auch dann durchzuführen, wenn andere Fahrzeuge merklich behindert werden. Dieser Bereich kann programmintern verändert werden. Durch geeignete Wahl des Spurwechselbereichs kann dabei auch ein Vorsortier-Effekt erreicht werden, so daß Fahrzeuge, die erst im folgenden Streckenabschnitt rechts abbiegen wollen, bereits relativ früh auf die rechts durchgehende Spur wechseln, obwohl die Abbiegespur erst später beginnt.

Die Auswahl der Fahrzeuge, für die ein Richtungswunsch gesetzt wird, erfolgt pseudo-zufällig entsprechend den vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten. Im Modell sind keine Abhängigkeiten vom Eintrittspunkt eines Fahrzeuges in das simulierte Netz bzw. von früheren Abbiegevorgängen berücksichtigt. Außerdem sind die Abbiegewahrscheinlichkeiten aufeinanderfolgender Fahrzeuge voneinander unabhängig. Diese Annahmen beeinträchtigen die Möglichkeiten des Modells nicht, solange keine netzbezogenen Steuerungsmodelle mit Berücksichtigung von Alternativrouten untersucht werden sollen. Dies ist aber auch nicht der Zweck des Modells. Ohne Beschränkungen können Parameter des Verkehrsablaufs in Bereichen zwischen Netzknoten erfaßt und ausgewertet werden. Fahrzeiten auf bestimmten Routen lassen sich durch Auswahl von Fahrzeugen, die "zufällig"

eine bestimmte Route fahren, oder durch Addition von Fahrzeiten auf einzelnen Netzkanten errechnen.

5.3.2 Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen

Die Geschwindigkeitswahl der Fahrzeuge in innerstädtischen Straßennetzen hängt im wesentlichen ab von den Gegebenheiten im Straßenraum, von anderen Verkehrsteilnehmern und von persönlichen Wünschen (Abb.5.3-2).

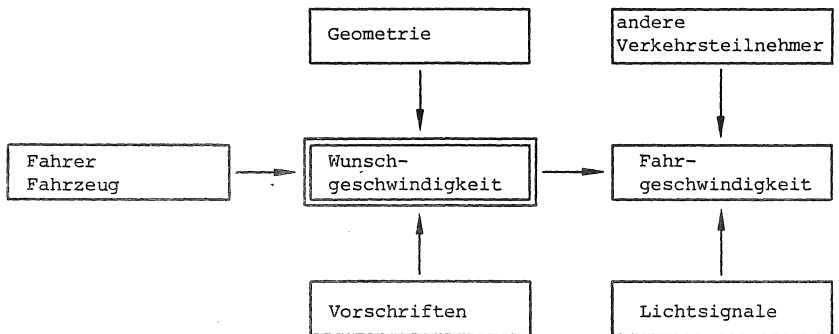


Abb. 5.3-2 Geschwindigkeitsbeeinflussende Faktoren

Der Straßenraum wirkt auf die gefahrenen Geschwindigkeiten sowohl in räumlicher Hinsicht durch Fahrbahnbreite, Ausbauzustand, Kurvenradien und Neigungen als auch durch Verkehrsvorschriften wie z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen. Im Modell des Verkehrsablaufs bilden diese Randbedingungen die wesentlichen Einflußgrößen für die gewünschte Fahrgeschwindigkeit. Diese unter gegebenen Bedingungen angestrebte Geschwindigkeit wird als Wunschgeschwindigkeit bezeichnet. Sie ist im allgemeinen für jeden Fahrer bzw. für die Kombination Fahrer/Fahrzeug unterschiedlich; die statistische Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten aller Fahrer eines Kollektivs kann aber über eine entsprechende Funktion beschrieben werden.

Die Wunschgeschwindigkeit bildet im Modell die Basis jeglichen Geschwindigkeitsverhaltens. Jeder Fahrer versucht, soweit unter den gegebenen verkehrlichen Randbedingungen (andere Verkehrsteilnehmer, Lichtsignale) möglich, mit seiner Wunschgeschwindigkeit zu fahren bzw. diese zu erreichen.

Im Simulationsmodell beeinflussen nur die vorgegebene Wunschgeschwindigkeitsverteilung sowie feste fahrerspezifische Größen die Wunschgeschwindigkeit. Zeitabhängige Einflüsse (z.B. der Wunsch, verlorene Zeit aufzuholen) werden nicht berücksichtigt.

Der Anwender muß alle Querschnitte, an denen neue Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zu berücksichtigen sind, explizit vorgeben. Jedes Fahrzeug beginnt nach Überfah-

rung des Entscheidungsquerschnittes und der damit verbundenen Vorgabe einer neuen Wunschgeschwindigkeit mit der Anpassung seiner Fahrgeschwindigkeit an den neuen Richtwert, falls es nicht durch andere Einflüsse (vorausfahrendes langsames Fahrzeug) behindert wird.

Die neue Wunschgeschwindigkeit jedes Fahrzeugs wird unter Berücksichtigung des Parameters "Geschwindigkeitsniveau", des Fahrer-Fahrzeug-Elements und eines für den Entscheidungsquerschnitt vorgebbaren "Korrelationsparameters" bestimmt. Der Korrelationsparameter gibt dabei an, wie genau das gewünschte Geschwindigkeitsniveau mit der Lage der zugewiesenen Wunschgeschwindigkeit innerhalb der Wunschgeschwindigkeitsverteilung korreliert (z.B. erhält ein Fahrzeug mit einem sehr kleinen Niveauparameter bei hoher Korrelation auch eine kleine Wunschgeschwindigkeit bezogen auf die neue Verteilungsfunktion; ohne Korrelation kann jedes Fahrzeug jeden beliebigen Geschwindigkeitswert aus der neuen Wunschgeschwindigkeitsverteilung zugewiesen bekommen).

Die FFE passen ihre Geschwindigkeit, soweit verkehrlich möglich, an die neue Wunschgeschwindigkeit an, wobei die realisierte Beschleunigung bzw. Verzögerung in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der gerade gefahrenen und der neuen gewünschten Geschwindigkeit bestimmt wird.

Die Entscheidungsquerschnitte für Wunschgeschwindigkeitsänderungen werden beschrieben durch:

- Lage des Querschnitts innerhalb eines Bausteins;

- Angabe der beeinflussten Spur im Querschnitt (im allgemeinen gilt eine Änderung für den gesamten Querschnitt);
- eventuelle Einschränkung der Wunschgeschwindigkeitsänderung auf einen bestimmten Fahrzeugtyp (Pkw, Lkw, Bus, Straßenbahn);
- eventuelle Restriktion auf Fahrzeuge mit einem bestimmten Abbiegewunsch

sowie

- Angabe der neuen gültigen Wunschgeschwindigkeitsverteilungsfunktion.

5.4 Störungsquerschnitte

Unter dem Oberbegriff "Störungen" werden hier alle Einflüsse zusammengefaßt, die an einem festen Querschnitt zeitweise eine oder mehrere Fahrspuren blockieren, wobei diese "Blockierung" gleichermaßen von einer Lichtsignalanlage, einem die Straße überquerenden Fußgänger oder von einem vorfahrtberechtigten Fahrzeug des Querverkehrs verursacht sein kann.

Die in der Realität eventuell sehr unterschiedlichen Einflüsse (und möglicherweise auch unterschiedlichen Reaktionen der Verkehrsteilnehmer) werden im Modell so betrachtet, als ob sie gleichartige Auswirkungen auf das Fahrverhalten hätten. Sämtliche Störungen können nur an vorher festgelegten Querschnitten auf definierten Spuren auftreten. Außerdem existiert eine Störung für die Fahrer-Fahrzeug-Elemente immer nur im aktuellen Zeitintervall; es wird keine (in der Realität manchmal vorhandene) Information über in der Zukunft liegende Zeitpunkte des Beginns oder des Endes einer Störung ausgewertet.

Alle Störungen können nur am Ende von Streckenbausteinen definiert werden. Unter Umständen ist dabei die Länge eines Streckenbausteins der erforderlichen Lage eines Störungsquerschnitts anzupassen. Die Wirksamkeit der Störungen kann innerhalb eines Querschnitts auf bestimmte Spuren eingeschränkt werden.

Das Vorhandensein einer Störung wird im zugeordneten

Programmbereich (Störungsblock) festgestellt. In jedem Zeitschritt setzen alle Störungsblöcke mit aktiven Störungen globale Variable in den zugeordneten Streckenbausteinen (Funktionsblöcke). Diese signalisieren das Vorhandensein einer Störung. Eine Störungsmeldung wird (spurbezogen) zurückgesetzt, wenn das erste Fahrzeug auf die Störung reagiert hat (Entscheidet sich z. B. bei einer Lichtsignalstörung ein Fahrzeug bei Beginn der Gelbzeit für das Überfahren der Störung, so bleibt die Störung gesetzt und das nächste Fahrzeug reagiert). Nachfolgende Fahrzeuge auf derselben Spur können die Störung nicht mehr erkennen. Diese reagieren lediglich auf das Fahrverhalten des Vordermanns.

Es stehen im Modell folgende Möglichkeiten zur Definition einer Störung zur Verfügung:

- Lichtsignalstörung:

Diese Störung wird direkt durch Daten aus dem Modell der Signalsteuerung beeinflusst. Es wird der Signalzustand übernommen und verarbeitet.

- Fußgängerstörung:

Die Fußgängerstörung ist definiert als eine Blockierung, die durch den Wechsel eines definierten Lichtsignals (simuliertes Fußgängersignal) von rot auf grün ausgelöst wird. Die Störungsdauer wird im Gegensatz zur Lichtsignalstörung mit Hilfe einer getrennt eingegebenen Verteilung der Blockierungszeiten zufällig erzeugt.

Es können so unterschiedlich lange Behinderungen nachgebildet werden.

- Radfahrerstörung:

Unter Radfahrerstörungen werden alle Störungen nachgebildet, die eine feste Störungsdauer haben, aber zufällig auftreten können (Beschreibung durch Angabe der Verteilung der Zeiten zwischen zwei Störungen und der Störungsdauer). Störungen dieser Art dienen z. B. zur Nachbildung der Vorfahrtsberechtigung von Radfahrern auf parallel geführten Radwegen gegenüber abbiegenden Fahrzeugen.

- Querverkehrsstörung:

Mit Hilfe einer Querverkehrsstörung werden alle Störungen nachgebildet, die beim Kreuzen bevorrechtigter Verkehrsströme oder beim Einbiegen in einen bevorrechtigten Strom auftreten können. Im Modell können durch vorgebbare Verteilungen der Mindestzeitlücken verschiedene äußere Bedingungen simuliert werden. Jedes Fahrzeug wählt bei Annäherung an die Störung eine gewünschte Mindestzeitlücke und fährt nur weiter, wenn es eine solche oder eine größere Zeitlücke im bevorrechtigten Strom antrifft.

Zusätzlich mögliche Optionen sind die Vorgabe eines einmaligen Zwangshalts an der Haltelinie (Nachbildung einer Stoppstelle) oder die Überprüfung auf Blockade bestimmter Bereiche ande-

rer Spuren (z. B. innerhalb von signalisierten Kreuzungen, wo im Normalfall keine Behinderung durch kreuzenden Verkehr zu erwarten ist).

5.5 Bereichsorientiertes Verhaltensmodell

Den Kern der Simulation des Verkehrsablaufs bildet das Verhaltensmodell, mit dem die Interaktion zwischen Fahrer-Fahrzeug-Elementen, die Reaktion auf Störungen sowie die Spurwahl nachgebildet werden.

Die Basis für Interaktionsmodelle des hier eingesetzten Typs bildet ein von WIEDEMANN (1974) vorgestelltes Modell für einspurige Straßen, das von WILLMANN (1979) und WETTERLING (1980) im Hinblick auf Spurwechselverhalten und von BRANNOLTE (1981) auf Überholverhalten bei Gegenverkehr erweitert wurde. Auf diesen Grundlagen wurde das Modell des Fahrverhaltens auf Stadtstraßen bzw. Richtungsfahrbahnen erstellt.

Das Verhaltensmodell trifft Entscheidungen über das Fahrverhalten von Einzelfahrzeugen für jeweils ein Zeitintervall von einer Sekunde (dieses Zeitintervall wurde in Anlehnung an die mittlere Reaktionszeit von Fahrzeugführern gewählt (WIEDEMANN, 1974)). Das Verhalten wird in zwei wesentliche Bereiche unterteilt (Abb. 5.5-1):

Aktionsrichtung	Aktionsbereiche
Verhalten in Längsrichtung (longitudinal)	freies Verhalten
	Folgeverhalten
	Annäherungsverhalten
	Bremsverhalten
Verhalten in Querrichtung (latéral)	vorgeschriebenes Spurwahlverhalten
	Spurwechsel wegen Behinderung
	Spurwechsel wegen Richtungswunsch
	Reißverschlußverfahren

Abb. 5.5-1 Verhaltensbereiche im Modell MISSION

- Verhalten in Längsrichtung (longitudinal):
Reaktion auf vorausfahrende Fahrzeuge oder
auf Störungen;
- Verhalten in Querrichtung (lateral):
Verhalten beim Wechseln der Fahrspur.

Das Fahrzeugfolgeverhalten wird durch eine für das nächste Zeitintervall konstante Beschleunigung bestimmt, während das laterale Verhalten die mögliche Entscheidung zur Durchführung eines Spurwechsels umfaßt.

Das Verhaltensmodell berücksichtigt bei den zu treffenden Entscheidungen mehrere Einflußrichtungen:

- Parameter des betrachteten Fahrer-Fahrzeug-Elements (Wunschgeschwindigkeit, gewünschte Spur, fahrdynamische und verhaltensbeschreibende Kenngrößen);
- Restriktionen von seiten der Strecke (Anzahl der Spuren, Neigung, Spurwechselverbote);
- umgebende Fahrzeuge (vorausfahrende und nachfolgende Fahrzeuge jeweils auf der eigenen und den benachbarten Spuren).

Die Entscheidungen werden fast ausschließlich unter Berücksichtigung der zum jeweiligen Zeitpunkt gültigen Einflüsse getroffen (eine Ausnahme bildet die Nachbildung bestimmter Lernprozesse bei Annäherungsvorgängen). Es werden keine langfristigen Verhaltensentscheidungen getroffen, außerdem wird jeweils nur die direkte Umgebung eines Fahrzeugs für die Entscheidung betrachtet (ein Fahrzeug kann z.B. nicht feststellen, aus welchem Grund sein Vordermann bremst).

5.5.1 Verhalten in Längsrichtung

Das Verhalten in Längsrichtung wird beschrieben durch ein Bereichsmodell, das alle Vorgänge als eine Folge von Verhaltenszuständen (Bereiche) behandelt, die jeweils gewisse Grundfunktionen abdecken. Die Reaktion auf eine Störung wird dabei im wesentlichen wie die Reaktion auf ein an der Haltelinie stehendes Fahrzeug behandelt.

Die verwendeten Grundfunktionen sind

- freies Verhalten,
- Folgeverhalten,
- Annäherungsverhalten,
- Bremsverhalten.

Der Zustand freies Verhalten liegt vor, wenn ein Fahrer weder durch einen Vordermann noch durch eine Störung behindert wird. Er versucht dann, mit seiner Wunschgeschwindigkeit zu fahren oder diese zu erreichen (z. B. nach einer vorhergegangenen Behinderung). Bei konstanter Fahrt treten dabei Beschleunigungen lediglich im Bereich eines Grundrauschens auf, während zum Erreichen der Wunschgeschwindigkeit eine auf diese Wunschgeschwindigkeit bezogene degressive Beschleunigungsfunktion verwendet wird.

Der Zustand Folgeverhalten wird dadurch gekennzeichnet, daß ein Fahrer in bezug auf seinen Vordermann in einem Bereich kleiner Geschwindigkeitsdifferenzen und innerhalb

gewisser Abstandsschranken fährt (diese Abstandsschranken kennzeichnen den minimalen bzw. maximalen gewünschten Folgeabstand). In diesem Zustand werden keine bewußten Geschwindigkeitsänderungen vorgenommen; die realisierten Beschleunigungen liegen im Bereich des Rauschens.

Das Annäherungsverhalten beschreibt die Annäherung an einen langsameren Vordermann oder an eine Störung. Der Fahrer versucht, durch Verzögern eine Anpassung seiner Geschwindigkeit an die des Vordermanns vorzunehmen bzw. an einem bestimmten Punkt zum Stehen zu kommen. Die Stärke der Verzögerung ist eine Funktion des Geschwindigkeitsniveaus, der Geschwindigkeitsdifferenz und des Abstands zum Vordermann sowie der Dauer der Annäherung. (Hier wird ein gewisses Lernverhalten insoweit nachgebildet, als die Schätzung der notwendigen Bremsverzögerung im Laufe des Bremsvorgangs genauer wird.)

Das Bremsverhalten kennzeichnet einen Bereich, in dem primär durch Einsatz höherer Bremsverzögerungen versucht wird, eine Kollision mit dem Vordermann zu verhindern. Des weiteren wird aber auch versucht, den unteren gewünschten Folgeabstand wieder zu erreichen, wobei allzu große Beschleunigungsänderungen (Ruck) so weit wie möglich vermieden werden.

Die Schranken zur Abgrenzung der verschiedenen Verhaltensbereiche sind im wesentlichen von psycho-physischen Wahrnehmungsschranken (vgl. WIEDEMANN, 1974) abgeleitet. So repräsentiert z. B. die Reaktions-schranke bei der Annäherung die Schwelle der Erkennbarkeit von Geschwindigkeitsdifferenzen (Abb. 5.5-2).

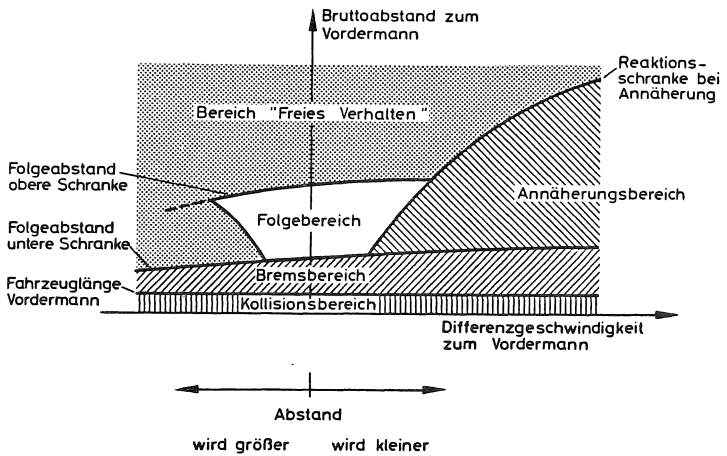


Abb. 5.5-2 Verhaltensbereiche beim Fahrzeugfolgeverhalten

Im vorliegenden Modell des Reaktionsverhaltens wurden insbesondere Vorkehrungen getroffen, um starke Verhaltens- und damit Beschleunigungsänderungen beim Übergang von einem Bereich zu einem anderen zu vermeiden. Dies betrifft im wesentlichen den Übergang vom Folgebereich zum freien Verhalten bzw. umgekehrt. Hier wurde durch regelnde Eingriffe in die Entscheidungsalgorithmen eine gezielte Anpassung der Beschleunigung in den beiden Bereichen realisiert. Außerdem wurde zur besseren Nachbildung von gemeinsamen Beschleunigungsvorgängen aufeinanderfolgender Fahrzeuge der Übergang zwischen den Bereichen "Freies Verhalten" und "Folgen" modifiziert. Damit konnte ein von JABLONSKI (1978) beschriebener Schwachpunkt des bisherigen Interaktionsmodells beseitigt werden.

5.5.2 Spurwechselerverhalten

Im Modell wird das Spurwechselerverhalten durch zwei getrennte Vorgänge nachgebildet: Die Durchführung eines Spurwechsels wird beschlossen, wenn sowohl ein Spurwechselwunsch als auch die Möglichkeit zur Durchführung des Spurwechsels besteht.

Die Verhaltensgrundlagen zur Durchführung werden dabei in Abhängigkeit von der Dringlichkeit des Spurwechsels unterteilt in die Bereiche:

- freier Spurwechsel,
- forciertes Spurwechsel,
- Reißverschlußverhalten.

Ein freier Spurwechsel wird dann durchgeführt, wenn Fahrzeuge auf der Nachbarspur weder behindert noch gefährdet werden. Außerdem darf nach dem Spurwechsel der Sicherheitsabstand des wechselnden Fahrzeugs nicht unterschritten werden.

Beim forcierten Spurwechsel wird in Kauf genommen, daß Fahrzeuge auf der Nachbarspur leicht behindert werden. Es dürfen jedoch keine unteren Schranken für das Sicherheitsbedürfnis verletzt werden. Das spurwechselnde Fahrzeug akzeptiert dagegen zeitweise eine kleine Verletzung seines Sicherheitsabstands, die durch Geschwindigkeitsanpassung innerhalb kurzer Zeit wieder korrigiert werden kann.

Beim Reißverschlußverhalten wird im Gegensatz zum normalen Spurwechsel die aktive Schaffung einer Lücke durch ein benachbartes Fahrzeug gefordert. Dies wird realisiert, indem das spurwechselnde Fahrzeug seinem Nachbarn auf dessen Spur ein fiktives Fahrzeug in kleiner werdendem Abstand vortäuscht (Prinzip "Spiegelweiche"). Erst wenn auf diese Weise die Lücke auf der Nachbarspur groß genug geworden ist, wird der Spurwechsel durchgeführt.

Ein Spurwechselwunsch kann durch unterschiedliche Ursachen ausgelöst werden:

- Beginn einer Verflechtungsstrecke;
- Richtungswunsch, d. h. ein Fahrzeug will eine bestimmte Spur erreichen, um abzubiegen oder gegebenenfalls eine Haltestelle des ÖV anzufahren;
- Behinderung durch Vordermann auf der eigenen Spur;
- vorgeschriebenes Spurwahlverhalten.

Die Auslöseursachen sind dabei nach Prioritäten geordnet. So wird z. B. ein Spurwechselwunsch aufgrund einer Behinderung nur ausgelöst, wenn keine Richtungswünsche vorliegen.

Jeder Ursache sind bestimmte Verhaltensgrundlagen zugeordnet. Diese sind von der Dringlichkeit des Spurwechselwunsches abhängig (Abb. 5.5 - 3).

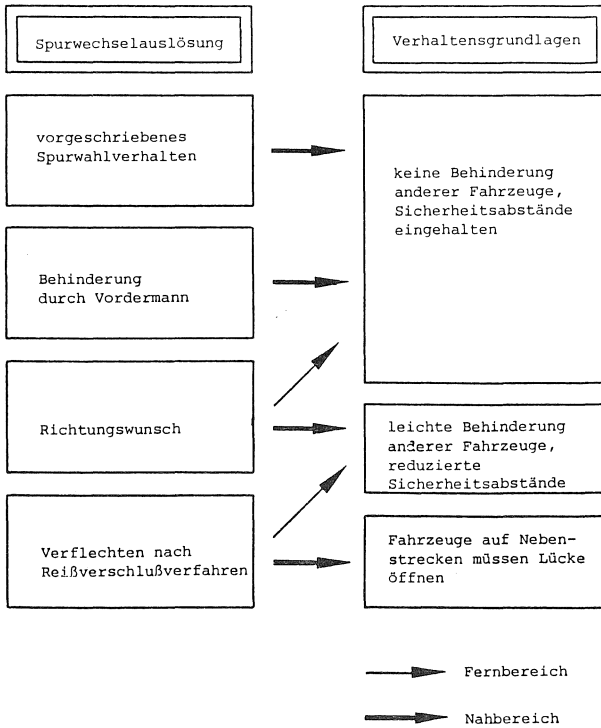


Abb. 5.5-3 Verhaltensgrundlagen beim Spurwechsel

In einer Verflechtungsstrecke, auf der Reißverschlußverhalten vorgeschrieben ist, wird zuerst mit forcier-tem Spurwechsel versucht, ohne aktive Beeinflussung des Nebenmanns die neue Fahrspur zu erreichen. Erst im letzten Abschnitt des Verflechtungsbereichs werden Fahrzeuge der Nachbarspur gezwungen, Lücken zu schaffen und dem Fahrzeug einen Spurwechsel zu ermöglichen.

Bei einem Spurwechselwunsch, der durch eine gewünschte Fahrspur oder Abbiegespur ausgelöst wurde (Richtungs-wunsch), wird zunächst versucht, ohne Behinderung anderer Fahrzeuge durch freien Spurwechsel die gewünschte Spur zu erreichen. Im letzten Abschnitt des zulässigen Spurwechselbereichs wird dagegen mit reduzierten Sicherheitsschranken ein forcierter Spurwechsel versucht.

Bei einer Behinderung durch den Vordermann oder beim Erkennen einer Störung auf der eigenen Spur und nicht gestörten Nachbarspuren wird ein freier Spurwechsel versucht.

Bei einem vorgeschriebenen Spurwahlverhalten wie z. B. dem Rechtsfahrgebot auf Richtungsfahrbahnen, wird in jedem Zeitintervall die Zulässigkeit der gewählten Fahrspur unter den herrschenden Verkehrsbedingungen geprüft. Dabei werden alle umgebenden Fahrzeuge (z. B. auch ein mit hoher Geschwindigkeit näherkommender Hintermann) berücksichtigt. Es werden ausschließlich freie Spurwechsel versucht.

5.6 Lokale Detektoren

In Systemen zur Verkehrssteuerung werden zur Erfassung von Daten über den Verkehrsablauf ausschließlich ortsfeste Detektoren verwendet, die die Überfahung von Fahrbahnquerschnitten bzw. die Belegung von Streckenabschnitten registrieren.

Im Simulationsmodell werden alle Arten von Detektoren realitätsgetreu nachgebildet. Die einzige, unwesentliche Vereinfachung besteht darin, daß die Erfassung von Daten, d.h. die Durchführung von Messungen, nur zu festen, vorgegebenen Zeitpunkten erfolgt (Die genauen Überfahrungszeitpunkte des Meßquerschnitts bzw. die Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt der Überfahung werden durch Interpolation gewonnen). Die Meßzeitpunkte sind mit den Aktivierungszeiten des jeweiligen Steuerungsmodells synchronisiert, so daß dieses immer den aktuellen Datenstand verfügbar hat.

Es sind folgende Detektortypen realisiert:

- Anforderungsdetektor:

Beim Überfahren des Querschnitts wird für die Signalsteuerung eine Kennung (Flag) gesetzt. Dies entspricht in der Realität dem Überfahren eines Anforderungskontaktes.

- Zähl-detektor:

Der Zähl-detektor addiert in einem Datenfeld

alle Fahrzeuge, die den definierten Querschnitt überfahren.

- Zähl-/Geschwindigkeitsdetektor:

Zusätzlich zur Zählung der Überfahrten werden die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge in einem Datenfeld aufsummiert. Die Signalsteuerung erhält durch einfache Division die mittlere Geschwindigkeit für ein erfaßtes Kollektiv bzw. bei Abfragen in jedem Zeittakt auch die Geschwindigkeit jedes einzelnen Fahrzeugs (Folgezeitlücken ≥ 1 Sekunde vorausgesetzt).

- Zähl-/Belegdetektor:

Zusätzlich zur Zählung der Überfahrten werden die Belegzeiten berechnet und in einem Datenfeld aufsummiert. Zur Berechnung dieser Zeiten wird eine fiktive Detektorlänge verwendet, wie sie z. B. bei Lichtschranken gegeben ist.

- Zeitlückendetektor:

Zur Nachbildung eines Zeitlückendetektors wird jeweils die Überfahrt des letzten Fahrzeugs in absoluter Zeit (Simulationszeit) sowie die Brutto-Zeitlücke vor diesem letzten erfaßten Fahrzeug gespeichert und an die Signalsteuerung übergeben. Die Werte bleiben im Datenfeld erhalten, bis sie beim Erfassen des nächsten Fahrzeugs aktualisiert werden.

Die Erfassungsprozeduren addieren bei Zähl-, Geschwindigkeits- und Belegungsdetektoren nur jeweils Werte in den zugeordneten Feldern auf. Beim Anforderungsdetektor und beim Zeitlückendetektor werden die Anforderungskennung bzw. das neue Wertepaar Überfahrungszeit/Zeitlücke in die Datenfelder geschrieben, wobei evtl. von der Signalsteuerung noch nicht verarbeitete Werte überschrieben werden. Das Signalsteuerungsmodell kann völlig unabhängig die Werte abfragen und/oder zurücksetzen. Dies ermöglicht einerseits bei genügend kleinen Abfrageintervallen die Erfassung der Geschwindigkeit einzelner Fahrzeuge, andererseits können so auch Summenwerte für längere Intervalle abgefragt oder Anforderungen gespeichert werden.

Die Lage der Detektorquerschnitte wird jeweils relativ zum Anfang eines Streckenbausteins eingegeben. Es ist möglich, Detektoren auf die Erfassung einer bestimmten Fahrzeugart zu spezifizieren.

Die zu erfassende Spur innerhalb eines Querschnitts muß angegeben werden. Sollen die Daten aller Spuren erfaßt und in dem gleichen Datenfeld abgespeichert werden, so müssen diese Detektoren die gleiche Identifikationsnummer haben (Dies ist bei Zeitlückendetektoren nicht sinnvoll). In der Signalsteuerung müssen die Detektoren mit denselben Identifikationsnummern wie im Modell "Verkehrsablauf" vereinbart werden. Die Vollständigkeit und Identität der Nummern wird bei der Initialisierung der Meßblöcke überprüft.

Die Einbindung der Detektorblöcke in das Gesamtmodell geschieht auf die gleiche Art wie bei den Entscheidungsquerschnitten: Die Meßblöcke beziehen sich auf Referenzfahrzeuge in den Fahrzeugketten. Bei jeder Überfahung des zugeordneten Meßquerschnitts wird die Datenerfassungsprozedur des Meßblocks aktiviert.

5.7 Haltestellen und Linien für den Öffentlichen Verkehr

Die Nachbildung des Bewegungsablaufs von Öffentlichen Verkehrsmitteln erfordert die Möglichkeit zur Definition von Haltestellen. Die Fahrzeuge müssen diese Haltestellen anfahren und definierte Fahrgastwechselzeiten (Aufenthalt an Haltestellen) einhalten. Diese Zeiten werden vom ÖV-Steuerungsmodell übergeben.

Eine Standardhaltestelle hat im Normalfall genau einen Halteplatz, an dem Fahrgastwechsel möglich ist. Fahren mehrere Fahrzeuge kurz nacheinander eine Haltestelle an, so muß jedes Fahrzeug warten, bis sein Vorgänger diesen Halteplatz geräumt hat und es selbst in diesen einfahren kann. Erst dann wird die Haltestellenankunft beim ÖV-Leitsystem angemeldet, und erst dann beginnt die Fahrgastwechselzeit.

Es ist möglich, an einer Haltestelle auch mehrere Halteplätze vorzugeben. In diesem Fall wird im Simulationsmodell unterschieden, ob die Haltestelle für Straßenbahn oder Bus definiert ist: Im Fall "Stras-

senbahn" muß ein Fahrzeug aus zweiter oder dritter Position auch bei kurzer Fahrgastwechselzeit warten, bis seine Vorgängerfahrzeuge die Halteplätze geräumt haben; ein Bus dagegen kann im Modell abfahren, wenn seine Fahrgastwechselzeit beendet und ein Wiedereinflexten in den Verkehrsstrom möglich ist.

Zur Vorbereitung der Anfahrt einer Haltestelle kann ein "Anmeldeabstand" angegeben werden. Dieser bestimmt, wann z. B. ein Bus im Hinblick auf die Haltestellenanfahrt mit zielgerichteten Spurwechseln beginnt.

Jedes ÖV-Fahrzeug hält an einer Haltestelle, wenn diese als Ziel von der ÖV-Steuerung vorgegeben wurde. Der Haltepunkt (Vorderkante Fahrzeug) liegt auf der ersten Halteposition bei der Haltestellenkoordinate, bei weiteren Halteplätzen jeweils hinter dem Vordermann.

Im ÖV sind darüber hinaus Linien in Form aufeinanderfolgender Haltestellen gegeben. Diese werden im Modell als logische Verknüpfung der Haltestellen definiert, wobei die Reihenfolge der Nennung der Haltestellen die Haltestellenfolge innerhalb einer Linie angibt. Jede Haltestelle kann in beliebig vielen Linien enthalten sein und von Fahrzeugen dieser Linien angefahren werden.

Jede Linie als Haltestellenfolge muß durch zwei organisatorisch erforderliche Sonderhaltestellen begrenzt werden. Hierzu sind neben der "Standardhaltestelle" die Haltestellentypen "Inputhaltestelle" und "Output-

haltestelle" verfügbar. Diese speziellen Haltestellen dienen zum Generieren neuer ÖV-Fahrzeuge und zur Aufnahme in die spezielle ÖV-Fahrzeugverwaltung bzw. zur Abmeldung der ÖV-Fahrzeuge bei der Fahrzeugverwaltung. Input- bzw. Outputhaltestellen werden von den Fahrzeugen fliegend durchfahren (kein Halt, keine Aufenthaltszeit). Im übrigen können ÖV-Fahrzeuge auch an jeder anderen Haltestelle erzeugt und eingesetzt werden - die Fahrzeuggenerierungsprozeduren im Modell übernehmen die verkehrsgerechte Eingliederung der Fahrzeuge in den Verkehrsablauf.

5.8 Ortung von ÖV-Fahrzeugen

Ein ÖV-Betriebsleitsystem hat u.a. die Möglichkeit, die Positionen aller ÖV-Fahrzeuge zu beliebigen Zeitpunkten abzufragen. Zur Nachbildung dieser Fahrzeugortung im Modell werden die Positionen aller ÖV-Fahrzeuge kontinuierlich festgestellt. Die Positionen werden zusammen mit der Fahrzeugidentifikationsnummer als Abstand von der letzten angefahrenen Haltestelle über die Schnittstelle an das ÖV-System übergeben. Dieses kann, um unterschiedliche Ortungsintervalle und Ortungszeitpunkte nachzubilden, die Informationen gezielt nur zu bestimmten Zeitpunkten auswerten.

Zur Nachbildung unterschiedlicher Ortungsverfahren kann der Abstand zur letzten angefahrenen Haltestelle entweder auf die Haltestellenkoordinate (Lage der Haltelinie des ersten Halteplatzes) oder auf die jeweils realisierte Halteposition bezogen werden. Letztere kann von der Haltestellenkoordinate abweichen, wenn die erste Halteposition nicht exakt eingehalten wurde oder wenn der Fahrgastwechsel am zweiten oder einem weiteren Halteplatz einer Mehrfachhaltestelle vorgenommen wurde. Diese Variante ist insbesondere für die Nachbildung der sogenannten "logischen Ortung" von Fahrzeugen relevant, wo der Vergleich zwischen Soll- und Ist-Standorten vom Betriebsleitreechner auf der Basis von Haltestellenanfahrten vorgenommen wird.

Die Positionsangabe wird während einer Fahrgastwechselzeit jeweils noch auf dem alten Wert (Bezug auf die vorletzte Haltestelle) beibehalten. Bei Freigabe des Fahrzeugs (Abfahrtsbefehl) wird die Positionsangabe auf den neuen gültigen Wert gesetzt (Bezug auf letzte Haltestelle).

5.9 Datenerfassung während der Simulation

Das bisher vorgestellte Modell des Verkehrsablaufs erlaubt in Zusammenarbeit mit Modellen der Signalsteuerung und/oder eines ÖV-Leitsystems die Nachbildung geschlossener Regelkreisläufe. Die Datenerfassung dient im Modell als "Beobachter" dieser Abläufe. Dabei können alle sinnvoll auswertbaren Daten zu den einzelnen Vorgängen aufgezeichnet werden.

Die kontinuierliche Datenaufzeichnung umfaßt folgende Bereiche:

- Fahrzeugeinfahrt in das System und Fahrzeugausfahrt aus dem Simulationsbereich:
Für jedes erzeugte Fahrzeug werden Zeitpunkt und Ort der Einfahrt in das System sowie fahrzeugspezifische Parameter zur Geschwindigkeitswahl und zur Beschleunigungsfähigkeit (Höchstgeschwindigkeit bei Pkw bzw. spezifische Leistung bei Lkw) gespeichert. Bei der Fahrzeugausfahrt aus dem System werden Ort und Zeit notiert.

- Fahrtverlauf: Zu jedem Zeitschritt werden für alle Fahrzeuge die räumlichen Positionen innerhalb des simulierten Netzausschnitts, die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Beschleunigung im letzten Zeitintervall notiert. Dies ist die genaueste verfügbare Information über den Modellzustand.

- Störungen: Alle Spurblockaden, die durch Lichtsignalanlagen verursacht werden, werden mit ihren jeweiligen Änderungszeitpunkten notiert.

- Messungen: Parallel zu den Detektoren, die Daten an das Signalsteuerungsmodell übergeben, können Querschnittsmessungen definiert werden, die jede Überfahrt eines Fahrzeugs auf Hintergrundspeicher notieren. Dabei werden die Fahrzeugnummern, die Überfahrtszeitpunkte sowie die momentane Geschwindigkeit und Beschleunigung erfaßt. Diese Daten können insbesondere zur Gewinnung eines schnellen Überblicks über den Simulationsablauf verwendet werden, ohne daß eine Auswertung der sehr umfangreichen Daten zum genauen Fahrtverlauf erforderlich ist.

Nachteilig bei dem realisierten Erfassungskonzept ist, daß bei langen Simulationsläufen sehr große Datenmengen anfallen und daß sofort nach Beendigung der Simulation keine statistischen Daten über die einzelnen Vorgänge verfügbar sind. Allerdings sind dahingehende Erweiterungen des Programmsystems leicht möglich, wobei höherer Speicher- und Rechenzeitaufwand in Kauf genommen werden muß. Auf die Aufzeichnung der Ablaufdaten kann jedoch in keinem Fall verzichtet werden, wenn - wie üblich - umfangreiche, mehrfache Auswertungen der Simulationsergebnisse z.B. im Hinblick auf Lärmemission oder Kraftstoffverbrauch durchgeführt werden sollen.

6. Beispiele zur Nachbildung von Netzausschnitten

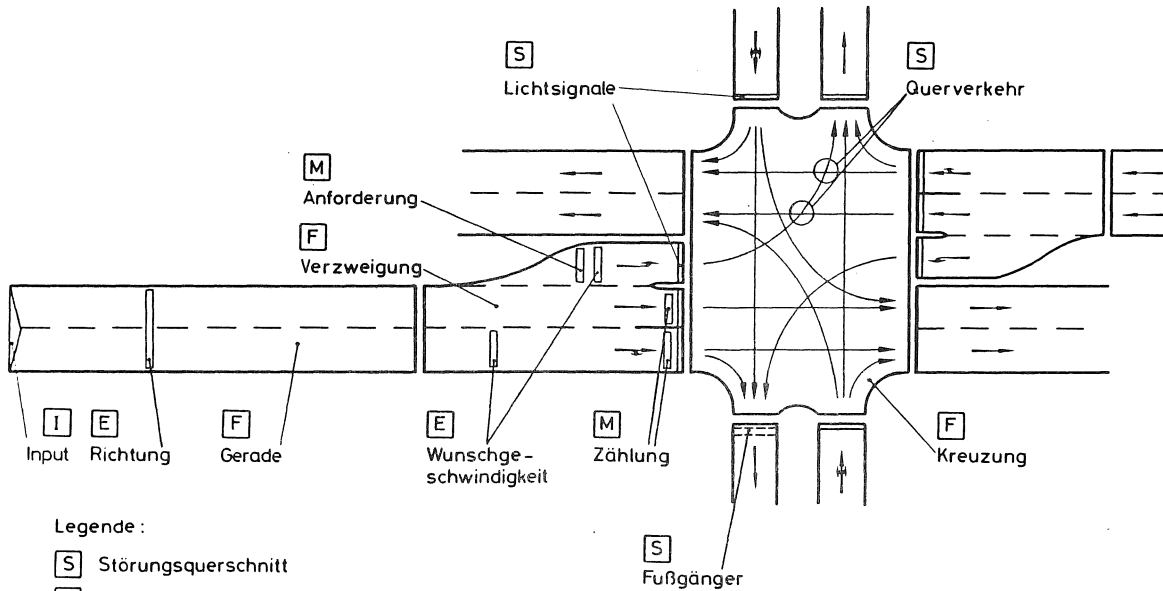
Die Anwendung der Modellbereiche zur Nachbildung von Netzausschnitten wird an einigen Beispielen erläutert. Diese sollen insbesondere die Beschreibungsmöglichkeiten des Simulationsmodells wiedergeben; es wird nicht auf die einzelnen nachgebildeten Verkehrsabläufe oder Steuerungsverfahren eingegangen.

Die Modellierung eines einfachen Knotenpunkts verdeutlicht Abb. 6-1. Zur besseren Übersicht ist dabei jeweils nur exemplarisch die Anwendung der einzelnen Beschreibungsblöcke wiedergegeben.

Die topologische Umgebung wird durch Funktionsblöcke beschrieben. Angeschlossen an einen Kreuzungsblock sind Geraden und Verzweigungen. Innerhalb der Kreuzung sind Hauptspuren (gerade Pfeile) und Übergangsspuren (gekrümmte Pfeile) zu unterscheiden.

Entscheidungsblöcke sind erforderlich im Bereich vor einer Verzweigungsmöglichkeit (Richtungsentscheidung in der Zufahrt von links) sowie zur Reduzierung der Wunschgeschwindigkeit für abbiegende Fahrzeuge (Wunschgeschwindigkeitsentscheidung im Verzweigungsblock links - der Entscheidungsblock auf der in Fahrtrichtung rechten Spur soll lediglich Fahrzeuge erfassen, die einen Abbiegewunsch nach rechts gesetzt haben).

An den Schnittstellen des simulierten Netzausschnitts werden Inputblöcke definiert, die die Einfahrt von Fahrzeugen in das System nachbilden (Inputquerschnitt in der Zufahrt von links).



Legende :

- [S] Störungsquerschnitt
- [M] Meßquerschnitt
- [E] Entscheidungsquerschnitt
- [F] Funktionsblock
- [I] Inputblock

Abb. 6-1 Beschreibung eines einfachen Knotenpunkts im Modell MISSION

Störungsblöcke dienen zur Nachbildung von Behinderungen der Verkehrsströme. An den Kreuzungszufahrten sind Lichtsignalstörungen, in der Ausfahrt nach unten eine Fußgängerstörung und im Kreuzungsbereich Störungen durch Querverkehr beschrieben (letztere sind nur erforderlich, wenn die Signalsteuerung den Linksabbiegerstrom gemeinsam mit dem geradeausfahrenden Gegenverkehr freigibt).

Schließlich sind Detektoren für die Signalsteuerung (Meßblöcke) dargestellt: In der Zufahrt von links befinden sich Zähldetektoren für den geradeausfahrenden Verkehr und ein Anforderungsdetektor für Linksabbieger.

Die Anwendung insbesondere der Funktionsblöcke zur Umgebungsbeschreibung an einem komplexeren Knotenpunkt zeigt Abb. 6-2. Hier sind die Funktionseinheiten innerhalb der Kreuzungsbausteine (Hauptspuren und Übergangsspuren) so wiedergegeben, wie sie im Simulationsmodell beschrieben werden.

Es wird ein Knotenpunkt nachgebildet, der aus zwei benachbarten Einmündungen besteht. In der Hauptrichtung stehen für den Individualverkehr jeweils zwei Richtungsfahrbahnen zu Verfügung. In der Zufahrt auf der rechten Seite liegt die Straßenbahntrasse in der Fahrbahn des IV. Im Kreuzungsbereich wird sie in Mittellage auf eigenem Gleiskörper geführt.

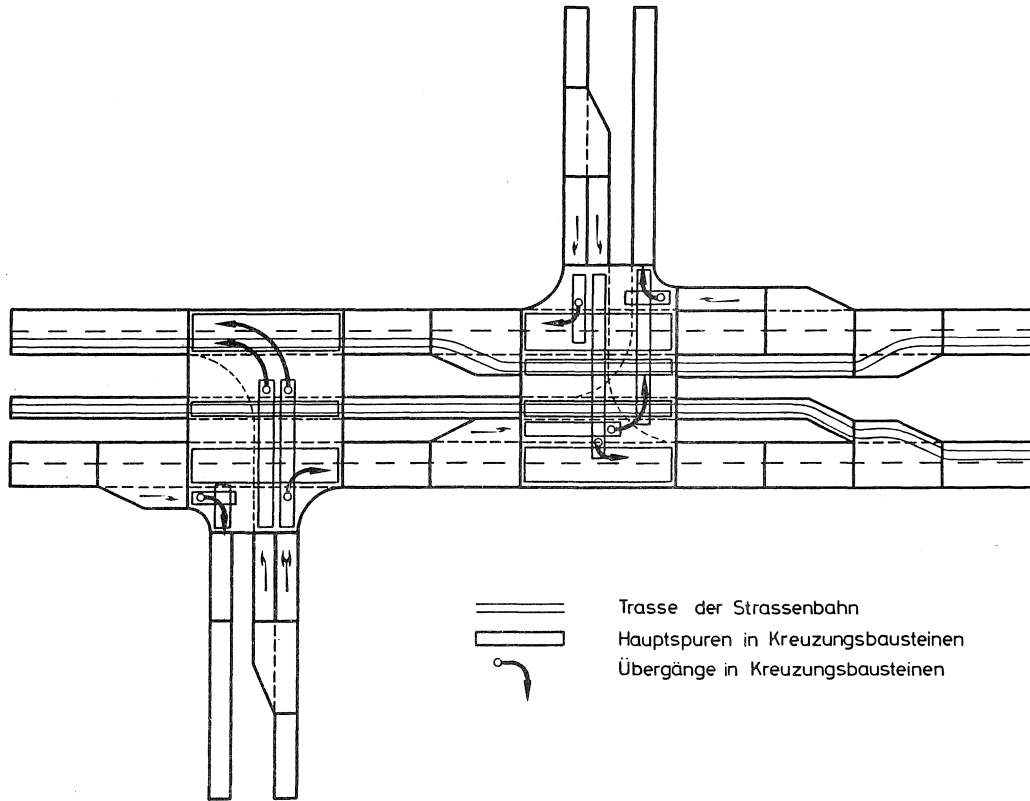


Abb. 6-2 Strukturblöcke für komplexen Knotenpunkt
(nicht maßstäblich)

Zur Beschreibung des Verkehrsablaufs im Bereich dieses Knotenpunktes sind 30 einfache Funktionsblöcke und zwei Kreuzungsbausteine mit sieben bzw. neun Hauptspuren und jeweils vier Übergangsspuren erforderlich. Zur Beschreibung der unterschiedlichen Abbiegemöglichkeiten werden ca. zehn Richtungsentscheidungen verwendet. Darüberhinaus sind zur Berücksichtigung der Lichtsignalanlagen und Fußgängerfurten im Bereich des Knotenpunktes ca. 20 Störungsblöcke notwendig.

Die Nachbildung eines größeren Streckenabschnitts mit mehreren Knoten zeigt Abb. 6.3 (Abschnitt einer Ausfallstraße in Bremen). Hier wurde der Zeitbedarf von Fahrzeugen des IV und ÖV über mehrere Knotenpunkte hinweg

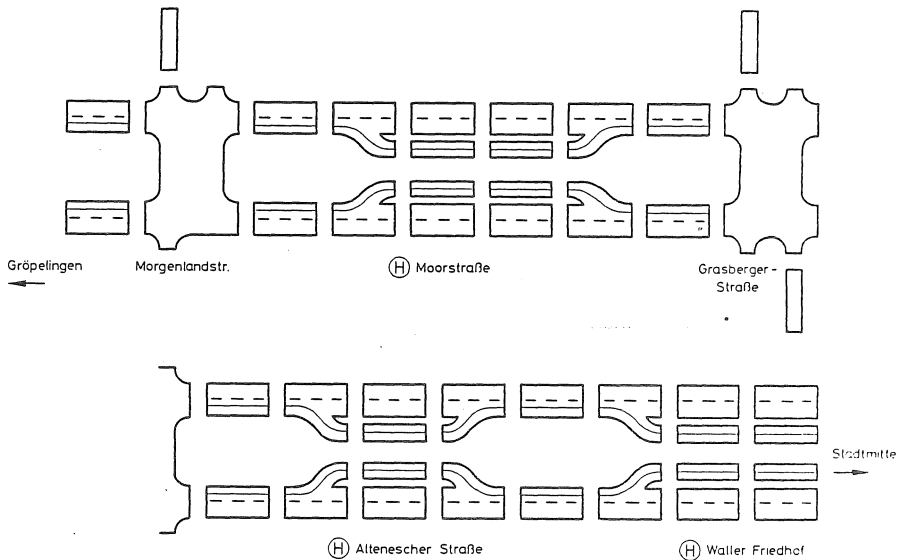


Abb. 6-3 Strukturblöcke für einen Streckenabschnitt mit mehreren Knotenpunkten (nicht maßstäblich)

untersucht (HUBSCHNEIDER et. al, 1981). Es wurden deshalb nur stark belastete Knotenpunkte detailliert nachgebildet, während schwach belastete Zufahrten im Bereich der Haltestellen "Moorstraße" und "Waller Fiedhof" nicht explizit in Form von Knotenpunkten nachgebildet wurden.

7. Programmierung des Simulationsmodells - Überblick

Die Programmierung des Simulationsmodells erfolgte unter den Randbedingungen eines übersichtlichen Aufbaus mit möglichst weitgehender Entkoppelung und Standardisierung der einzelnen Bearbeitungsprozeduren. Die folgenden Abschnitte gehen auf die Grundstrukturen des Simulationsystems und die wesentlichen Ablaufstrukturen ein.

7.1 Programmiersprache

Der Beschreibung der realisierten Modellstrukturen soll eine kurze Erläuterung der Eigenschaften und Möglichkeiten der ausgewählten Programmiersprache vorausgehen. Diese erleichtert das Verständnis der komplexen Simulationsstruktur.

7.1.1 Auswahl der Programmiersprache

Die Auswahl der Programmiersprache für die Realisierung des Simulationsmodells wurde von zwei Gesichtspunkten beeinflusst:

Einerseits erfordert das Modell die Möglichkeit zum Aufbau komplizierter Strukturen und zur Verwaltung unterschiedlich großer Datenbestände (der Umfang dieser Daten hängt von der Komplexität des nachgebildeten Netzausschnitts ab); andererseits wurden an das Programmsystem hohe Anforderungen bezüglich Portabilität, komfortable Handhabung und Sicherheit gegen Fehlbedienung gestellt. Darüber hinaus soll die Programmiersprache bestmögliche Unterstützung bei Programmentwicklung und -test bieten.

Die spezialisierten Simulationssprachen wie SIMSCRIPT, GPSS o.ä. sind für die vorliegende Anwendung ungeeignet, da diese keine sinnvollen Möglichkeiten zur Beschreibung komplexer Datenstrukturen bieten und die Simulationsstrukturen den Aufwand einer Simulationssprache nicht rechtfertigen.

Sinnvoll verwendbar waren damit nur höhere Programmiersprachen, die den Anforderungen im Hinblick auf den Aufbau dynamischer Datenstrukturen und auf Entwicklungskomfort genügen. Dies ist z. B. gegeben bei der Sprache PASCAL, die jedoch im Hinblick auf Portabilität die gestellten Ansprüche (noch) nicht befriedigen kann. Außerdem ist die Verwaltung dynamischer Strukturen nicht im Laufzeitsystem der Sprache enthalten, sondern muß vom Benutzer selbst durchgeführt werden.

Alle oben gestellten Anforderungen erfüllt jedoch die Sprache SIMULA 67, die insbesondere mit dem Klassenkonzept ein sehr mächtiges Strukturierungswerkzeug zur Verfügung stellt. Nachteilig bei SIMULA ist allerdings, daß der hohe Sprachkomfort entsprechend längere Rechenzeiten bedingt, und daß SIMULA-Compiler zur Zeit nur auf Großrechenanlagen verfügbar sind. Beide Einschränkungen sind jedoch vor dem Hintergrund der schnellen Weiterentwicklung der Rechnerhardware insbesondere im Hinblick auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit keine Ausschlußkriterien.

7.1.2 Eigenschaften der Programmiersprache SIMULA 67

SIMULA wurde in den Jahren 1965 - 1967 von O. J. DAHL, B. MYHRHAUG und K. NYGAARD am Norwegian Computing Center in Oslo, Norwegen, entwickelt. SIMULA ist auf allen grossen Rechenanlagen verfügbar; in den letzten Jahren wurden außerdem Übersetzer für große Prozessrechner (Data General, Digital Equipment Corporation) entwickelt. Gemeinsame Grundlage aller Implementierungen ist der Bericht "SIMULA, Common Base Language" (DAHL et al., 1967), der die weitgehende Kompatibilität der verschiedenen Implementierungen gewährleistet.

SIMULA ist im wesentlichen eine Obermenge der bekannteren Sprache ALGOL. Erweiterungen in SIMULA sind insbesondere Möglichkeiten zur Definition komplexer Datenstrukturen, zur Textverarbeitung und Ablaufkontrolle. Darüber hinaus sind im Sprachumfang sehr komfortable Prozeduren zum Zugriff auf Dateien und zur Definition und Bearbeitung von Listenstrukturen und Simulationsprozessen enthalten.

Das zentrale Konzept der Sprache SIMULA ist die Möglichkeit, Daten und zugeordnete Prozeduren zu Blöcken zusammenzufassen (Verbunde). Diese Blöcke werden in SIMULA "Klassen" genannt. Sie unterliegen einer SIMULA-spezifischen, dynamischen Speicherverwaltung; es können während des Programmablaufs Kopien von Klassen erstellt und auch wieder vernichtet werden. Auf diese Weise können relativ einfach, unter Verwendung von Verweisen von einer Klasse auf eine andere, komplexe, dynamische Listenstrukturen verwaltet werden.

Als Beispiel für den Aufbau einer Klasse und der Erzeugung von Listenstrukturen soll das Konzept der in der Simulation verwendeten Klasse "FAHRZEUG" dargestellt werden (Abb. 7.1-1). Eine Klasse besteht aus Vereinbarungsteil und Klassenrumpf. Der Vereinbarungsteil enthält Deklarationen von Parametern und Prozeduren, die in der Klasse zusammengefaßt werden. Der Klassenrumpf (Anweisungsteil) wird bei der Erzeugung einer Klasse ausgeführt.

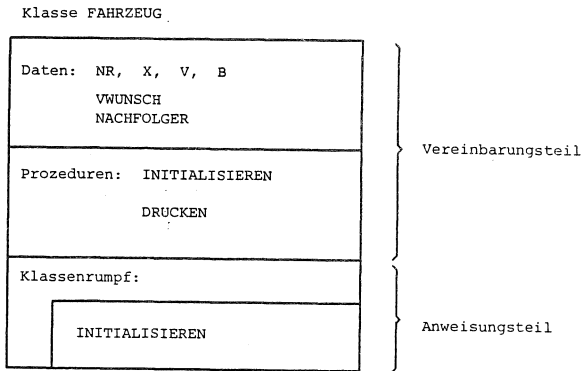


Abb. 7.1-1 Prinzipieller Aufbau der Klasse FAHRZEUG

Im Beispiel sind in der Klasse FAHRZEUG Parameter wie Fahrzeugnummer, Wunschgeschwindigkeit, aktuelle Koordinate, Geschwindigkeit und Beschleunigung vereinbart. Darüber hinaus enthält die Klasse Verweise auf andere Fahrzeuge (z.B. Zeiger NACHFOLGER für das nächste Fahrzeug in der Spur). Außerdem existieren Prozeduren zur Initialisierung von Parametern (Fahrzeugnummer, Wunschgeschwindigkeit) und zum Ausdrucken der Parameter. Bei der Erzeugung eines neuen Fahrzeugs wird der Speicherplatz für die Parameter des Vereinbarungsteils reserviert. Außerdem wird der Klassenrumpf bei der Erzeugung der Klasse ausgeführt; das bedeutet in diesem Fall, daß die Fahrzeugparameter automatisch initialisiert werden. Die Prozedur DRUCKEN kann verwendet werden, um die Fahrzeugdaten auszugeben.

Die Verkettung solcher Datenverbunde kann durch Zeiger auf einen anderen Verbund erreicht werden. Im Beispiel dient der Zeiger NACHFOLGER zum Aufbau von Fahrzeugketten, die im Modell jeweils einer durchgehenden Spur entsprechen (Abb. 7.1-2).

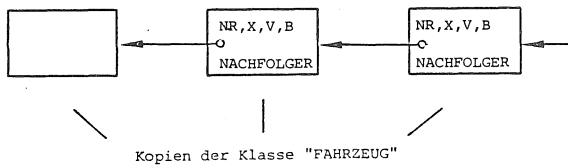


Abb. 7.1-2 Verkettung von Fahrzeugen

Das Klassenkonzept kann des weiteren verwendet werden, um sogenannte Programmumgebungen zu definieren. Diese Konstruktion der "Präfix-Klassen" ermöglicht es, hierarchische Strukturen aufzubauen, in denen eine Klasse jeweils direkten Zugriff auf die Parameter und Prozeduren aller vorgeschalteten (Ober-) Klassen hat. Mit Hilfe dieser Konstruktion sind z. B. Klassen mit allgemeinen Dateizugriffs- und Formatierungsprozeduren (Klasse EIN-AUSGABE) und Zufallszahlengeneratoren (Klasse ZUFALL) bzw. grundlegenden Datenstrukturen (Klasse FAHRZEUGE und STRUKTUR) für alle weiteren Programmmodule zugänglich (siehe Kapitel 8). Zudem bieten die Präfix-Klassen den Vorteil, daß sie als getrennte (externe) Module übersetzt und getestet werden können, so daß die Programmentwicklung einfacher und schneller wird.

7.2 Organisationsstrukturen des Simulationsmodells

Das Modell MISSION zur Simulation des Verkehrsablaufs kann mittels einer an Ebenen orientierten Strukturdarstellung beschrieben werden. Diese Ebenen tragen jeweils eigene Organisationsstrukturen, die weiter unten beschrieben werden. Zugriffe von einer Ebene auf eine andere sind immer nur von einer höheren auf eine tiefere Ebene zulässig, wobei im allgemeinen lediglich Daten und Prozeduren der nächsttieferen Ebene angesprochen werden. Diese Struktur enthält im einzelnen (Abb. 7.2-1):

- Schicht 4: Organisationsebene
- Schicht 3: Aktionsebene
- Schicht 2: Kommunikationsebene
- Schicht 1: Datenebene

1. Datenebene:

Die unterste Ebene (aus logischer Sicht) enthält alle Daten Datenblöcke der kleinsten Einheiten im System wie z. B. Fahrzeuge, Störungstabellen oder Meßdaten. Die Datenblöcke können untereinander verkettet sein (Fahrzeuge) oder werden in Datenfeldern (Störungstabellen, Detektorpuffer) gespeichert.

Zugriffe auf die Datenblöcke erfolgen bei den Fahrzeugen entweder indirekt über Verweise auf das erste Element einer Kette (Listenkopf) oder durch direkten Bezug auf einen Fahrzeugblock, während einzelne Datenelemente in Feldern über den Index erreichbar sind.

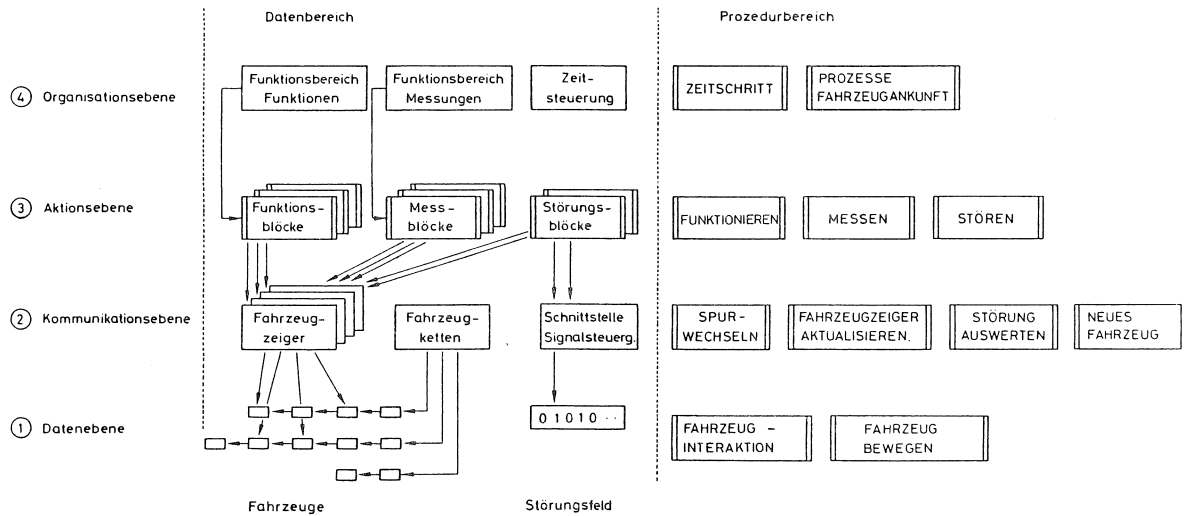


Abb. 7.2-1: Allgemeine Organisationsstruktur des Modells MISSION

Alle Fahrzeugdatenblöcke sind untereinander verkettet. Jede Kette entspricht einer durchgehenden Spur innerhalb des simulierten Netzausschnitts, wobei jedes Fahrzeug einen Verweis auf seinen Nachfolger (Hintermann) trägt - die Verkettung läuft also entgegen der Fahrtrichtung (Abb. 7.2-2).

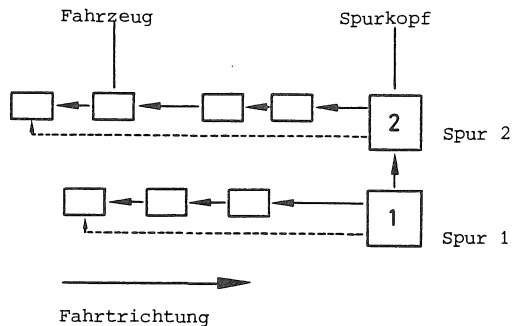


Abb. 7.2-2: Fahrzeugverkettung

Prozeduren auf der Datenebene handhaben jeweils nur eine Fahrzeugeinheit. Sie greifen nicht in Verkettungen ein. Prozeduren dieser Art treffen z.B. die Entscheidung über das Fahrverhalten eines Fahrzeugs oder aktualisieren eine Fahrzeugposition.

2. Kommunikationsebene:

Auf der Kommunikationsebene sind alle Verwaltungstätigkeiten zur Handhabung von Fahrzeugblöcken, zur Aktuali-

sierung von Verweisen oder für Schnittstellenfunktionen logisch zusammengefaßt.

Auf der Kommunikationsebene geführte Daten betreffen die Organisation der Fahrzeugketten bzw. die Vereinfachung von Zugriffen auf einzelne Fahrzeuge. So gibt es für jede Spurkette einen Datenblock "Spurkopf", der Informationen über die Nummer der Spur, ihre Anfangs- und Endkoordinaten sowie das erste und letzte Fahrzeug dieser Spur enthält. Alle Spurköpfe sind wiederum untereinander verkettet. Über diese Spurkopfliste sind alle im System bekannten Fahrzeuge erreichbar (Abb. 7.2-2).

Die Fahrzeugzeiger sind Datenelemente, die einen Verweis auf ein Fahrzeug tragen. Sie werden insbesondere eingesetzt, um von verschiedenen Blöcken der Aktionsebene auf dasselbe Fahrzeug zugreifen zu können (Abb. 7.2-3).

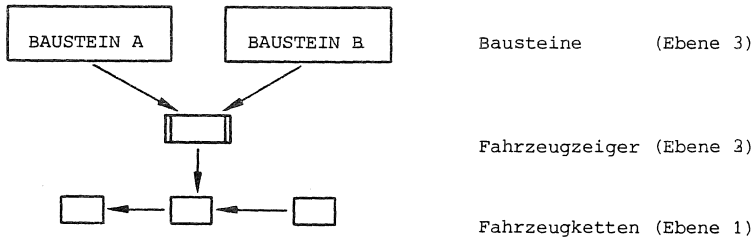


Abb. 7.2-3: Datenelement "Fahrzeugzeiger"

Prozeduren der Kommunikationsebene handhaben insbesondere alle Verweise zwischen Fahrzeugen. So werden neu erzeugte Fahrzeuge in eine Kette eingegliedert. Außerdem werden spezielle, quasi ortsfeste Verweise auf Fahrzeuge, die für die Nachbildung lokaler Messungen bzw. Entscheidungen erforderlich sind, bei Spurwechseln oder Weiterbewegungen von Fahrzeugen aktualisiert (siehe auch Kapitel 9.3.6).

3. Aktionsebene:

Alle Funktionsbereiche des Simulationsmodells werden durch einzelne Blöcke repräsentiert. Diese Blöcke enthalten jeweils alle notwendigen Daten zur Beschreibung der einzelnen Funktionen und die Prozeduren zur Ausführung dieser in einem Block vorgesehenen Funktionen. So enthält z. B. ein Entscheidungsblock für eine Richtungsentscheidung Informationen über die Lage des Entscheidungsquerschnitts, über das nächste in Frage kommende Fahrzeug sowie die Richtungsanteile der möglichen Fahrspuren für diese Entscheidung. Diese Daten bilden die Parameterumgebung für die blockinterne Prozedur ENTSCHIEDEN, die bei Bedarf für ein Fahrzeug eine Richtungsentscheidung trifft.

Alle gleichartigen Blöcke sind untereinander verkettet und jeweils über einen Listenkopf erreichbar. Für einen Simulationsschritt werden die Bearbeitungsprozeduren jedes Blocks für alle Fahrzeuge im Wirkungsbereich eines Blocks abgearbeitet. Die betroffenen Fahrzeuge sind in einem Block über Verweise auf Fahrzeugzeiger (Kommunikationsebene) oder direkt auf die Fahrzeugklasse bekannt. Alle Zeiger werden bei der Weiterbewegung von Fahrzeugen bei Bedarf aktualisiert (Abb. 7.2-4).

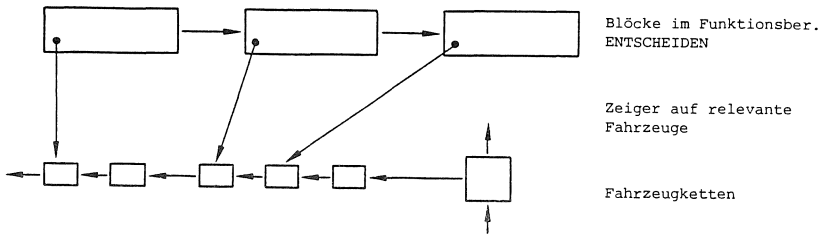


Abb. 7.2-4 Prinzip der Verkettung im Funktionsbereich
ENTSCHEIDEN

4. Organisationsebene:

Der Organisationsebene obliegt neben dem Aufbau aller Strukturen die zeitliche Synchronisation und Überwachung des Ablaufs der Simulation sowie die Abschlußbearbeitung (Abb. 7.2-5).

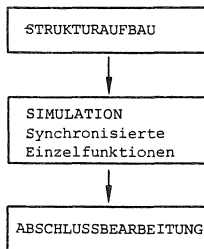


Abb. 7.2-5 Ablaufschema der Organisationsebene

Der Aufbau aller Listenstrukturen erfordert eine umfangreiche Prüfung und Vorverarbeitung der Eingabedaten zur Strukturbeschreibung. Es werden sehr weitgehende Prüfungen auf Konsistenz und Vollständigkeit der Beschreibung vorgenommen. In den aufgebauten Strukturen werden dann in einem Zwischenschritt alle nur zum Aufbau erforderlichen Informationen gelöscht, um während der Simulation mit möglichst wenig Speicher für die Simulationsumgebung auszukommen.

Nach dem Strukturaufbau werden die Prozeduren zur zeitlich synchronisierten Bearbeitung aller Einzelfunktionen gestartet. Diese Zeitsteuerung erfaßt neben der zentralen Fahrzeugbewegung insbesondere die Erzeugung von Fahrzeugen sowie umfangreiche Test- und Kontrollprozeduren zur Verfolgung des Simulationsablaufs (siehe unten).

In der Abschlußbearbeitung werden alle Ausgabedateien abgeschlossen. Außerdem werden auf Wunsch Statistiken über Rechenzeit- und Speicherbedarf ausgegeben.

7.3 Zeitliche Strukturen

Im Simulationsmodell MISSION wird eine gemischte zeitschritt- und ereignisorientierte Simulation des Verkehrsablaufs durchgeführt.

In der zeitschrittorientierten Simulation werden alle Fahrzeuge im System sowie alle Schnittstellenfunktionen in einem festen Zeitraster bearbeitet. Dieses Zeitraster wurde hier für die Fahrzeugbearbeitung und für die Steuerungsmodelle gleich gewählt. Auf ereignisorientierter Basis werden Fahrzeugankünfte an den Systemschnittstellen sowie Anweisungen zum Ein- bzw. Ausschalten von Trace- und Kontrollfunktion verarbeitet (Abb. 7.3-1).

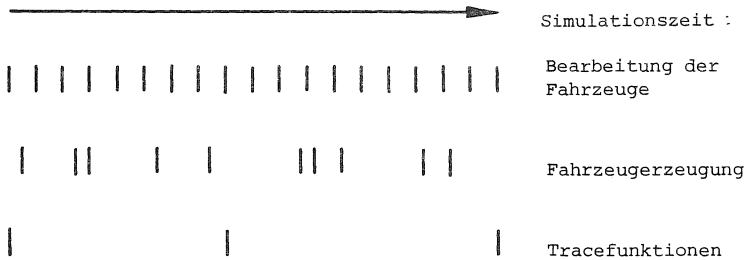


Abb. 7.3-1 Aktivitäten im Simulationsmodell aus zeitlicher Sicht

Die zeitschrittorientierte Simulation des Verkehrsablaufs gründet auf der Annahme, daß für jedes FFE zu jedem Zeitpunkt eine Entscheidung über das Verkehrsverhalten des Elements während des nächsten Zeitschritts (hier: 1 Sekunde) getroffen werden kann. Dabei wird eine für das nächste Zeitintervall gültige Beschleunigung oder Verzögerung sowie bei Bedarf die Einleitung eines Spurwechsels festgelegt (Abb. 7.3-2).

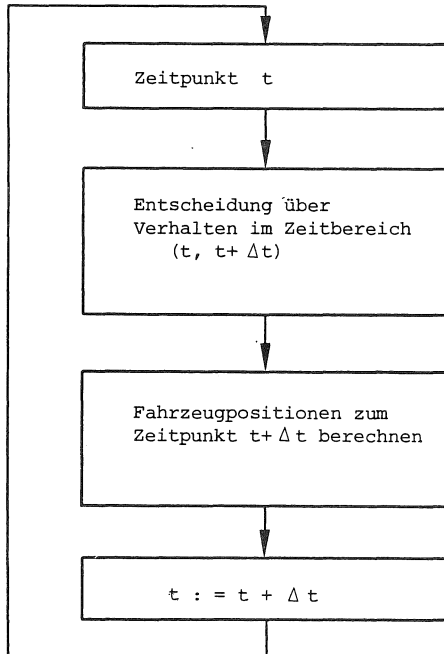


Abb. 7.3-2 Prinzipieller Ablauf der Entscheidungen zum Fahrverhalten

Im Modell MISSION werden neben der eigentlichen Fahrzeugfortbewegung noch Informationen an die Schnittstelle zu den Signalsteuerungs- und ÖPNV-Modellen übergeben bzw. Informationen von dieser Schnittstelle verarbeitet. Zwischen der Übergabe der Daten an die Steuerung und der Entgegennahme neuer Steuerinformationen wird die Simulationszeit nicht fortgeschrieben; es wird davon ausgegangen, daß die Informationsverarbeitung in den Steuerungsmodellen in so kurzer Zeit stattfindet, daß diese nicht explizit berücksichtigt werden muß. Benötigt in der Realität ein Steuerungsverfahren längere Zeit zur Bearbeitung der Informationen, so müssen die Steuerungsmodelle die Daten entsprechend lange speichern.

Im einzelnen werden vor Aufruf der Steuerungsalgorithmen die Daten aller Detektoren auf den neuesten Stand gebracht sowie die Positionen der ÖV-Fahrzeuge erfaßt (Abb. 7.3-3). Die Informationen aus den Steuerungsmodellen werden zum Erteilen von Abfahrtsaufträgen an ÖV-Fahrzeuge und zum Setzen von Lichtsignalstörungen verwendet.

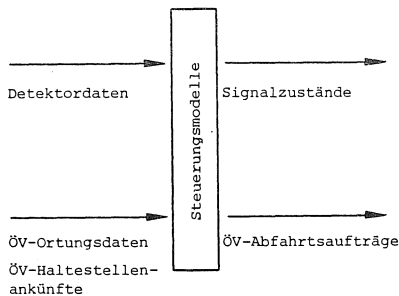


Abb. 7.3-3 Datenaustausch mit Steuerungsmodellen

Die Erzeugung von Fahrzeugen basiert auf der Verteilung der Zeitlücken zwischen jeweils zwei Fahrzeugankünften. Die entsprechenden Ankunftszeitpunkte liegen im allgemeinen nicht im Simulationszeitraster. Sie werden deshalb von der Zeitsteuerung getrennt bearbeitet. Jedes Fahrzeug wird in seine Spurkette mit einem Koordinatenwert eingesetzt, der seiner Position bei der nächsten Zeitschritt-Bearbeitung entspricht. Damit können die neu erzeugten Fahrzeuge direkt in die allgemeine Bearbeitung einbezogen werden.

8. Strukturen des Programmsystems

Die Realisierung des vorgestellten Modells des Verkehrsablaufs in einem Programmsystem erforderte eine Übertragung der Modellstrukturen in geeignete Programmbausteine (Module), die zusammengefaßt die Programme des Systems (Prozessoren) bilden. Dabei waren insbesondere die Vorgaben bezüglich einfacher Handhabbarkeit und Portabilität des Systems zu berücksichtigen.

8.1 Prozessoren

Das System MISSION zur Simulation des Verkehrsablaufs besteht aus mehreren Einzelprogrammen ("Prozessoren"), die neben der Verarbeitung der Eingabedaten das Simulationsmodell VERKEHRSABLAUF mit Schnittstellen zu den Modellen SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM sowie eine große Anzahl von Auswerteprogrammen umfassen. Eine Übersicht gibt Abb. 8.1-1 (es wurden nur einige wichtige Auswerteprogramme aufgeführt).

Der Eingabeprozessor MISS dient zum Lesen und Prüfen der Eingabedaten sowie zum Aufbau der Datenstrukturen ("Strukturlisten"). Es werden umfangreiche syntaktische und semantische Prüfungen der Daten sowie Plausibilitätskontrollen durchgeführt.

Die aufgebauten Strukturen werden in verdichteter Form auf die Datei STRUKTUR ausgegeben. Diese Datei enthält damit die Beschreibung der festen Simulationsumgebung.

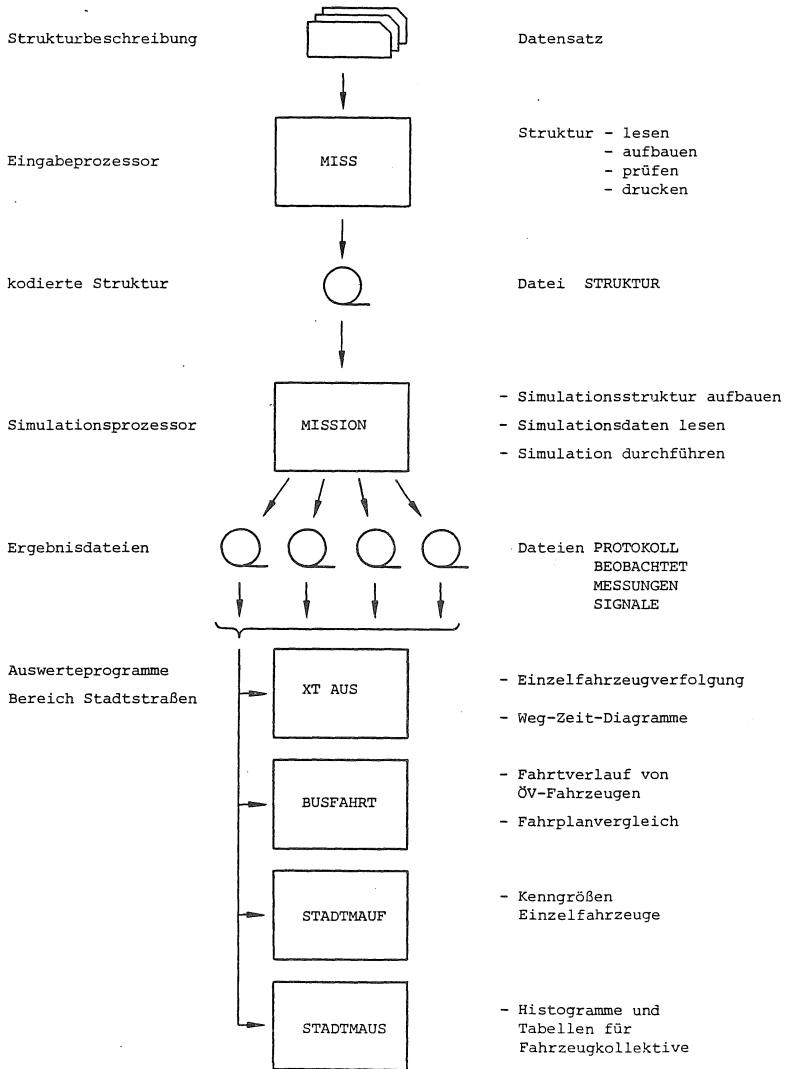


Abb. 8.1-1 Aufbau Simulationssystem MISSION

Zur Durchführung von Simulationsläufen kann dieselbe Strukturdatei mit unterschiedlichen variablen Parametern kombiniert werden. So können z. B. die Simulationsdauer, die Startzufallszahl und alle Daten auf seiten der Steuerungsmodelle variiert werden.

Die Simulation des Verkehrsablaufs findet im Prozessor MISSION statt. Dieser liest eine Strukturdatei, baut alle Strukturlisten und daraus die Simulationsstruktur auf, liest die Steuerdaten für die Simulation und initialisiert die Modelle SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM.

Anschließend wird die Simulation des Verkehrsablaufs und gegebenenfalls der Steuerungsabläufe durchgeführt. Während der Simulation werden die Vorgänge im Modell auf Ausgabedateien protokolliert.

Die Ausgabedaten können im Hinblick auf unterschiedliche Aufgabenstellungen ausgewertet werden. Die vorhandenen Programme dienen insbesondere zur graphischen und tabellarischen Darstellung von Vorgängen bei der Simulation sowie zur Aufbereitung von Kenngrößen des Verkehrsablaufs in verschiedenen Aggregationsstufen.

8.2 Programmumgebungen

Die Sprache SIMULA erlaubt die Definition von sogenannten "Präfix-Klassen", die eine komfortable Möglichkeit zum Aufbau von Programmumgebungen darstellen. Eine solche Präfix-Klasse besteht im allgemeinen aus einer Menge von Variablen und Prozeduren. Diese sind für untergeordnete Blöcke direkt verfügbar (Der Dateizugriff und die Konzepte für Listenverarbeitung und Simulation sind in SIMULA auf die gleiche Weise implementiert). Es sind beliebige Schachtelungen dieser Präfix-Klassen möglich.

Im vorliegenden Programmpaket wurden alle Prozeduren, die betriebssystemspezifische Anweisungen enthalten, in einer für alle Programme identischen Klasse EIN-AUSGABE zusammengefaßt. Es wird z.B. die gesamte Dateiverwaltung über diese Prozeduren durchgeführt, wobei die Zuordnung zwischen internen und externen Dateinamen bzw. der Abschluß aller Dateien von der Präfix-Klasse ohne Benutzerinitiative ausgeführt werden (Anfangs- und Endbearbeitung der Umgebungs-klasse). Bei einer Übertragung des Programmsystems müssen zur Anpassung an die system-spezifische Dateihandhabung lediglich die entsprechenden Prozeduren der Klasse EIN-AUSGABE geändert werden.

8.3 Umgebungsklassen für Datenblöcke

Alle Prozessoren des Simulationssystems arbeiten innerhalb identischer Programmumgebungen auf den gleichen Datenstrukturen. Dazu ist die Beschreibung der Datenblöcke in zwei Präfix-Klassen zusammengefaßt, die für alle anderen Module verfügbar sind.

Die Klasse FAHRZEUGE enthält alle Bausteine zum Aufbau von Fahrzeugketten, zur Verknüpfung der Spuren untereinander sowie für Listen von Haltestellen des öffentlichen Verkehrs ("Linien"). Außerdem werden hier alle Initialisierungswerte für die Fahrzeuggenerierung sowie Prozeduren für die Berechnung der fahrdynamischen Kenngrößen der Fahrzeuge zur Verfügung gestellt.

In der Klasse STRUKTUR sind die Beschreibungen aller Datenblöcke zur Definition eines zu simulierenden Netzausschnitts und der wirksamen Störungen, Entscheidungen usw. zusammengefaßt. Aus diesen Datenblöcken werden die Strukturlisten aufgebaut, die die Verknüpfungen der einzelnen Modellbereiche wiedergeben.

8.4 Eingabeprozessor MISS

Der Prozessor MISS dient zum Lesen, Prüfen und Verarbeiten der Beschreibung des betrachteten Netzausschnitts (Strukturbeschreibung). Die aufgebauten Strukturlisten werden kodiert auf Datei ausgegeben (Abb. 8.4-1).

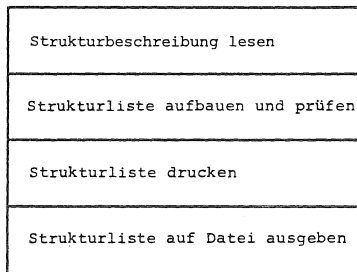


Abb. 8.4-1 Ablaufstruktur Eingabeprozessor MISS

Die einzelnen Module des Prozessors sind in Abb. 8.4-2 dargestellt. Es lassen sich vier Arten von Modulen unterscheiden:

- Programmumgebung: Die Klassen EIN-AUSGABE und ZUFALL ermöglichen den Zugriff auf Funktionen des Betriebssystems (Klasse EIN-AUSGABE) und auf Zufallszahlengeneratoren (Klasse ZUFALL).

- Datenblöcke: Die Klassen FAHRZEUGE (Datenblöcke für Spur- und Fahrzeugketten) und STRUKTUR (Datenblöcke für Streckenbausteine, Entscheidungen usw.) enthalten die Datenstrukturen des Simulationssystems und ermöglichen den Aufbau der Strukturlisten für den betrachteten Netzausschnitt.

PROZESSOR MISS	
EIN-AUSGABE	Rechnerabhängige Systemschnittstelle; Dateihandhabung, Zugriff auf Systemroutinen
ZUFALL	Vereinbarung aller Zufallszahlengeneratoren
FAHRZEUGE	Datenblöcke für Fahrzeuge; fahrdynamische Eigenschaften der Fahrzeuge; Spürköpfe; Steuerparameter
STRUKTUR	Datenblöcke für Streckenbausteine, Entscheidungen usw.
DRUCK	Ausdrucken Strukturaufbau nach Funktionsbereichen
ALLES LESEN	Einlesen Strukturbeschreibung; Prüfung auf Syntax
AUFBAU	Erstellung Simulationsstrukturen; semantische Prüfung
WEGSCHREIBEN	Ausgabe der kodierten Struktur auf Datei
MISS-STEUERPROGRAMM	Steuerprogramm, Schaltung von Trace-Funktionen

Abb. 8.4-2 Module Eingabeprozessor MISS

- **Verarbeitungsmodule:** Die Klassen DRUCK, ALLES-LESEN, AUFBAU und WEGSCHREIBEN übernehmen die jeweiligen Bearbeitungsschritte.

- **Steueroutine:** Das Modul MISS steuert den Ablauf der Eingabeverarbeitung, stellt alle TRACE-Funktionen zur Verfügung und übernimmt bei Bedarf den Benutzerdialog (interaktiver Aufruf).

Die einzelnen Klassen sind jeweils abgeschlossene Module, die lediglich Prozeduren oder Datenblöcke übergeordneter Klassen ansprechen. Im folgenden sollen die Aufgaben der einzelnen Verarbeitungsmodule noch etwas näher beschrieben werden.

Klasse DRUCK: Diese Klasse stellt Prozeduren zum übersichtlichen Ausdruck der Strukturlisten zur Verfügung. Weiterhin sind Ausdrücke mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad möglich.

Klasse ALLES-LESEN: Die Klasse ALLES-LESEN enthält alle Funktionen zum Einlesen und zur syntaktischen Prüfung der Strukturbeschreibung. Es wird eine Fehlerüberwachung durchgeführt, die es erlaubt, fehlerhafte Eingabedaten ohne Programmabbruch zu überlesen und den nächsten Datensatz wieder in vollem Umfang zu verarbeiten. Zur Strukturbeschreibung wird eine besondere Eingabesprache verwendet, die weitgehend formatfrei ist.

und auf der Basis von sogenannten "Kodewörtern" eine übersichtliche und leicht lesbare Beschreibung der Simulationsstrecke erlaubt.

Klasse AUFBAU: In der Klasse AUFBAU wird mit Hilfe der Strukturbeschreibung der betrachtete Netzausschnitt in Form verketteter Listen aufgebaut. Dabei erlaubt eine bewußte Redundanz in den Eingabedaten weitgehende Plausibilitätskontrollen. Außerdem werden umfangreiche semantische Prüfungen durchgeführt (nicht zusammenhängende Strecken, falsches Setzen von Entscheidungen usw.)

Klasse WEGSCHREIBEN: Ausgabe der Strukturlisten in kodierter und komprimierter Form auf die Datei STRUKTUR. Diese Datei, die im wesentlichen nur streckenspezifische Daten enthält, kann z. B. für mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlicher Signalsteuerung verwendet werden.

Hauptprogramm MISS: Das Steuerungsprogramm übernimmt die Zuordnung und Eröffnung aller Ein- und Ausgabedateien, liest die Parameter für die Überwachung des Programmablaufs (Trace-Funktionen, Drucksteuerung) und ruft nacheinander die unterschiedlichen Bearbeitungsprozeduren auf.

8.5 Simulationsprozessor MISSION

Der Simulationsprozessor MISSION baut aus der Strukturdatei die für die Durchführung der Simulation notwendigen Strukturlisten auf, initialisiert die Teilmodelle SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM und liest die für die Simulation notwendigen Steuerdaten. Anschließend werden die Simulationsprozesse gestartet. Nach Ablauf der Simulationszeit werden die Prozesse beendet und ggf. Statistikdaten des Simulationslaufs ausgegeben (belegter Speicherplatz, verbrauchte Rechenzeit usw.).

In der Ablaufstruktur (Abb. 8.5-1) ist erkennbar, daß im gesamten Initialisierungsbereich eine sequentielle

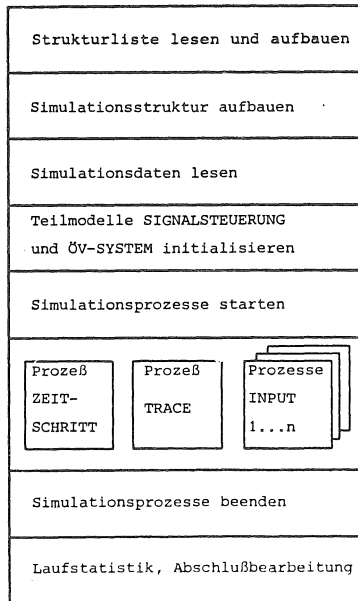


Abb. 8.5-1 Ablaufstruktur Simulationsprozessor MISSION

Bearbeitung der einzelnen Aufgaben vorliegt. Anschließend werden die Simulationsprozesse gestartet, die weitgehend unabhängig (nur über die Simulationszeit koordiniert) arbeiten. Die Abschlußbearbeitung erfolgt wieder sequentiell.

8.5.1 Bausteine des Simulationsprozessors

Die Grundstruktur des Simulationsprozessors MISSION entspricht im wesentlichen der des Prozessors MISS (Abb. 8.5-2). Wieder bilden die Klassen EIN-AUSGABE und ZUFALL die Programmumgebung und ähnlich wie im Eingabeprozessor werden in den Klassen FAHRZEUGE und STRUKTUR die Datenblöcke zur Verfügung gestellt. Alle weiteren Module, mit Ausnahme des Hauptprogramms MISSION, enthalten Bearbeitungsprozeduren. In der Initialisierung werden nach dem Aufbau der Strukturlisten diese in Klassen innerhalb der Bearbeitungsmodule (FUNKTIONEN, INPUT usw.) kopiert. Diese Klassen enthalten die den jeweiligen Daten zugehörigen Bearbeitungsrountinen (vgl. Abschnitt 8.5.3) und bilden in ihrer Gesamtheit die Simulationsstruktur.

Die Klassen EIN-AUSGABE, ZUFALL und FAHRZEUGE sind identisch mit denen des Prozessors MISS. Auch die Klasse STRUKTUR ist ein Kopie der entsprechenden Klasse im Eingabeprozessor. Allerdings wurden hier aus Speicherplatzgründen einige nicht mehr benötigte Variablen in der Beschreibung der Datenblöcke entfernt.

Die Klasse WIEDERAUFBAU ist genau spiegelbildlich zur Klasse WEGSCHREIBEN im Eingabeprozessor. Sie baut die Strukturdaten aus der kodierte Struktur wieder auf.

PROZESSOR MISSION	
EIN-AUSGABE	Systemschnittstellen
ZUFALL	Zufallszahlengeneratoren
FAHRZEUGE	Datenblöcke für Fahrzeuge
STRUKTUR	Strukturdaten
WIEDERAUFBAU	Wiedererstellung der Simulationsstruktur aus Kode-Datei
INTERAKTION	Interaktionsprozeduren für Einzelfahrzeug
FUNKTIONEN	Bearbeitung aller Fahrzeuge, Aufruf Interaktionsprozeduren
INPUT	Fahrzeuggenerierungsprozesse, Einfügen in Fahrzeugketten
BEOBACHTER	Erfassung Systemzustand, Ausgabe auf Datei
ENTSCHEID	Entscheidungen über Richtungswechsel und Wunschgeschwindigkeit
STÖRUNGEN	Verarbeiten und Setzen von Störungen
MESSUNGEN	Durchführung von Querschnittsmessungen; Erfassung von Detektordaten
ÖPNV BEARBEITEN	ÖV-bezogene Aktivitäten: Fahrzeug einsetzen, Haltestellenanfahrt, Fahrzeugortung
TRANSFER	Behandlung aller Schnittstellenfunktionen zu Signalsteuerung und ÖV-Leitsystem; Überwachungs- und Tracemöglichkeiten
MISSION-STEUERPROGRAMM	Steuerprogramm; Schaltung von Tracefunktionen

Abb. 8.5-2 Module Simulationsprozessor MISSION

Klasse INTERAKTION: Diese Klasse enthält alle Prozeduren, die das Interaktionsverhalten der einzelnen Fahrzeuge festlegen (Spurwechselwünsche und Spurwechsellmöglichkeiten sowie Fahrzeugfolgeverhalten).

Klasse FUNKTIONEN: Die Klasse FUNKTIONEN enthält Klassen zur Nachbildung einzelner Streckenbausteine. Diese enthalten Daten zur Beschreibung des Bausteins und Prozeduren, die auf diesen Daten arbeiten (Aktiv-Klassen). Jede dieser Klassen kann auf alle in ihrem Streckenbereich befindlichen Fahrzeuge zugreifen und entscheidet in jedem Simulationsschritt mit Hilfe der Prozeduren aus der Klasse INTERAKTION über das Verhalten jedes dieser Fahrzeuge.

Klasse INPUT: Diese Klasse enthält Prozesse, die Fahrzeuge an Einfahrtquerschnitten eines Netzausschnitts erzeugen können. Diese Prozesse werden von der Zeitsteuerung gestartet und setzen dann unabhängig voneinander Fahrzeuge ein. Das Einfügen in die Fahrzeugkette und die Synchronisation mit dem Prozeß ZEITSCHRITT wird von einer für alle Inputprozesse verfügbaren Prozedur durchgeführt, die ein vereinfachtes Fahrzeugfolgeverhalten nachbildet. Die Klasse INPUT enthält darüber hinaus die Initialisierung der Verteilungsfunktionen für die fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit von Pkw und die spezifische Leistung von Lkw.

Klasse BEOBACHTER: Diese Klasse dient zur Erfassung und Registrierung des Zustands (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) aller Fahrzeuge im System. Der Systemzustand wird vom "BEOBACHTER" in jedem Zeitschritt auf Datei ausgegeben.

Klasse ENTSCHEID: Diese Klasse enthält für jede Richtungswechsel- oder Wunschgeschwindigkeitsentscheidung eine eigene Aktiv-Klasse. Überfährt ein Fahrzeug einen Entscheidungsquerschnitt, so wird die in den Entscheidungsblöcken vermerkte Aktion durchgeführt (Setzen eines Richtungswunsches oder Ändern der Wunschgeschwindigkeit).

Klasse STÖRUNGEN: Diese Klasse enthält alle Aktiv-Klassen zur Nachbildung von Behinderungen des Verkehrsablaufs durch Signalanlagen, Fußgängerüberwege, Radwege und kreuzenden bzw. einbiegenden Verkehr. Bei Auftreten einer Störung (Störung ist "aktiv") werden die Behinderungen durch einen speziellen Fahrzeugtyp ("Störungsfahrzeuge") für die FFE sichtbar gemacht.

Klasse MESSUNGEN: Diese Klasse enthält Aktiv-Klassen zur Durchführung von Querschnittsmessungen oder zur Nachbildung von Detektoren. Die Daten der bei Querschnittsmessungen erfaßten Fahrzeuge werden auf Datei abgespeichert, während die Detektordaten über die Schnittstelle an die Signalsteuerung weitergegeben werden.

Klasse ÖPNV: In dieser Klasse werden zentral alle Aktionen durchgeführt, die Fahrzeuge des Öffentlichen Verkehrs betreffen. So werden Fahrzeuge nach Bedarf in die Simulationsstrecke eingesetzt bzw. nach Verlassen des Systems aus den entsprechenden Listen entfernt. Außerdem wird die Ein- und Ausfahrt an Haltestellen überwacht, und es werden die Ortungsdaten für das Betriebsleitsystem bereitgestellt.

Klasse TRANSFER: Die Klasse TRANSFER beinhaltet alle Schnittstellenfunktionen zu den Modellen SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM. Sie stellt außerdem Überwachungsfunktionen für die an der Schnittstelle übergebenen Daten zur Verfügung. Durch Austausch dieser Klasse kann der Prozessor MISSION leicht an unterschiedliche Modelle der Signalsteuerung oder des ÖV-Betriebs angepaßt werden.

Steuerprogramm MISSION: Hier wird der gesamte Ablauf des Simulationsprozessors (siehe Abb. 8.5-1) gesteuert. Nach der Initialisierungsphase werden die parallelen Prozesse der eigentlichen Simulation gestartet und Ablauf und Beendigung koordiniert.

8.5.2 Logische Struktur

Das Simulationssystem MISSION besteht aus voneinander weitgehend unabhängigen Einzelprozeduren, die alle auf einer gemeinsamen Datenbasis (Spur- und Fahrzeugketten) arbeiten. Nur das Steuerprogramm kennt alle Prozeduren und kann sie nach Bedarf aktivieren.

In Abb. 8.5-3 ist diese logische Struktur in einer Art Schichtmodell dargestellt. Die Schnittstelle zur "Außenwelt" bildet die Klasse EIN-AUSGABE. Jede weiter innen liegende Schicht kennt logisch nur Module, die sich weiter außen befinden. Lediglich die zentrale Steuerprozedur MISSION hat Zugriff auf alle Einzelbausteine.

Die Systemschnittstelle EIN-AUSGABE enthält rechnerabhängige Prozeduren, die notwendig sind, um mit dem Betriebssystem zu kommunizieren. Entsprechend stellt die Klasse ZUFALL Zufallszahlengeneratoren zur Verfügung.

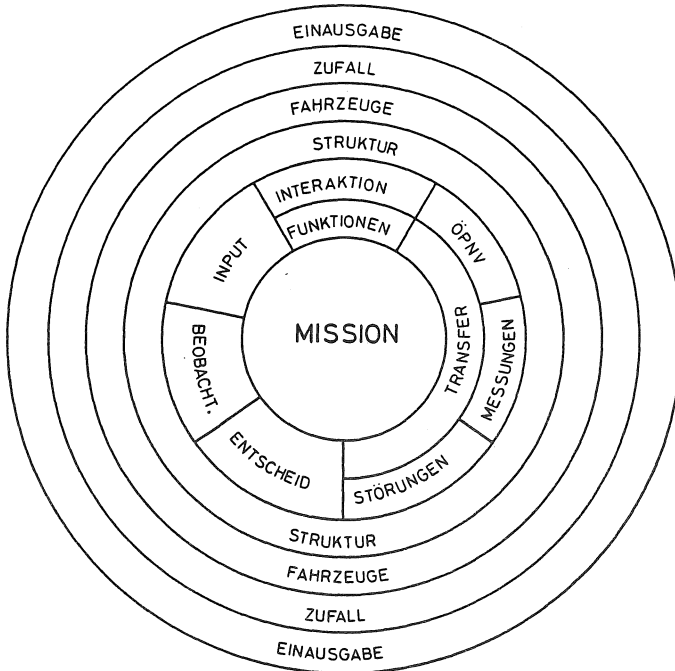


Abb. 8.5-3 Logische Struktur des Simulationsmodells MISSION

Die Datenblöcke, die während der Simulation benötigt werden sind vollständig in der Klasse FAHRZEUGE enthalten. Hier liegen insbesondere alle Spurketten, alle Fahrzeuge und Zeiger auf die Fahrzeuge. Die Klasse STRUKTUR ist nur zum Aufbau der aktiven, weiter innen liegenden Simulationsklassen erforderlich. Alle hier in STRUKTUR definierten Datenbereiche werden nach dem Initialisieren gelöscht. Die entsprechenden Speicherplätze werden freigegeben.

Die für die Durchführung der Simulation notwendigen Bausteine des Modells liegen mit Ausnahme der Module FUNKTION und INTERAKTION (Steuerung der Bearbeitung der Einzelfahrzeuge; Entscheidungsprozeduren für Einzelfahrzeuge) parallel. Die Bausteine, die Daten mit der Schnittstelle zu den Teilmodulen SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM austauschen müssen, können über das zentrale Modul TRANSFER erreicht werden. Über dieses Modul wird der gesamte Datenaustausch abgewickelt.

Die oben dargestellte Struktur gibt den Maximalausbau des Simulationsprozessors wieder, wie er für die Nachbildung von innerstädtischen Verkehrsabläufen unter Berücksichtigung des öffentlichen Verkehrs erforderlich ist.

In anderen Anwendungen wird z. B. kein ÖV simuliert; bei der Simulation von Verkehrsabläufen auf kreuzungsfreien Richtungsfahrbahnen kann auf Signalsteuerungsmodelle verzichtet werden. Das realisierte Systemkonzept bietet hier die Möglichkeit, nicht erforderliche Programmmodule ohne weitere Auswirkungen auf den Modellablauf entfallen zu lassen. So können z. B. je nach Aufgabenstellung die Klassen TRANSFER, STÖRUNGEN und ÖPNV entfallen. Ebenso können die Entscheidungen (Klasse ENTSCHEID) weggelassen werden. Lediglich die Module INPUT, FUNKTIONEN und INTERAKTION sind für den Simulationsablauf zwingend notwendig.

Alle Änderungen in der Modulzusammensetzung (und damit des Leistungsumfangs des Simulationsprogramms) erfordern lediglich die Verwendung unterschiedlicher Steuerprozeduren im Hauptprogramm MISSION. Dieses ist im realisierten Programmsystem in mehreren Versionen für die unterschiedlichen Einsatzbereiche verfügbar.

Die Struktur des Simulationssystems ermöglicht neben dem Weglassen ganzer Module auch den Austausch von Modulen. Dies ist z. B. sinnvoll, um in der Klasse INTERAKTION unterschiedliches Fahrverhalten auf Autobahnen bzw. auf Stadtstraßen nachzubilden, oder um durch Austausch der Klasse TRANSFER den Anschluß unterschiedlicher Steuerungsmodelle zu ermöglichen.

Die einzige Restriktion beim Austausch von Modulen ist, daß die extern "sichtbaren" Prozedurnamen, über die Bearbeitungsaktivitäten innerhalb der Klassen gestartet werden, gleich sind. Im allgemeinen sind dies lediglich drei Prozeduren zur Initialisierung, Bearbeitung eines Zeitschritts und Abschlußbearbeitung. Alle anderen Aktivitäten geschehen lokal innerhalb der Module und haben lediglich Auswirkungen auf die Fahrzeugketten.

8.5.3 Ablaufstruktur der Simulationsprozesse

Die Prozesse der Simulation laufen unter der Kontrolle einer übergeordneten Zeitsteuerung ab. Diese organisiert eine quasi-parallele Bearbeitung der einzelnen Prozesse. Eine Synchronisation erfolgt lediglich über die Simulationszeit. Jeder Prozess bestimmt unabhängig von allen

anderen, wann er aktiv werden muß (Anweisungen an die Zeitsteuerung, wie "Warte n Sekunden" oder "Reaktiviere zur Zeit t"). Der Zeitsteuerungsmechanismus der Simulationssprache sortiert die gewünschten Aktivierungszeitpunkte nach der Zeit und aktiviert unter Fortschreibung der Simulationszeit die entsprechenden Module.

Im vorliegenden Modell finden sich drei Typen von Simulationsprozessen (Abb. 8.5-4):

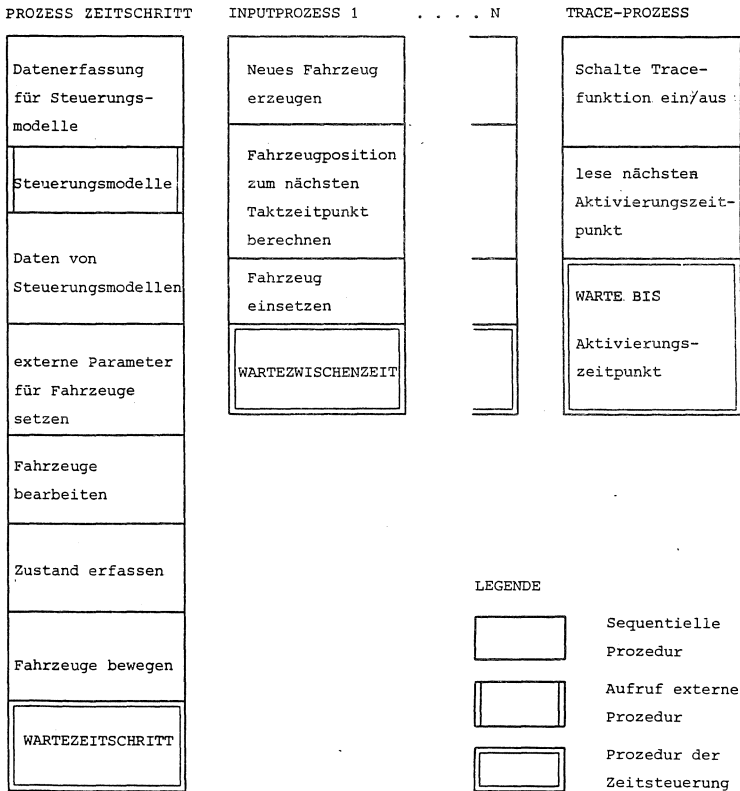


Abb. 8.5-4 Prozesse im Simulationsprogramm MISSION

1. Prozeß ZEITSCHRITT:

Dieser Prozess führt die Fortschreibung der Simulation des Verkehrsablaufs durch. Er wird jeweils nach Ablauf eines Zeitschritts reaktiviert (zyklische Bearbeitung). Bei jedem Aufruf werden alle für die Fortschreibung des Systemzustands notwendigen Aktionen eingeleitet (Abb. 8.5-5 - siehe folgende Seite).

2. INPUT-Prozesse:

Für jede Fahrzeugquelle innerhalb des Simulationssystems existiert ein unabhängiger Prozeß. Jeder dieser Prozesse reaktiviert sich entsprechend seiner Zeitlückenverteilung. Bei jeder Reaktivierung wird ein neues Fahrzeug erzeugt. Die Ablaufstruktur ist aus Abb. 8.5-6 zu ersehen.

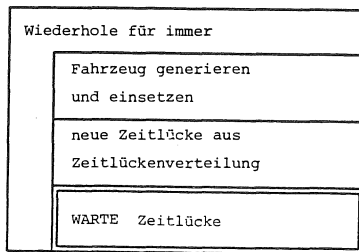


Abb. 8.5-6 Ablaufstruktur Prozeß INPUT

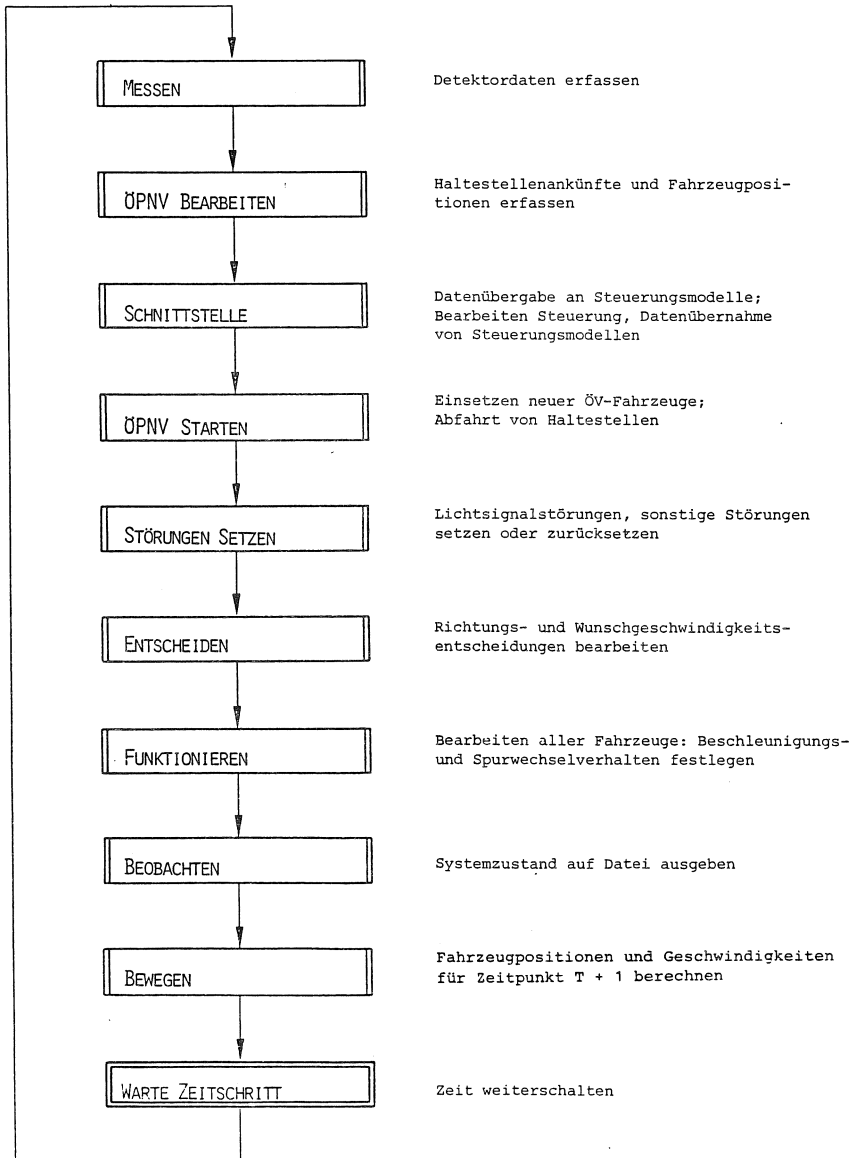


Abb. 8.5-5 Ablauf Prozeß ZEITSCHRITT

3. TRACE-Prozess:

Dieser Prozeß ermöglicht das An- und Ausschalten von Überwachungsfunktionen. Es kann entweder eine Folge von TRACE-Funktionen zu bestimmten Zeitpunkten ausgelöst werden, oder es können im Dialogbetrieb bei angegebenen Haltepunkten Entscheidungen über den weiteren Verlauf vom Benutzer angefordert werden. Abb. 8.5-7 zeigt die Ablaufstruktur.

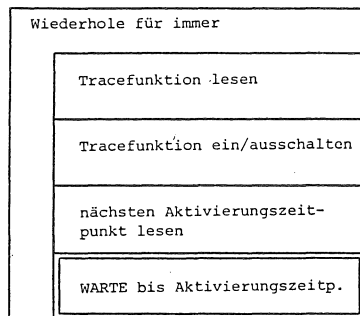


Abb. 8.5-7 Ablaufstruktur Prozeß TRACE

Während der Aktivierung des Prozesses ZEITSCHRITT werden die einzelnen Bearbeitungsprozeduren aufgerufen. Diese Aufrufe initiieren jeweils eine hierarchische Bearbeitung unterschiedlicher Programmebenen (vgl. Abb. 8.5-8)

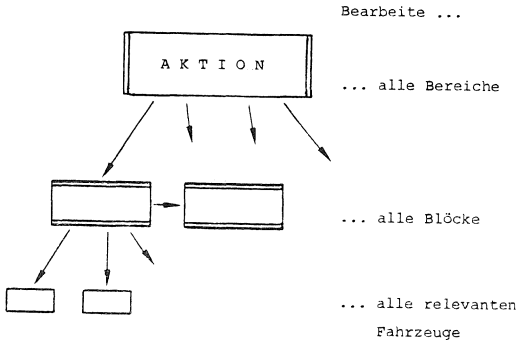


Abb. 8.5-8 Ablauf einer Bearbeitung im Prozeß
ZEITSCHRITT

- Der Prozeß ZEITSCHRITT veranlaßt die Bearbeitung von Aktionsprozeduren in den einzelnen Modulen (MESSEN, STÖRUNGEN SETZEN, ENTSCHIEDEN, FUNKTIONIEREN usw.);
- Die Module enthalten im allgemeinen eine Liste von Aktiv-Klassen, die die Blöcke des Modellbereichs repräsentieren. Jede der Aktiv-Klassen wird von der Aktionsprozedur zur Ausführung ihrer speziellen Bearbeitung veranlaßt;
- Die Aktiv-Klassen bearbeiten alle Fahrzeuge im betrachteten Streckenabschnitt bzw. alle Fahrzeuge, für die eine Entscheidung zu treffen ist.

Ein Zeitschritt ist beendet, wenn alle generierten Aktiv-Klassen - diese spiegeln die Struktur des betrachteten Netzausschnitts wider - alle jeweils relevanten Fahrzeuge "bearbeitet" haben.

8.6 Schnittstellen

Die Schnittstellenfunktionen des Simulationsprozessors MISSION umfassen die Verarbeitung der vom Prozessor MISS erstellten Strukturbeschreibung, die Ausgabe von Daten im Simulationsablauf und gegebenenfalls die Kommunikation mit den Modellen SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM.

Die Schnittstelle zum Prozessor MISS ist nur intern im Simulationssystem von Bedeutung und wird deshalb nicht näher erläutert (die übergebene Datei enthält eine kodierte Kopie der Strukturlisten).

Alle anderen Schnittstellenfunktionen werden über die Umgebungsklasse EIN-AUSGABE (Zuordnung von Ein-/Ausgabedateien) bzw. die Klasse TRANSFER (Kommunikation mit Steuerungsmodellen) abgewickelt.

8.6.1 Schnittstellen zu den Modellen SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM

Die Steuerungsmodelle werden im Ablauf der Simulation als Unterprogramme des Simulationsprozessors aufgerufen. Die Schnittstellen sind so definiert, daß die

Steuerungsmodelle völlig unabhängig von den Modellen des Verkehrsablaufs arbeiten können. Es werden ausschließlich Statusinformationen und die unten beschriebenen Datenpuffer ausgetauscht.

Es ist zu unterscheiden zwischen der Initialisierung der Steuerungsmodelle und dem zyklischen Aufruf während des Simulationsfortschritts.

Zur Initialisierung der Steuerungsmodelle (Abb. 8.6-1) erfolgt ein Funktionsaufruf mit einem vorgegebenen Prozedurnamen (SIGNIT). Dabei wird eine Variable übergeben, die unterschiedliche Trace-Funktionen innerhalb der Steuerungsmodelle aktiviert. Der Funktionswert ist ein Programmstatus, der über aufgetretene Fehler während der Initialisierung informiert.

Aufruf Initialisierung SIGNIT
Setzen Indizes der Signalgruppen
Prüfung auf Vollständigkeit
Setzen Indizes der Detektoren
Prüfung auf Vollständigkeit

Abb. 8.6-1 Initialisierung der Schnittstellen zum Steuerungsmodell

Während der Initialisierungsphase müssen vom Modell SIGNALSTEUERUNG zwei sequentielle Dateien erstellt werden, in denen für jedes Lichtsignal bzw. jeden Detektor die Übergabeindizes im gemeinsamen Pufferbereich mitgeteilt werden. Diese Datensätze werden vom Simulationsprozessor verarbeitet. Dabei wird die Vollständigkeit und Konsistenz der Informationen geprüft.

Während des Simulationsablaufs werden die Steuerungsmodelle in jedem Zeitschritt mittels eines Funktionsaufrufs SIGCON aktiviert. Außerdem werden beim Aufruf die Pufferbereiche für Signalzustände (SIGNAL-FELD), Detektorwerte (MESS-FELD) und ÖV-bezogene Informationen (ÖPNV-FELD) ausgetauscht.

8.6.2 Schnittstellen zu Auswerteprogrammen

Während der Simulation werden vom Modell MISSION Ausgabe-dateien erstellt, die alle interessierenden Vorgänge widerspiegeln. So werden insbesondere die Einfahrt von Fahrzeugen in den simulierten Netzausschnitt bzw. die Ausfahrt der Fahrzeuge, die Standort- und Geschwindigkeitsdaten aller Fahrzeuge zu jedem Zeitschritt sowie alle Änderungen in der Signalisierung protokolliert. Außerdem können an definierten Stellen Querschnittsmessungen durchgeführt werden.

A Ausgabedatei PROTOKOLL

Die Datei PROTOKOLL enthält jeweils eine Informationszeile für eine Fahrzeuggenerierung bzw. die Ausfahrt eines Fahrzeugs aus dem simulierten Netzausschnitt. Es werden jeweils Simulationszeit, Fahrzeugnummer und Ort der Einfahrt oder Ausfahrt sowie bei der Generierung Wunschgeschwindigkeitsparameter und fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit (bei Pkw) bzw. spezifische Leistung (Lkw, ÖV-Fahrzeuge) notiert.

B Ausgabedatei BEOBACHTET

Die Datei BEOBACHTET enthält für jeden Zeitschritt Informationen über den Zustand aller Fahrzeuge im System. Im einzelnen werden für jedes Fahrzeug die Fahrzeugnummer, die Lage im Simulationsbereich (Spur, Koordinate), Geschwindigkeit und Beschleunigung ausgegeben.

C Ausgabedatei SIGNALE

Die Datei SIGNALE enthält für jede Änderung in der Signalisierung eine Informationszeile. Es werden Zeitpunkt der Änderung, die betroffene Kreuzung und Signalgruppe sowie der neue Zustand protokolliert.

D Ausgabedatei MESSUNGEN

In der Datei MESSUNGEN werden alle an definierten Meßquerschnitten erfaßten Fahrzeuge vermerkt.

Für jedes Fahrzeug wird eine Informationszeile mit dem Zeitpunkt der Überfahung, Nummer der Meßstelle, Fahrzeugnummer und -geschwindigkeit erstellt,

9. Realisierung der Module des Simulationssystems

Die Einzelmodule innerhalb des Simulationssystems MISSION wurden insbesondere im Hinblick auf genau abgegrenzte, überschaubare Schnittstellen zu anderen Modulen, leichte Erweiterbarkeit und Austauschbarkeit realisiert. Dabei wurde als Hilfsmittel ein strenges Top-Down-Design unter Ausnutzung der Möglichkeiten der Sprache SIMULA eingesetzt.

Die Beschreibungen des Leistungsumfangs und der Ablaufstrukturen der realisierten Programmodule sollen insbesondere die zugrundeliegenden Konzepte darstellen. Deshalb wird auch in vielen Teilen zugunsten der Beschreibung der prinzipiellen Abläufe auf eine vollständige Aufzählung aller Funktionen verzichtet. Module, in denen einfache, lineare Prozeduren zusammengefaßt sind, werden nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Weitergehende Beschreibungen sind in HUBSCHNEIDER et al. (1981) sowie in der Programmdokumentation (Quellentext) zu finden.

9.1 Programmumgebung

Die Programmumgebung für die Prozessoren des Simulationssystems stellt Prozeduren und Datenverbunde zur Verfügung, die von den Bearbeitungsprozeduren für den Aufbau der Simulationsstrukturen und zur Durchführung der Simulation benötigt werden.

9.1.1 Umgebungs-klasse EIN-AUSGABE

In der Umgebungs-klasse EIN-AUSGABE sind betriebssystem-spezifische Prozeduren zusammengefaßt. Damit werden Funktionen zur Verfügung gestellt, die nicht im Sprach-umfang SIMULA enthalten sind bzw. über die allgemein anerkannte "Common Base Language" hinausgehen. Diese ermöglichen z. B. schnelle, unformatierte Ein-/Ausgabe oder erlauben eine Reduzierung des Speicherbedarfs durch Packen von mehreren Werten in ein Maschinenwort. Ein Austausch dieser Klasse ermöglicht die Anpassung des Programmsystems an andere Rechenanlagen.

Die realisierten Prozeduren dienen insbesondere der Zuordnung unterschiedlicher Dateitypen (sequentielle, direkt adressierbare und binäre Dateien), dem Zugriff auf systemspezifische Zeit-zähler zur Überwachung des Rechenzeitbedarfs und der Überwachung der Speicher-belegung.

Neben den durch die definierten Prozeduren für das Simulationssystem verfügbaren zusätzlichen Funktionen werden noch einige organisatorische Aufgaben von der Umgebungs-klasse selbständig ausgeführt. Diese sind insbesondere die Auswertung der vom Benutzer angegebenen Optionen zur Steuerung des Programmablaufs und der Programmüberwachungsfunktionen, die Initialisierung der Zeit-zähler und der Abschluß aller verwendeten Dateien am Ende des Programmlaufs.

9.1.2 Umgebungsklasse ZUFALL

Die Umgebungsklasse ZUFALL stellt Zufallszahlengeneratoren für verschiedene Formen von Verteilungsfunktionen zur Verfügung. Alle Generatoren können unter einheitlichem Namen angesprochen werden, so daß eine weitestgehende Austauschbarkeit gegeben ist (Abb. 9.1-1).

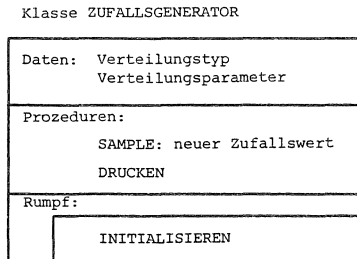


Abb. 9.1-1 Struktur der Zufallsgeneratoren in der Klasse ZUFALL

Es sind Generatoren für Gleich-, Normal- und Exponentialverteilungen sowie zur Nachbildung von benutzerdefinierten Verteilungsfunktionen verfügbar. Vom Programm können beliebig viele Generatoren erzeugt werden. Bei der Initialisierung eines Generators wird jeweils ein eigener Zufallszahlenstrom initialisiert, der von der Generatorklasse lokal verwaltet wird. Es ist so eine Entkoppelung unterschiedlicher pseudozufälliger Prozesse garantiert.

9.1.3 Datenklasse FAHRZEUGE

Die Klasse FAHRZEUGE enthält alle Datenklassen, die zum Aufbau der Fahrzeugketten, Spurketten und Zeiger in die Fahrzeugketten benötigt werden. Außerdem sind hier Datenklassen für die Nachbildung von Haltestellen und Haltestellenverkettung (Linien) vereinbart. Alle während des Simulationslaufs aktiven Blöcke arbeiten und kommunizieren ausschließlich mit der Klasse FAHRZEUG.

Die im Simulationsmodell verwendeten Fahrzeugtypen sind durch eine hierarchische Struktur gekennzeichnet (Abb. 9.1-2). Es wird primär unterschieden in "normale Fahrzeuge" (NORM-FAHRZ.) und "Organisationsfahrzeuge" (ORG-FAHRZ.). Letztere dienen lediglich zum Aufbau der Fahrzeugketten (jede Spurkette wird durch fiktive Fahrzeuge (PHANTOM) am Anfang und Ende der Spur begrenzt) bzw. zur Nachbildung von Störungen (STÖRUNGSFZ). Die "normalen Fahrzeuge" sind unterteilt in die Typen Pkw, Lkw und ÖV-FAHRZEUGE, wobei letztere noch weiter unterschieden werden. Die verschiedenen Fahrzeugarten haben im wesentlichen gleiche Parameter (jeweils in der Oberklasse vereinbart), unterscheiden sich jedoch in einzelnen Größen (Pkw: Höchstgeschwindigkeit, Lkw: spezifische Leistung, ÖV-Fahrzeug: Linienkennung usw.).

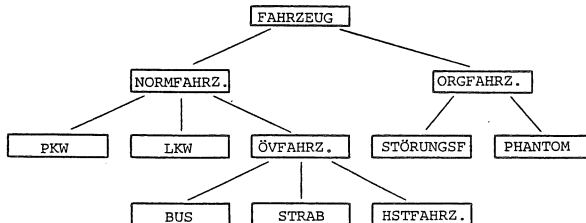


Abb. 9.1-2 Hierarchie der Fahrzeugtypen

Die Fahrzeugdatenblöcke können untereinander zu Spurketten verbunden werden. Spurketten entsprechen durchgehenden Fahrstreifen und können über Spurköpfe erreicht werden, die ihrerseits untereinander verkettet sind. Diese Spurköpfe haben die organisatorische Funktion, Fahrzeuge, die den simulierten Fahrstreifenbereich verlassen haben, aus den Ketten auszugliedern und den Datenblock freizugeben.

Die Datenklasse FAHRZEUGE stellt neben den Strukturen für die Fahrzeugketten noch Prozeduren zur Berechnung fahrdynamischer Grenzwerte (Beschleunigungs-, Bremsvermögen) abhängig vom Fahrzeugtyp und von fahrspezifischen Daten zur Verfügung. Die Parameter für diese Prozeduren werden in einer Initialisierungsprozedur zentral gesetzt.

9.1.4 Datenklasse STRUKTUR

Die Klasse STRUKTUR enthält Datenverbunde zur Beschreibung aller Simulationsblöcke. Diese Blöcke umfassen alle Streckenbausteine, Entscheidungen, Störungen usw., d.h. alle Einheiten, die später auf den Fahrzeugketten arbeiten. Beim Einlesen der Strukturbeschreibung werden diese Datenblöcke initialisiert; das Modul AUFBAU im Prozessor MISS benutzt diese Informationen, um die Strukturlisten zu erstellen.

9.2 Module des Eingabeprozessors MISS

Der Eingabeprozessor MISS liest die Beschreibung des nachzubildenden Netzausschnitts, prüft die Eingabedaten und baut entsprechende Listenstrukturen auf. Dann werden die Strukturen für den Simulationsprozessor abgespeichert. Der Ablauf ist streng sequentiell.

9.2.1 Klasse DRUCK

Die Klasse DRUCK enthält Prozeduren zur übersichtlichen Ausgabe aller Strukturlisten, z. B. der Listen der verschiedenen Simulationsblöcke, der Fahrzeug- und Spurketten sowie der Verweise aus den Strukturblöcken in die Fahrzeugketten. Es ist möglich, Informationen in verschiedenen Detaillierungsgraden auszugeben (steuerbar über Laufzeit-Optionen).

9.2.2 Klasse ALLES-LESEN

Im Modul ALLES-LESEN wird die Beschreibung des zu simulierenden Netzausschnitts aus den Eingabedaten in die Datenblöcke der Klasse STRUKTUR übertragen. Diese Daten werden satzweise gelesen und auf richtige Syntax geprüft (Abb. 9.2-1). Bei Fehlern im Aufbau der Eingabesätze werden Warnungen ausgegeben. Fehlerhafte Daten werden überlesen, ohne daß ein Programmabbruch erfolgt.

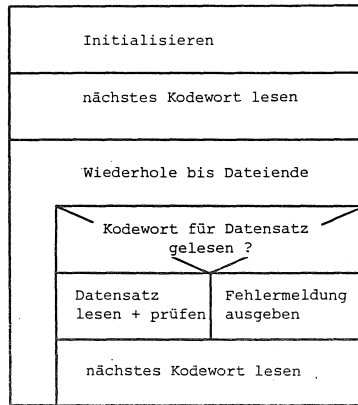


Abb. 9.2-1 Ablaufstruktur Klasse ALLES-LESEN⁺)

9.2.3 Klasse AUFBAU

Das Modul AUFBAU erstellt alle Strukturen, die für die Durchführung der Simulation notwendig sind (Abb. 9.2-2). Es ist dabei zu unterscheiden zwischen Ketten auf der Ebene der Fahrzeuge bzw. Fahrzeugzeiger und den Listen der Simulationsblöcke. Die letzteren werden direkt aus den Eingabedaten erstellt und bilden die Basis zum Aufbau der für die Simulation erforderlichen Strukturlisten.

Aus den Datenblöcken der Streckenbausteine wird zuerst eine doppelt verkettete Liste erstellt. Diese dient zur Überprüfung der Vollständigkeit und Konsistenz der Streckenbeschreibungen sowie zum einfachen Auffinden von Nachfolger- und Vorgängerblöcken bei den folgenden Sortiervorgängen.

⁺) In diesem und allen folgenden Strukturblöcken entspricht bei Bedingungsabfragen immer der Fortsetzungsblock auf der linken Seite dem "ja"-, der Block auf der rechten Seite dem "nein"-Ausgang.

Streckenbausteine verketten
Verbindungen auf Zulässigkeit und Vollständigkeit prüfen, evtl. Fehlermeldungen ausgeben
Bearbeitungsreihenfolge für Streckenbausteine festlegen
Fahrzeugzeiger zur Kommunikation zwischen den Streckenbausteinen setzen, Spurketten initialisieren
Koordinaten für alle Streckenbausteine und Spurköpfe setzen
Übergangsspuren in Kreuzungen initialisieren; Kreuzungen zerlegen
Störungsblöcke initialisieren, Fahrzeugzeiger zur Kommunikation mit Streckenbausteinen setzen
Meßblöcke initialisieren, Verweise in Fahrzeugketten setzen
Entscheidungsblöcke initialisieren, Verweise in Fahrzeugketten setzen
Input initialisieren, Verweise auf Fahrzeugzeiger der Streckenbausteine setzen
Haltestellen und Linienverkettung für ÖV aufbauen
Alle Blöcke (außer Streckenbausteine) sortieren

Abb. 9.2-2 Ablaufstruktur Klasse AUFBAU

Im nächsten Schritt wird die Bearbeitungsfolge für die Streckenbausteine festgelegt. Die Fahrzeugketten werden in der Simulation prinzipiell stromaufwärts (entgegen der Fahrtrichtung) durchlaufen. Die einzelnen Streckenbausteine sind deshalb so zu sortieren, daß vor der

Bearbeitung eines Bausteins alle stromabwärts liegenden Bausteine fertig bearbeitet sind. Werden bei der Sortierung Schleifen festgestellt, so müssen besondere Maßnahmen (spezielle Übergabe der Fahrzeuge) vorbereitet werden.

Während der Simulation werden die Funktionsblöcke streng sequentiell abgearbeitet. Dabei muß jedem Baustein von seinem stromabwärts gelegenen Nachfolger (dieser wurde - außer an Schleifengrenzen - früher bearbeitet) mitgeteilt werden, wo in den Fahrzeugketten die Bearbeitung fortgeführt werden muß. Diese Kommunikation erfolgt über Fahrzeugzeiger (Abb. 9.2-3). Diese Zeiger werden in einem eigenen Bearbeitungsschritt erzeugt und Verweise der Streckenbausteine auf diese Zeiger gesetzt. Außerdem werden alle Spurketten durch Organisationsfahrzeuge ("Phantomfahrzeuge": erstes und letztes Fahrzeug auf einer Spur) begrenzt sowie die Verweise von Fahrzeugzeigern in diese Ketten gesetzt.

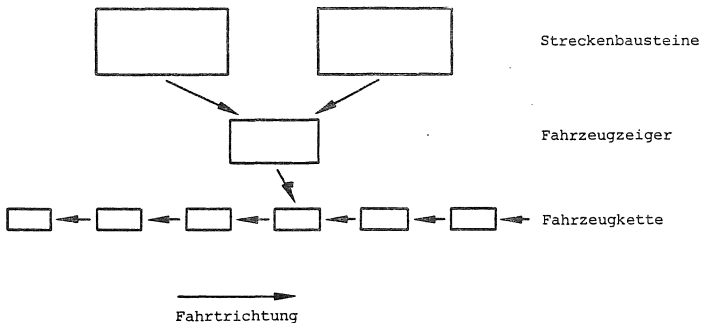


Abb. 9.2-3 Kommunikation zwischen Streckenbausteinen

Bei der Beschreibung der Streckenbausteine gibt der Benutzer die Länge jedes Bausteins an. Die Aufbau-prozedur errechnet nach dem Zusammensetzen der Funktionsblöcke durchgehende Koordinaten für jede Spurkette und setzt die Koordinatenwerte der Phantomfahrzeuge und der Spurköpfe (Spuranfangs- und Spurendekoordinaten).

Die Kreuzungsbausteine enthalten jeweils mehrere interne Spuren. Die Hauptspuren (durchgehende Spuren) werden bereits beim Aufbau der zur Kommunikation zwischen den Blöcken dienenden Fahrzeugzeiger initialisiert. Im nächsten Bearbeitungsschritt werden weitere kreuzungsinterne Spuren (Übergangsspuren), die den Wechsel von einer Hauptspur in eine andere organisieren, erzeugt und die entsprechenden Verkettungen und Verweise auf Fahrzeugzeiger gesetzt. Anschließend werden alle Kreuzungen organisatorisch in ihre einzelnen Spurböcke zerlegt, die im folgenden wie einfache Streckenbausteine behandelt werden.

In weiteren Arbeitsschritten werden die übrigen Simulationsblöcke initialisiert. So werden für alle Stö-rungsblöcke und Inputblöcke Verweise auf die Fahrzeugzeiger der betroffenen Streckenbausteine, für Messungsblöcke und Entscheidungen Zeiger direkt in die Fahrzeugketten (diese bestehen zu diesem Zeitpunkt nur aus Phantomfahrzeugen) gesetzt.

Zuletzt werden noch die Verkettungsstrukturen der Haltestellen des ÖV für die Organisation von Bus- oder Straßenbahnlinien erstellt. Jede Haltestelle erhält,

wie Blöcke für Messungen und Entscheidungen, außerdem einen Zeiger in die Fahrzeugketten, der einen schnellen Zugriff auf Fahrzeuge im Haltestellenbereich ermöglicht.

Vor dem Ende der Aufbauprozedur werden alle Blöcke mit Ausnahme der Funktionsblöcke, deren Bearbeitungsreihenfolge durch die Spurketten vorgegeben ist, nach aufsteigenden Identifikationsnummern sortiert.

9.2.4 Klasse WEGSCHREIBEN

Diese Klasse dient zur Ausgabe der Strukturlisten auf Datei. Es werden nur solche Verkettungen und Parameter weggeschrieben, die für die Durchführung der Simulation notwendig sind. So werden z. B. die Streckenbausteine in ihrer Bearbeitungsreihenfolge ausgegeben. Die zur Erstellung der Strukturlisten notwendige beiderseitige Verkettung aller Blöcke ist nicht mehr erforderlich. Es müssen lediglich alle Verweise auf Fahrzeugzeiger erhalten bleiben.

Da die Verweise in den Strukturlisten hierarchisch vorliegen (Blöcke zeigen auf Fahrzeugzeiger oder Fahrzeuge, Fahrzeugzeiger zeigen auf Fahrzeuge), ist ein relativ einfaches Wegschreiben und Wiederaufbauen der Listenstrukturen möglich. Es muß nur die Bearbeitungsreihenfolge "von unten nach oben" eingehalten werden (Abb. 9.2-4).

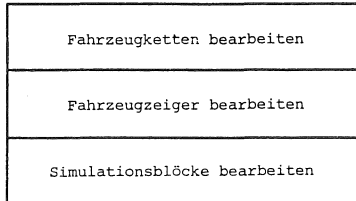


Abb. 9.2-4 Ablaufstruktur für die Ausgabe der Strukturlisten

9.3 Module des Simulationsprozessors MISSION

Der Simulationsprozessor besteht einerseits aus Modulen, die streng sequentiell ablaufen und zum Lesen und Aufbauen der Strukturlisten sowie zur Initialisierung der während der Simulation aktiven Prozesse dienen, andererseits aus Modulen, die unter der Zeitsteuerung quasi parallel ablaufen. Alle Abläufe werden zentral gesteuert vom Hauptprogramm MISSION. Die Umgebung für alle aktiven Module wird durch die oben beschriebenen Klassen EINGABE, ZUFALL, FAHRZEUGE und STRUKTUR gebildet.

9.3.1 Gemeinsame Struktur von Bearbeitungsmodulen im Prozessor MISSION

Die Module FUNKTIONEN, INPUT, ENTSCHEID, STÖRUNGEN und MESSUNGEN haben einen speziellen Aufbau, der eine effiziente Bearbeitung der unterschiedlichen Aufgabengebiete erlaubt.

Jedes Modul besteht aus einer Reihe von Klassen-Definitionen, einer Initialisierung und einer Aktionsprozedur. Die im Modul definierten Klassen werden als "Aktiv-Klassen" bezeichnet und erfüllen jeweils eine Aufgabe im Modellbereich des Moduls. Alle mit dieser Aufgabe verbundenen Aktivitäten werden in Prozeduren dieser Klasse durchgeführt (Z. B. werden innerhalb des Moduls MESSUNGEN alle Querschnittsmessungen, Geschwindigkeitsdetektoren usw. in jeweils eigenen Aktiv-Klassen nachgebildet).

Alle Aktiv-Klassen haben den gleichen Aufbau. Sie bestehen aus einer Reihe von Parametern, die die Aktionen der Klasse steuern, einer Initialisierungsprozedur, die beim Aufbau der Klasse ausgeführt wird, und der eigentlichen Bearbeitungsprozedur. Letztere hat in allen Aktiv-Klassen eines Moduls den gleichen Namen.

Bei der Initialisierung eines Moduls werden alle Aktiv-Klassen aufgebaut (Abb. 9.3-1). Dabei werden die Parameter aus einer Datenklasse des Moduls STRUKTUR übernommen. Die Datenklasse wird anschließend gelöscht.

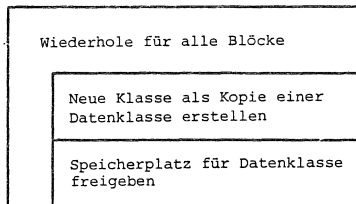


Abb. 9.3-1 Ablaufstruktur für die Initialisierung der Aktiv-Klassen

Alle Aktiv-Klassen eines Moduls werden linear verkettet. Bei einem Aufruf der Aktionsprozedur des Moduls wird die Liste der Aktiv-Klassen durchgegangen, und es wird bei Bedarf die Bearbeitungsprozedur der Klasse aufgerufen (Abb. 9.3-2).

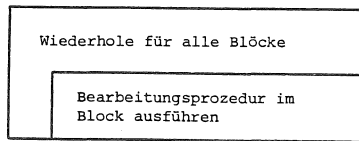


Abb. 9.3-2 Ablaufstruktur für die Bearbeitung der Aktiv-Klassen

Die Klassen des Moduls INPUT sind in ihrer Struktur ähnlich; auch sie werden aus Kopien von Datenblöcken der Klasse STRUKTUR erstellt. Die Input-Blöcke sind jedoch wegen der ereignisorientierten Arbeitsweise als Prozeßklassen realisiert.

9.3.2 Klasse INTERAKTION

In der Klasse INTERAKTION sind alle Prozeduren zusammengefaßt, die die Nachbildung des Fahrverhaltens von Einzelfahrzeugen ermöglichen (Interaktionsmodell). Das Modul enthält eine Anzahl von Prozeduren, die für ein Fahrzeug eine bestimmte Entscheidung treffen oder das Vorhandensein einer Behinderung, eines Spurwechselwunsches o. ä. erkennen.

Alle Prozeduren arbeiten mit globalen Parametern, die

die sogenannte Fahrzeugumgebung darstellen. Diese Umgebungsparameter werden für jedes Fahrzeug von der Klasse FUNKTIONEN gesetzt. Sie enthalten neben einem Verweis auf das zu betrachtende Fahrzeug Referenzen auf alle Fahrzeuge direkt vor, neben und hinter diesem Fahrzeug sowie Angaben über die Anzahl verfügbarer Spuren, Spurwechselverbote usw.

Für die Klasse FUNKTIONEN sind nur die Ergebnisse von Entscheidungen (Spurwechselwunsch vorhanden/nicht vorhanden) bzw. der Klassifizierung eines Interaktionszustands (keine Beeinflussung durch den Vordermann/starke Bremsung notwendig) verfügbar.

In der Klasse INTERAKTION werden im wesentlichen nur Entscheidungshilfen für die Prozeduren der Klasse FUNKTIONEN bereitgestellt. So wird z. B. hier beurteilt, ob ein Fahrzeug einen Spurwechsel aufgrund von Behinderungen oder Spurwahlvorschriften wünscht und ob ein Spurwechsel unter bestimmten Randbedingungen möglich ist.

Die endgültige Spurwechselentscheidung wird in der Klasse FUNKTIONEN in Abhängigkeit vom Typ des jeweiligen Streckenbausteins getroffen. In ähnlicher Weise beurteilt die Klasse INTERAKTION für ein gegebenes Fahrzeug den Interaktionszustand in bezug auf einen definierten Vordermann (Dieser kann ein "normales" Fahrzeug auf der eigenen oder einer Abbiegespur bzw. ein "Störungsfahrzeug" sein). In der Klasse FUNKTIONEN wird entschieden, auf welches Fahrzeug reagiert werden soll. Die Prozedur AKTION berechnet die daraus resul-

tierende Beschleunigung bzw. Verzögerung für das nächste Zeitintervall.

Im einzelnen sind folgende Entscheidungsprozeduren erforderlich:

- SPW-WUNSCH: Es wird beurteilt, ob sich ein Fahrer-Fahrzeug-Element von seinem Vordermann behindert fühlt und die Spur wechseln möchte;
- SPW-MÖGLICH, FORC-SPW-MÖGLICH: Es wird beurteilt, ob die Durchführung eines Spurwechsels ohne Gefährdung anderer Fahrzeuge möglich ist (das Vorhandensein des Spurwechselwunsches ist hier vorausgesetzt). Dabei dürfen im Fall eines normalen Spurwechselwunsches keine anderen Fahrzeuge behindert werden, bei einem dringenden Spurwechselwunsch wird die Möglichkeit eines "forcierten" Spurwechsels geprüft, bei dem auch Beeinflussungen anderer Fahrzeuge in Kauf genommen werden;
- REAKTION-AUF-STÖRVORDERMANN: Berechnung des Interaktionszustands in bezug auf eine lokale Störung. Bei Annäherung an eine Lichtsignalanlage und Wechsel von Grün auf Rot wird hier auch eine mögliche Gelbüberfahung berücksichtigt;
- AKTION: Entscheidung über Handlung im nächsten Zeitintervall durch Festlegen einer Beschleunigung. Hierbei wird der zu berücksichtigende Vordermann von der Klasse FUNKTIONEN vorgegeben.

Die Klasse INTERAKTION kann intern beliebige Interaktionsmodelle, Entscheidungskriterien für Spurwechsel oder Reaktionsverhalten auf Störungen oder beim Reißverschlußfahren nachbilden. Es müssen lediglich durch die oben aufgeführten Prozeduren die gewünschten Entscheidungshilfen für die Klasse FUNKTIONEN bereitgestellt werden. Damit ist eine weitgehende Unabhängigkeit zwischen dem Interaktionsmodell und den anderen Modellbereichen gegeben.

9.3.3 Klasse WIEDERAUFBAU

Die Klasse WIEDERAUFBAU ist das Gegenstück zur Klasse WEGSCHREIBEN im Prozessor MISS. Es werden die Strukturlisten mit Hilfe der Datei STRUKTUR wieder aufgebaut, wobei nur für die Simulation notwendige Verkettungen erstellt werden.

9.3.4 Klasse FUNKTIONEN

In der Klasse FUNKTIONEN wird für alle Fahrzeuge im simulierten Streckenabschnitt die Entscheidung über das Fahrverhalten im nächsten Zeitintervall getroffen. Dazu werden Prozeduren aus der Klasse INTERAKTION benutzt.

Bei der Initialisierung der Klasse wird für jeden Streckenbaustein eine Aktiv-Klasse ("FUNKTIONSBLOCK") erstellt, die abhängig vom Typ des Streckenbausteins unterschiedliche Bearbeitungsprozeduren enthält. Es wird unterschieden nach den Typen GERADE (Streckenabschnitt mit konstanter Charakteristik), SONDERFAHRBAHN (Einmündung, Verzweigung oder Haltebucht) und HAUPTSPUR bzw. ÜBERGANGSSPUR als Teile eines Kreuzungskomplexes.

Die Bearbeitungsprozeduren haben in allen Funktionsblöcken den gleichen strukturellen Aufbau (Abb. 9.3-3). Zu Beginn der Bearbeitung werden mit Hilfe der Fahrzeugzeiger die Verweise in die Fahrzeugketten aufgebaut. Dazu wird eine Referenz auf das erste Fahrzeug übergeben, das sich stromabwärts nach dem Einflußbereich des betrachteten Funktionsblocks befindet. Da alle Fahrzeuge einen Verweis auf ihren Nachfolger (stromaufwärts) tragen, können somit alle Fahrzeuge erreicht und bearbeitet werden, die sich im Einflußbereich dieses Bausteins befinden.

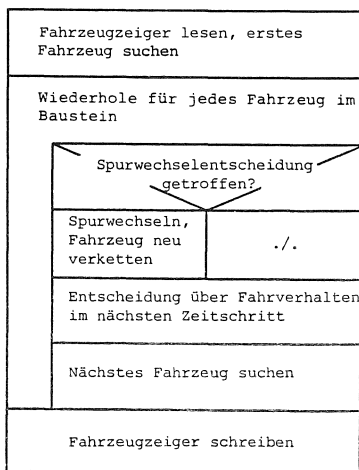


Abb. 9.3-3 Ablaufstruktur Prozedur BEARBEITEN

Jeder Funktionsblock hat Zugriff auf die Fahrzeugketten aller in seinem Bereich befindlichen Spuren. Spurwechsel werden durch Übernahme eines Fahrzeugs in eine neue Kette durchgeführt.

Es folgt die eigentliche Bearbeitung eines Fahrzeugs. Hier wird mit Hilfe der Interaktionsprozeduren entschieden, welche Beschleunigung ein Fahrzeug während des nächsten Zeitintervalls realisiert und ob bei der nächsten Bearbeitung ein Spurwechsel durchgeführt werden soll.

Nach Bearbeitung aller Fahrzeuge im Bereich eines Streckenbausteins werden für nachfolgende Funktionsblöcke die Verweise auf die letzten (stromaufwärts) liegenden Fahrzeuge des Bausteins gesetzt. Diese werden von den Aktiv-Klassen der nachfolgenden Streckenbausteine wieder gelesen.

9.3.5 Klasse INPUT

In der Klasse INPUT sind alle Prozesse zusammengefaßt, die Fahrzeuge an den Eingangsquerschnitten des zu simulierenden Netzausschnitts erzeugen. Jeder Inputblock setzt unabhängig von den anderen Prozessen am Anfang des ihm zugeordneten Streckenbausteins entsprechend den vorgegebenen Ankunftsverteilungen Fahrzeuge ein (Abb. 9.3-4).

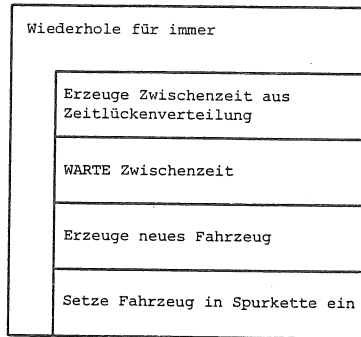


Abb. 9.3-4 Ablaufstruktur Prozeß INPUT

Jedes neu erzeugte Fahrzeug wird am Anfang (stromaufwärts) eines Streckenbausteins eingesetzt. Die Spur, auf der eingesetzt wird, kann entweder im Inputprozeß fest vorgegeben werden, oder es wird (bei mehreren Alternativen) in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp und den Abständen zu den vorausfahrenden Fahrzeugen die günstigste Spur ausgewählt. Die Wegkoordinate des Fahrzeugs wird so berechnet, daß beim nächsten Aufruf des Prozesses ZEITSCHRITT das Fahrzeug bereits die dieser Zeit entsprechende Posi-

tion hat, wobei der zulässige Sicherheitsabstand nicht unterschritten werden darf (Abb. 9.3-5).

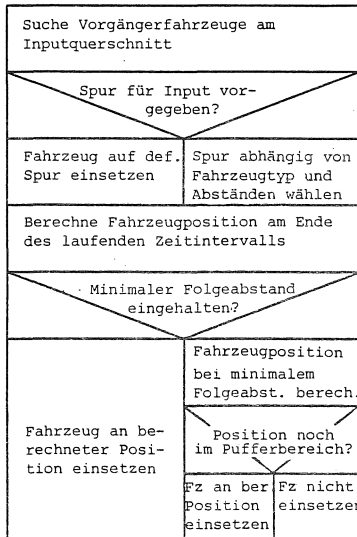


Abb. 9.3-5 Ablaufstruktur Prozedur FAHRZEUGEINSETZEN

An den Eingabequerschnitten ist eine Pufferzone vorgesehen, in der bei Überstauung Fahrzeuge eingesetzt werden können. Ist dieser Bereich ganz von Fahrzeugen belegt, so wird eine Warnung ausgegeben und das neue Fahrzeug nicht eingesetzt. Die Länge der Pufferzone kann als Programmparameter vorgegeben werden.

9.3.6 Klasse ENTSCHEID

Die Aktiv-Klassen dieses Moduls ermöglichen es, Wunschgeschwindigkeiten von Fahrzeugen zu beeinflussen bzw. Abbiegewünsche zu setzen. Dies erfolgt mit Hilfe einer Prozedur ENTSCHEIDE, die in jeder Klasse verfügbar ist.

In einer Geschwindigkeitsentscheidung wird aufgrund des Fahrzeugparameters "gewünschtes Geschwindigkeitsniveau" und der neuen Wunschgeschwindigkeitsverteilung die Wunschgeschwindigkeit eines Fahrzeugs neu berechnet und gesetzt.

Bei einer Richtungsentscheidung ist die prozentuale Aufteilung der Fahrströme im Parametersatz der Aktiv-Klasse angegeben (z. B. 20 % Linksabbieger, 80 % Geradeausfahrer). Es wird eine gleichverteilte Zufallszahl gezogen, die über diese Verteilungsfunktion der Abbiegewahrscheinlichkeiten den Richtungswunsch des Fahrzeugs bestimmt. Aus dem Richtungswunsch wird dann die interne Nummer der gewünschten Fahrspur abgeleitet und im Parametersatz des Fahrzeugs vermerkt. Sind für einen Abbiegevorgang zielgerichtete Spurwechsel notwendig, so wird gleichzeitig die Koordinate angegeben, bis zu der die gewünschte Spur erreicht sein muß. Wird die gewünschte Spur nicht bis zu dieser Koordinate erreicht, so wird der Abbiegewunsch zurückgesetzt und eine Warnung ausgegeben (Meist wurden in diesem Fall zu kurze Spurwechselbereiche vorgegeben).

Die Entscheidungen werden im Simulationsmodell getroffen, wenn ein Fahrzeug die der Entscheidung zugeordnete Koordinate auf der angegebenen Spur überfährt. Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Realisierung dieses Entscheidungsmechanismus': Es wird entweder bei jeder Fahrzeugfortbewegung geprüft, ob ein Fahrzeug den Entscheidungsquerschnitt überfahren hat, oder es werden durch direkte Verweise in die Fahrzeugketten die Fahrzeuge erfaßt, die jeweils als nächste einen Entscheidungsquerschnitt überfahren.

Die erste Alternative ist sehr einfach realisierbar, aber erfordert hohen Bearbeitungsaufwand: Es muß für jedes Fahrzeug bei jeder Fortbewegung geprüft werden, ob irgendein Erfassungsquerschnitt überfahren wurde. Die zweite Alternative erfordert dagegen mehr Abfragelogik, die jedoch sehr effizient realisierbar ist.

Im Modell MISSION wurde aus diesen Gründen die zweite Alternative realisiert. Jede Aktiv-Klasse, die Entscheidungen durchzuführen hat, enthält einen Zeiger auf das Fahrzeug, das dem Entscheidungsquerschnitt stromabwärts am nächsten ist, aber den Entscheidungsquerschnitt bereits überfahren hat. Dieses Fahrzeug wird als Entscheidungsfahrzeug bezeichnet. Es wird nun in jedem Zeitschritt geprüft, ob der Nachfolger des Entscheidungsfahrzeugs den Entscheidungsquerschnitt überfahren hat. In diesem Fall wird die jeweilige Entscheidungsprozedur ausgeführt. Mit einer speziellen Abfragelogik müssen dabei Vorkehrungen gegen die irrtümliche Erfassung bzw. das Auslassen von Fahrzeugen getroffen werden (Abb. 9.3-6).

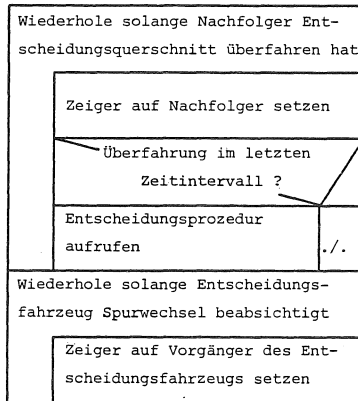


Abb. 9.3-6 Ablaufstruktur Prozedur ENTSCHEIDEN

Die möglichen Sonderfälle sollen anhand von Abb. 9.3-7 näher erläutert werden. Fahrzeug 3 ist hier das relevante Entscheidungsfahrzeug. Wenn dessen Nachfolger (Fahrzeug 6) den Entscheidungsquerschnitt überfährt (seine neue Koordinate liegt hinter dem Entscheidungsquerschnitt), so wird dieses zum nächsten Entscheidungsfahrzeug und die Entscheidungsprozedur wird ausgeführt. Wenn aber z. B. vorher Fahrzeug 4 einen Spurwechsel durchführt (Pfeil I), so würde dieses Fahrzeug Entscheidungsfahrzeug werden, da seine Koordinate über der Koordinate des Entscheidungsquerschnitts liegt. Die Überfähring des Querschnitts erfolgte aber nicht im letzten Zeitintervall, so daß die Entscheidungsprozedur nicht ausgeführt werden darf.

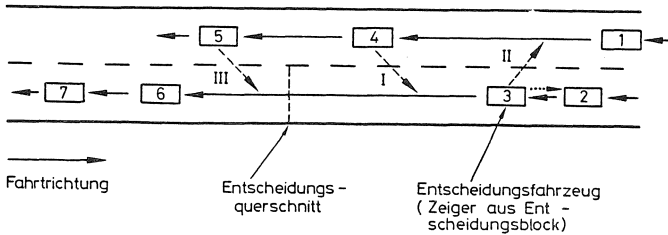


Abb. 9.3-7 Mögliche Probleme bei der Aktualisierung von Zeigern in Fahrzeugketten

Weiterhin muß überprüft werden, ob das Entscheidungsfahrzeug nicht beabsichtigt, im nächsten Zeitintervall die Spur zu wechseln (In diesem Fall würde der Zeiger und damit die Entscheidung auf eine andere, falsche Spur getragen). Besteht diese Spurwechselabsicht (Pfeil II), so trägt das Fahrzeug neben seinem üblichen Verweis auf den Nachfolger auch einen Verweis auf seinen Vorgänger (punktierter Pfeil). Der Zeiger aus dem Entscheidungsblock würde in diesem Fall auf diesen Vorgänger (Fahrzeug 2) umgesetzt werden. Bei der Bearbeitung im nächsten Zeitschritt, nachdem Fahrzeug 3 seine Spur gewechselt hätte, könnte das Entscheidungsfahrzeug wieder den richtigen Nachfolger (Fahrzeug 6) erreichen.

Im übrigen wäre es nicht möglich, aus dem Entscheidungsblock direkt auf das nächste Fahrzeug, das den Entscheidungsquerschnitt passieren könnte (Fahrzeug 6), zu verweisen, da dann die Überfahung des Querschnitts durch Fahrzeug 5 bei einem möglichen Spurwechsel (Pfeil III) nicht registriert werden könnte.

9.3.7 Klasse STÖRUNGEN

Im Modell MISSION werden alle Störungen des Verkehrsablaufs durch entsprechende Aktiv-Klassen nachgebildet. Jede Störungsklasse besitzt eine Prozedur STÖRUNG-AUSWERTEN, die aufgrund von Daten aus der Signalsteuerung oder dem Querverkehr das Vorhandensein einer Störung angibt.

Zur Mitteilung einer Störung an einem Streckenbaustein wird der spezielle Fahrzeugtyp "Störungsfahrzeug" benutzt, der beim Interaktionsmodell entsprechende Reaktionen auslöst. Um Querverbindungen zwischen unterschiedlichen Modulen des Simulationssystems zu vermeiden, werden die Störungsfahrzeuge von den Aktiv-Klassen des Moduls STÖRUNGEN indirekt an die Aktiv-Klassen im Modul FUNKTIONEN übergeben. Dafür werden Fahrzeugzeiger benutzt, die über das Modul FAHRZEUGE allen Aktiv-Klassen zugänglich sind (Abb. 9.3-8).

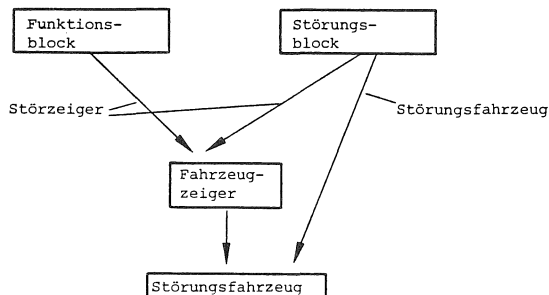


Abb. 9.3-8 Übergabe eines Störungsfahrzeugs von einem Störungsblock zum Funktionsblock

Bei der Beschreibung der Simulationsstrecken wird angegeben, zu welchen Streckenbausteinen ein Störungsblock gehört. Beim Aufbau der Strukturlisten wird dann über Fahrzeugzeiger eine Kommunikationsmöglichkeit geschaffen, indem die jeweils zusammengehörenden Blöcke Verweise auf denselben Fahrzeugzeiger erhalten. Zur Übermittlung der Störungsfahrzeuge (und damit des Ortes der Störung) werden diese von der Störungsklasse an den Datenblock "Fahrzeugzeiger" angehängt.

Die Aktiv-Klasse des Streckenbausteins berücksichtigt das Störungsfahrzeug bei den Interaktionsentscheidungen. Bei den Störungsarten SIGNAL, FUSSGÄNGER und RADFAHRER hat das Störungsfahrzeug die Geschwindigkeit Null und seine Position ist gleich der Endkoordinate des zugehörigen Streckenbausteins. Dagegen geben bei einer QUERVERKEHRSTÖRUNG die Parameter des Störungsfahrzeugs den Abstand und die Geschwindigkeit des nächsten Fahrzeugs im bevorrechtigten Verkehrsstrom an. Für die von der Störung betroffenen Fahrzeuge wird dann in der Interaktionsprozedur entschieden, ob in Abhängigkeit von ihrer Geschwindigkeit und ihrem Abstand die Zeitlücke für das Kreuzen bzw. Einbiegen in den bevorrechtigten Strom ausreicht.

9.3.8 Klasse MESSUNGEN

In der Klasse MESSUNGEN werden ortsfeste Detektoren zur Fahrzeugerkennung und lokale Meßquerschnitte nachgebildet. Die einzelnen Aktiv-Klassen enthalten jeweils eine Prozedur REGISTRIEREN, die die spezifische Erfassung durchführt und die Datenpuffer der Schnittstelle aktualisiert (Detektorquerschnitte) bzw. die Daten auf Datei ausgibt (Querschnittsmessungen). Die Erfassung der Fahrzeuge erfolgt über Zeiger in die Fahrzeugketten auf "MESSFAHRZEUGE", die genau wie die Zeiger auf Entscheidungsfahrzeuge der Klasse ENTSCHEID auf dem aktuellen Stand gehalten werden.

9.3.9 Klasse ÖPNV

In der Klasse ÖPNV sind alle Prozeduren und Parameter zusammengefaßt, die zur Bearbeitung der ÖV-spezifischen Funktionen benötigt werden.

Alle Fahrzeuge des ÖV, die vom Teilmodell ÖV-System überwacht werden, sind zusätzlich in einer von den normalen Fahrzeugketten getrennten Kette erfaßt. Damit sind alle spezifischen Funktionen schnell und gezielt durchführbar.

Die Prozedur ÖPNV-BEARBEITEN (Abb. 9.3-9) überwacht die Fahrtverläufe aller Fahrzeuge und leitet verschiedene ÖV-spezifische Zustandsübergänge ein. Außerdem werden die Fahrzeugpositionen erfaßt (Nachbildung der Fahrzeugortung).

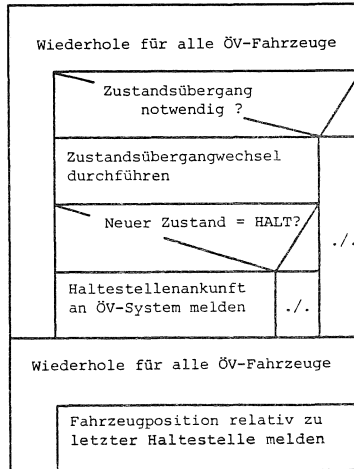


Abb. 9.3-9 Ablaufstruktur Prozedur ÖPNV-BEARBEITEN

Die Zustände von ÖV-Fahrzeugen werden im Modell unterschieden nach:

- FREI: Fahrzeug nicht im Bereich einer Haltestelle; freie Fahrt wie Individualverkehr.
- BREMST: Fahrzeug befindet sich im Anmeldebereich einer Haltestelle. In diesem Zustand kennt das Fahrzeug seinen zukünftigen Vordermann in der Haltestelle (Organisationsfahrzeug am Haltepunkt oder anderes ÖV-Fahrzeug im Anmeldebereich) und reagiert bei Bedarf auf diesen Vordermann.

- HÄLT: Fahrzeug hält an der Haltestelle auf einem Fahrgastwechselplatz und hat seine Haltestellenankunft beim ÖV-System angemeldet. Das Fahrzeug wartet auf den Abfahrtsbefehl vom ÖV-System.
- BEREIT: Fahrzeug hat die Freigabe für die Abfahrt aus einer Haltestelle bekommen, wartet aber evtl. noch auf einen Vordermann (z.B. Straßenbahn in Doppelhaltestelle) oder auf ein Lichtsignal direkt an der Haltestelle.
- ABGEMELDET: Das Fahrzeug hat die letzte Haltestelle seiner Linie verlassen und wird damit vom ÖV-System nicht mehr geführt. Das Fahrzeug fährt wie ein Fahrzeug des Individualverkehrs bis zum Ende der simulierten Strecke und wird dann aus dem zu bearbeitenden Fahrzeugkollektiv entfernt.

Nach dem Aufruf der Prozedur ÖPNV-BEARBEITEN wird vom Prozeß ZEITSCHRITT der Modellteil "ÖV-System" aktiviert, der die neuen Informationen über die Fahrzeugankünfte an Haltestellen und Fahrzeugpositionen auswertet. Abfahrtsaufträge an ÖV-Fahrzeuge werden über die Schnittstelle zurückgegeben.

Die Prozedur ÖPNV-STARTEN, die vom Prozeß ZEITSCHRITT direkt anschließend aktiviert wird, leitet die Durchführung von Abfahrtsaufträgen ein (Abb. 9.3-10). Es wird zuerst geprüft, ob das entsprechende Fahrzeug bereits im System vorhanden ist. Ist das der Fall, so wird das Fahrzeug freigegeben (Zustand BEREIT). Ist das Fahrzeug noch nicht bekannt, so wird ein neues Fahrzeug

generiert und entweder (an einer Inputhaltestelle) "fliegend" (wie Fahrzeuge des Individualverkehrs) eingesetzt oder an einer Standardhaltestelle mit dem Zustand BEREIT plaziert.

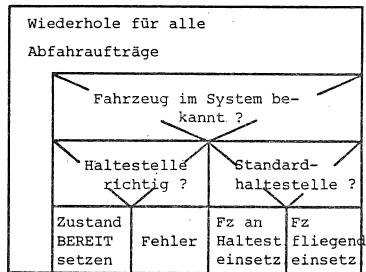


Abb. 9.3-10 Ablaufstruktur Prozedur ÖPNV-STARTEN

9.3.10 Klasse TRANSFER

Im Modul TRANSFER werden alle Schnittstellenfunktionen für die Zusammenarbeit mit den Teilmodellen SIGNAL-STEUERUNG und ÖV-System abgewickelt. Die wesentlichen Prozeduren dienen zur Initialisierung der aufzurufenden Teilmodelle (Prozedur INIT-SCHNITTSTELLE) und zum Austausch von Daten in jedem Zeitschritt (Prozedur SCHNITTSTELLE).

10. Eigenschaften des Simulationssystems

Das Simulationssystem MISSION wurde auf den Rechenanlagen UNIVAC 1108/1106 des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe entwickelt. Alle Leistungsfähigkeitsangaben beziehen sich auf diese Implementierung. Es wurde der SIMULA-Compiler Version 3R5 des norwegischen Rechenzentrums Oslo (NCC) verwendet. Dieser umfaßt den Sprachumfang des "Common Base SIMULA" und ermöglicht darüber hinaus die getrennte Übersetzung externer Prozeduren und Klassen. Außerdem sind zusätzliche Prozeduren zur schnellen binären Ein- und Ausgabe verfügbar. Es ist nicht möglich, mit diesem Compiler übersetzte Programme segmentiert zu laden.

10.1 Umfang des Programmsystems

Das Programmsystem MISSION besteht im Maximalausbau aus 19 Modulen, die jeweils getrennte Übersetzungseinheiten bilden. Aus diesen wird der Eingabeprozessor MISS (9 Module) und der Simulationsprozessor MISSION (max. 13 Module) aufgebaut. Nicht berücksichtigt sind hier Alternativversionen für das Interaktionsmodell (Stadtstraße/Autobahn), das Modul TRANSFER zur Anpassung an unterschiedliche Steuerungsmodelle sowie unterschiedliche Versionen der Hauptprogramme MISS und MISSION für Anwendungen im Batch- oder Dialogbetrieb bzw. zur Simulation mit einem Teil der Module des Maximalsystems.

Die Module umfassen jeweils ungefähr 200 bis 1 200 Zeilen Programmtext; insgesamt ist das Programmsystem zur Simulation des Verkehrsablaufs ungefähr 12 000 Programmzeilen groß.

Zur Nachbildung von Steuerungsmodellen stehen unterschiedliche Programme zur Verfügung. Diese erlauben in einer einfachen Stufe die Nachbildung von Festzeitssteuerungen für Lichtsignalanlagen und Taktfahrpläne mit festen Haltestellenaufenthaltszeiten im ÖV. Es steht jedoch auch ein komplexes Steuerungsmodell zur Verfügung (MOTT, 1982), das die Nachbildung unterschiedlicher Algorithmen zur verkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerung unter Berücksichtigung des ÖV ermöglicht. Darüber hinaus können die für die Führung von ÖV-Fahrzeugen und zur Lichtsignalbeeinflussung sinnvollen Funktionen eines Betriebsleitsystems für den ÖV nachgebildet werden (vgl. HUBSCHNEIDER et al., 1981).

10.2 Speicherbedarf

Der Speicherbedarf von SIMULA-Programmen ist unterscheidbar nach Kode- und Datenbereichen. Die Länge des Codebereichs liegt nach dem Binden des Programms fest. Zusätzlich wird während der Laufzeit Speicher für statische Variablen und für dynamische Datenbereiche (Klassen, Felder mit variabler Länge, rekursive Prozeduraufrufe usw.) benötigt. Dieser Speicher wird vom Laufzeitsystem der Programmiersprache selbständig verwaltet.

Der SIMULA-Compiler für UNIVAC-Anlagen erlaubt als Obergrenze für die beiden Speicherbereiche jeweils 64 k Maschinenworte (1 kWorte = 1024 Worte, Wortlänge 36 bit).

Der Speicherbedarf im Codebereich ist ausschließlich von der Programmgröße abhängig. Es werden ca. 40 kWorte

für den Prozessor MISS benötigt. Der Prozessor MISSION erfordert in der kleinsten Version (Simulation des Verkehrsablaufs auf Richtungsfahrbahnen) ca. 30 kWorte. Im Maximalausbau werden ca. 45 kWorte benötigt. Hinzu kommt hier aber noch der Speicher für die Programmbereiche "Signalsteuerungsmodell" bzw. "ÖV-System". Dieser beträgt für ein einfaches Modell mit Festzeitsteuerung und festem ÖV-Taktfahrplan ca. 5 kWorte, während das verfügbare komplexe Steuerungsmodell (Programmiersprache FORTRAN) (HUBSCHNEIDER et al., 1981), das segmentiert geladen wird, den gesamten noch verfügbaren Speicherplatz (19 kWorte) benötigt. Diese Speicherbelegung schließt dann allerdings auch alle erforderlichen Datenfelder für die FORTRAN-Prozeduren ein, da diese nicht in die SIMULA-Speicherverwaltung einbezogen werden können.

Der Bedarf an dynamischem Speicher ist im Prozessor MISS linear von der Komplexität des nachgebildeten Netzausschnitts, d.h. von der Anzahl der Streckenbausteine, Entscheidungen, Störungen usw., abhängig. Die statischen Programmparameter erfordern ca. 5 kWorte Speicherplatz. Ein einzelner Datenblock benötigt ca. 20 - 40 Maschinenworte. Der Speicherbedarf für mittlere Netze mit 10 komplexen Knoten (dies entspricht ca. 500 Einzelblöcken) beträgt damit etwa

$$5 \text{ kWorte} + 500 \times 30 \text{ Worte} = 20 \text{ kWorte.}$$

Im Programmteil MISSION beträgt der statische Datenbereich ebenfalls ca. 5 kWorte. Die Aktiv-Klassen, die jeweils einen Datenblock repräsentieren, belegen im Mittel etwa 20 Maschinenworte, so daß bei mittleren Netzen 15 kWorte des Speichers durch statische Daten und die Simulations-

strukturen belegt sind. Der übrige Speicherbereich steht für die Fahrzeugdatenblöcke zur Verfügung. Jedes Fahrzeug benötigt ca. 30 Maschinenworte. Bei Ausnutzung der maximalen Größe des dynamischen Speichers von 64 kWorten können damit bei einem mittleren Netz die Verhaltensweisen von bis zu 1 500 Fahrzeugen gleichzeitig nachgebildet werden. Bei der Simulation einer Richtungsfahrbahn, wo die Beschreibung der Simulationsstruktur nur wenig Platz benötigt, können dagegen bis zu 2 000 Fahrzeuge gleichzeitig bearbeitet werden.

Es ist anzumerken, daß zwar einerseits die obige Abschätzung nur für die begrenzten Speicherverwaltungsmöglichkeiten des SIMULA-Compilers für UNIVAC-Anlagen gilt - Compiler auf anderen Großrechenanlagen setzen diese Grenzen meist nicht -, andererseits aber auch eine sinnvolle Obergrenze gleichzeitig bearbeiteter Fahrzeuge unter Beachtung des Rechenzeitbedarfs für die Simulation und der anfallenden Datenmengen ist.

10.3 Rechenzeit

Die Abschätzung des Rechenzeitbedarfs erfolgt auf der Basis der Implementierung des Simulationssystems auf der Anlage UNIVAC 1108. Zur Abschätzung der Programm-
laufzeit auf anderen Rechenanlagen und zum Vergleich mit einem anderen Simulationsmodell des Verkehrsablaufs werden die absoluten Laufzeiten in Bezug gesetzt zu der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Rechner.

Der Rechenzeitbedarf für den Eingabeprozessor MISS beträgt bei mittleren Netzen mit 10 komplexen Knotenpunkten ca. 60 Sekunden CPU-Zeit (Rechnerkernzeit ohne Ein-/Ausgabezeit, Wartezeit usw.). Die Rechenzeit ist weitgehend linear abhängig von der Netzgröße, d. h. der Anzahl der Datenblöcke.

Der Simulationsprozessor (Verkehrsablauf einschließlich Teilmodelle SIGNALSTEUERUNG und ÖV-SYSTEM) realisiert für jedes betrachtete Fahrzeug im Mittel einen Zeitfaktor

$$\text{simulierte Zeit/Rechenzeit} = 300:1$$

Das Simulationsmodell ermöglicht es also, bei voll verfügbarer Rechenleistung eine Stunde Verkehrsablauf in einer Stunde Rechenzeit zu simulieren, wenn im Mittel immer gleichzeitig 300 Fahrzeuge bearbeitet werden müssen; oder es kann der Fahrtverlauf eines einzelnen Fahrzeugs im Zeitraffertempo 300:1 nachgebildet werden.

Der Rechenzeitbedarf ist weitgehend linear abhängig von der Anzahl simulierter Fahrzeug-Sekunden.

Ein Vergleich mit anderen Simulationsmodellen für den Verkehrsablauf in innerstädtischen Straßennetzen ist nur grob und unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Rechnerleistungsfähigkeit möglich. Als Abschätzung der Rechnerleistung soll der Leistungsparameter "MIPS" (Million Instructions per Second) herangezogen werden. Es leisten in grober Näherung

UNIVAC 1108: 0,8 MIPS

und vergleichsweise

CDC 7600: ca. 3-4 MIPS

IBM 3033: ca. 4-5 MIPS.

Das in den USA weitverbreitete Simulationsmodell für Stadtstraßen NETSIM (ehemals UTCS - 1) ermöglicht einen Abbildungsfaktor von ca. 4000:1 auf CDC 7600 (Quelle: DAVIL, LIEBERMANN, 1980). Dies entspricht auf den UNIVAC-Anlagen einem Zeitfaktor von ca. 700:1 bezogen auf gleiche MIPS-Bewertung. Damit ist dieses Modell etwa zwei- bis dreimal schneller. Es ist allerdings anzumerken, daß von NETSIM weitestgehend optimierte FORTRAN-Versionen eingesetzt werden, während MISSION unter einem zwar sehr komfortablen, aber langsamen SIMULA-eigenen Laufzeitsystem arbeitet; und daß die Detailliertheit von NETSIM gegenüber der von MISSION deutlich geringer ist. Eine Optimierung des Simulationsprozessors MISSION im Hinblick auf eine Reduzierung der Rechenzeit wäre bei Bedarf leicht möglich (Entfernen aller internen Trace-Funktionen, Abschalten der Laufzeitüberwachung für Feldgrenzen und Referenzzuweisungen, weitgehender Übergang auf ganzzahlige Arithmetik).

10.4 Portabilität

Das Simulationssystem MISSION baut auf dem Common-Base-Standard der Sprache SIMULA auf. Zur Erhöhung der Ein-/Ausgabegeschwindigkeit wurden zusätzliche Möglichkeiten der binären Ein-/Ausgabe benutzt, die aber bei den meisten SIMULA-Compilern verfügbar sind.

Alle über den Sprachstandard hinausgehenden Prozeduren sind in einem Modul zusammengefaßt. Dieses muß ausgetauscht werden, wenn eine Anpassung an eine andere Rechenanlage durchgeführt werden soll. Prinzipiell können alle Prozeduren dieses Moduls auch in Standard-SIMULA programmiert werden. Dabei sind jedoch größere Programmlaufzeiten zu erwarten. Entsprechend könnte auf die Systemfunktionen zur Überwachung von Rechenzeit- und Speicherbedarf verzichtet werden. Diese dienen ausschließlich zur Information der Benutzer des Programmsystems.

Das Simulationssystem wurde bereits erfolgreich auf eine Rechenanlage des Typs CDC Cyber 74 übertragen. Hier waren allerdings neben dem Austausch der Umgebungsklasse EINGABE Änderungen in logischen Ausdrücken erforderlich, da die entsprechenden Auswertungsalgorithmen des CDC-SIMULA-Compilers nicht der Common-Base-Sprache entsprechen (HEINZ, 1983).

11. Eichung und Validierung

Unter der Eichung eines Simulationsmodells versteht man die Anpassung der Modellstruktur und der modellinternen Parameter an gemessene Daten so weit, daß die interessierenden Vorgänge der Realität mit dem Modell genügend genau nachgebildet werden können. Die modellinternen Parameter sind dabei zu unterscheiden von den Eingabeparametern (z. B. Wunschgeschwindigkeitsverteilungen im Modell des Verkehrsablaufs), die lediglich zur Nachbildung verschiedener "Varianten" der Realität dienen.

Die Validierung ist im Gegensatz zur Eichung der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Modells, d. h. der Vergleich von Simulationsergebnissen mit Meßdaten, wobei die modellinternen Parameter nicht mehr verändert werden. Es ist im strengen Sinne lediglich eine Anpassung der Eingabeparameter an die nachzubildende reale Situation zulässig.

Das hier beschriebene Simulationsmodell beinhaltet eine Vielzahl von Teilmodellen, die z. B. das Fahrzeugfolgeverhalten oder das Spurwechselverhalten von Einzelfahrzeugen beschreiben und in ihrer Gesamtheit das Interaktionsmodell bilden. Alle anderen Modellbereiche nehmen ausschließlich organisatorische Aufgaben wahr.

Die Eichung des Gesamtmodells im Hinblick auf alle Anwendungsmöglichkeiten konnte sich aus diesem Grund auf eine Eichung des Interaktionsmodells beschränken.

Darüber hinaus hat der Anwender Zugang zu modellinternen Steuerparametern bzw. kann solche Parameter über die Eingabedaten beeinflussen. Das Simulationsmodell kann damit einfach an unterschiedliche Aufgabenstellungen und auch an unterschiedliche "Realitäten" angepaßt werden. Entsprechend muß auch die Validität des Modells für den jeweiligen Anwendungsfall nach Anpassung der spezifischen Parameter bzw. der Eingabedaten geprüft werden. Beispielhafte Anwendungen und Validitätsnachweise sind z. B. in HUBSCHNEIDER et al. (1981) wiedergegeben.

12. Möglichkeiten der Anwendung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell MISSION ist für ein sehr breites Anwendungsspektrum konzipiert. Es werden einige Anwendungsfälle vorgestellt, die exemplarisch unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten aufzeigen.

12.1 Entwicklung von Interaktionsmodellen

Das Interaktionsmodell als Kern des Modells MISSION ist innerhalb eines genau abgegrenzten Moduls des Systems realisiert.

Bei Entwicklungs- und Testarbeiten an Interaktionsmodellen kann das Gesamtmodell sinnvoll als "Entwicklungssystem" genutzt werden. Dieses System stellt die gesamte organisatorische Umgebung für das Interaktionsmodul (einschließlich der jeweils für eine Interaktionsentscheidung relevanten Fahrzeuge) zur Verfügung. Darüber hinaus können die komfortablen Trace- und Überwachungsfunktionen des Simulationssystems genutzt werden. Zur Bewertung der Modelländerungen stehen die Datenerfassungsmodule des Systems und die entsprechenden Auswerteprogramme zur Verfügung.

12.2 Untersuchung und Bewertung von Steuerungsmodellen

Das Simulationsmodell des Verkehrsablaufs stellt eine Schnittstelle zu Steuerungsmodellen für IV und ÖV zur Verfügung, die die Nachbildung aller z. Z. technisch realisierbaren Erfassungs- und Steuerungsmöglichkeiten erlaubt. Es können beliebige Verkehrsabläufe simuliert und an beliebigen Fahrbahnquerschnitten Erfassungseinrichtungen (ortsfeste Detektoren) nachgebildet werden. Darüber hinaus können Fahrzeuge auch direkt erfaßt werden, wie dies z. B. mittels Datenfunkkommunikation innerhalb eines rechnergesteuerten Betriebsleitsystems für den öffentlichen Verkehr realisiert ist.

Aufgrund der mikroskopischen Nachbildung der Fahrtverläufe von Einzelfahrzeugen können die Steuerungsmodelle über sehr wirklichkeitsnahe Detektordaten verfügen. Dies ist insbesondere bei der Untersuchung verkehrsunabhängiger Verfahren, die auf der Erfassung von Folgezeitlücken oder auf der Ortung von ÖV-Fahrzeugen aufbauen, sehr nützlich.

Das Simulationsmodell ermöglicht darüberhinaus eine sehr genaue Quantifizierung der Einflüsse unterschiedlicher Steuerungsverfahren auf den Verkehrsablauf. Mit geeigneten Auswerteprogrammen können alle für eine vergleichende Bewertung sinnvollen verkehrstechnischen Kenngrößen des simulierten Verkehrsablaufs ermittelt werden.

12.3 Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf und Umweltbelastung

Die Forschung in der Verkehrstechnik beschäftigt sich zunehmend mit den Zusammenhängen zwischen Verkehrsablauf einerseits und Kraftstoffverbrauch, Lärm- und Schadstoffemission von Fahrzeugen andererseits. Mikroskopische Simulationsmodelle mit hoher Realitätsnähe stellen ein wichtiges Hilfsmittel zur Untersuchung dieser Zusammenhänge zur Verfügung.

Am Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe wurden Verfahren entwickelt, die die Berechnung von Verbrauchs- und Emissionswerten einzelner Fahrzeuge in Abhängigkeit von mikroskopischen Fahrzuständen (Geschwindigkeit und Beschleunigung innerhalb eines Zeitschritts) erlauben (SIEGENER, HUBSCHNEIDER et al., 1980). Diese Berechnungsverfahren können zusammen mit dem Simulationsmodell nutzbringend eingesetzt werden, um Einflüsse der Zusammensetzung eines Fahrzeugkollektivs auf die Umweltbelastung und um makroskopische Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf und Umweltbelastung zu untersuchen.

Das Simulationsmodell MISSION ermöglicht die Nachbildung von Verkehrsabläufen bei unterschiedlicher Zusammensetzung der Fahrzeugkollektive aus fahrdynamischer Sicht (Beschleunigungsvermögen, maximal mögliche Geschwindigkeit). Die nachgeschalteten Berechnungsprogramme können ebenfalls diese Variation der Kollektive berücksichtigen. Damit sind Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen den

Verbrauchs- und Emissionswerten der unterschiedlichen Kollektive und dem Verkehrsablauf möglich.

Andere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Ableitung von Zusammenhängen zwischen verkehrlichen Parametern wie Reisezeitverteilungen oder mittleren Haltezeiten und den Verbrauchs- bzw. Emissionskenngrößen der Einzelfahrzeuge. Das Simulationsmodell ermöglicht durch die mikroskopische Berechnung des Verbrauchs und der Emission einen Vergleich dieser Werte mit den verkehrlichen Parametern. Damit ist ein Werkzeug vorhanden, mit dem ohne aufwendige und im Bereich des Emissionsverhaltens technisch noch nicht durchführbare Messungen die Abhängigkeiten zwischen solchen Summenwerten untersucht werden können. Gleichzeitig ist es möglich, Bezüge zu makroskopischen Kenngrößen des Verkehrsablaufs oder zu Parametern von Steuerungsverfahren herzustellen.

Literatur

BOLL, C. (1979):

Verkehrsablauf vor einspurigen Engpässen.
Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät
für Bauingenieur- und Vermessungswesen

BRANNOLTE, U. (1978):

Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungs-
fahrbahnen.
Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät
für Bauingenieur- und Vermessungswesen

DAVIL, M.C.; LIEBERMAN, E.B. (1980):

Hybrid Macroscopic-Microscopic Traffic Simulation
Model.
Transportation Research Record No. 772, Washington D.C.

GIBSON, D.; ROSS, P. (1977):

Simulation of Traffic in Street Networks.
Transportation Engineering, December 1977

GIPPS, P.U. (1979):

Computer User Manuals for Program Package "MULTSIM"
Multilane Traffic Simulation.
CSIRO, Division of Building Research, Melbourne,
Australien

HANDSCHMANN, W. (1978):

Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer
Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informations-
verarbeitung des Kraftfahrzeugführers.
Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät
für Bauingenieur- und Vermessungswesen

HEINZ, G. (1983):

Untersuchungen zur Signalisierung städtischer Straßennetze unter besonderer Berücksichtigung vorhandener Stauräume.

Schlußbericht zum Forschungsauftrag FA 03.101G78D des Bundesministers für Verkehr, Universität Stuttgart, Juli 1983

HERMAN, R.; ROTHERY, R.W. (1963):

Car Following and Steady State Flow.
Proceedings International Symposium on Theory of Traffic Flow, London, pp. 1-11

HUBSCHNEIDER, H.; LEUTZBACH, W.; WIEDEMANN, R. (1977):

Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mit zweispurigen Richtungsfahrbahnen im Hinblick auf empirisch nicht ausreichend verifizierbare Situationen.

Bericht zum Forschungsauftrag 7450/12 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Köln

HUBSCHNEIDER, H.; MOTT, P.; THAMM, P. et al (1981):

Informationstechnische Grundlagen für Leitsysteme im Straßenverkehr.

Bericht zum Forschungsauftrag TK0079 des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT), Universität Karlsruhe (unveröffentlicht)

JABLONSKI, A. (1978):

Psychophysisches Modell zur Simulation des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Knotenpunkten.

Dissertation TH Warschau, Polen

JACOBS, F. (1969):

Probleme der stochastischen Theorie des Verkehrsablaufs auf Straßen.

Dissertation Universität Stuttgart

KUBEL; BLOODGOOD; WORKMON; GIBSON (1978):

What Network Simulation (NETSIM) can do for the
Traffic Engineer.
Public Roads, Vol. 41, No. 4

LEE; RIOUX; COPELAND (1977):

The TEXAS Model for Intersection Traffic -
Development.
Research Report 184-1, Center for Highway Research,
University of Texas, Austin

LEICHTER, K. (1981):

Simulationsmodell zur Bewertung einer integrierten
Verkehrslenkung in Stadtnetzen.
Dissertation TU Berlin, Fachbereich Verkehrswesen

LIEBERMAN, E.B. (1971):

Logical Design of the SCOT Model.
KLD Assoc., Inc., Technical Memo 1, Huntington, N.Y.

LIEBERMAN; WORRELL; BRUGGEMAN (1972):

Logical Design and Demonstration of UTCS-1 Network
Simulation Model.
Highway Research Record No. 409, HRB Washington

LIEBERMAN; WORRELL; BRUGGEMAN (1971):

Network Flow Simulation for Urban Traffic Control
System.
KLD Assoc., Technical Report FH-11-7462-2,
Huntington, New York

LUDWICK, J.S. (1976):

Bus Priority Systems: Simulation and Analysis.
Department of Transportation, Washington D.C.

MOTT, P. (1982):

Steuerung von Lichtsignalanlagen und Priorisierung
von ÖPNV-Fahrzeugen.
Dissertation Universität Karlsruhe (in Vorbereitung)

SIEGENER, W.; HUBSCHNEIDER, H. (1980):

Simulation der Veränderungen des Verkehrsablaufs.
Schlußbericht zum Forschungsprojekt 7814/2 der
Bundesanstalt für Straßenwesen,
IVT Karlsruhe, März 1980

STEGEMANN, H.S. (1979):

Simulation und Bewertung von Verkehr in signal-
gesteuerten Stadtstraßennetzen.
Dissertation RWTH Aachen, Fakultät für
Elektrotechnik

WAGNER, F.A. (1972):

SIGOP/TRANSYT Evaluation.
San José, Cal. Federal Highway Administration,
Washington

WAGNER, F.A.; GERLOUGH, D.L. (1966):

Urban Arterial and Network Simulation.
Planning Research Corporation, Los Angeles,
U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads

WETTERLING, K. (1979):

Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen
Fahrvorschriften.
Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät
für Bauingenieur- und Vermessungswesen

WICKS, D.A.; LIEBERMAN, E.B. (1976):

Development and Testing of INTRAS, a Microscopic
Freeway Simulation Model.
Federal Highway Administration, Washington D.C.

WIEDEMANN, R. (1974):

Simulation des Straßenverkehrsflusses.
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen,
Universität Karlsruhe, Heft 8

WILLMANN, G. (1979):

Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen.
Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät
für Bauingenieur- und Vermessungswesen

WOLFE, R.; ROBERTS, R. (1979):

Application of the UTCS-1 Simulation Model to Traffic
Signal Systems.
ITE Journal, May 1979

WORRAL, R.D.; LIEBERMAN, E. (1974):

Network Flow Simulation for Urban Traffic Control
Systems, Phase II, Volumes I-V.
Report FHWA-RD-73-83/87, Federal Highway Administra-
tion, Washington D.C.

Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen

Schriftenreihe des Instituts

- Heft 1: Baron, P.S.: Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-Empfangsanlagen; 1967. +)
- Heft 2: Stoffers, K.E.: Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen; 1968. +)
- Heft 3: Koehler, R.: Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung; 1968. +)
- Heft 4: Böttger, R.: Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Straßenkreuzungen; 1970. +)
- Heft 5: Droste, M.: Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs; 1971.
- Heft 6: 10 Jahre Institut für Verkehrswesen; 1973. +)
- Heft 7: Bey, I.: Simulationstechnische Analyse der Luftfrachtabfertigung; 1972. +)
- Heft 8: Wiedemann, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses; 1974.
- Heft 9: Köhler, U.: Stabilität von Fahrzeugkolonnen; 1974.
- Heft 10: Thomas, W.: Sensitivitätsanalyse eines Verkehrsplanungs-Modells; 1974.
- Heft 11: Pape, P.: Weglängen-Reduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung; 1976.
- Heft 12: Koffler, Th.: Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg; 1977. +)
- Heft 13: Haenicke, W.: Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit; 1977. +)
- Heft 14: Bahm, G.: Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme; 1977. +)

- Heft 15: Laubert, Wolf: Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen; 1977.
- Heft 16: Sahling, B.-M.: Verkehrsablauf in Netzen - Ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren -; 1977. +)
- Heft 17: Zahn, E. M.: Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze; 1978.
- Heft 18: Handschmann, W.: Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers; 1978.
- Heft 19: Willmann, G.: Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen; 1978. +)
- Heft 20: Sparmann, U.: ORIENT - Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose; 1980. +)
- Heft 21: Allsop, R. E.: Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen; 1980. +)
- Heft 22: Adolph, U.-M.: Systemsimulation des Güterschwerverkehrs auf Straßen; 1981.
- Heft 23: Jahnke, C.-D.: Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstandswarnsystemen; 1982.
- Heft 24: Leutzbach, W.: Verkehr auf Binnenwasserstraßen; 1982.
- Heft 25: 20 Jahre Institut für Verkehrswesen; 1982
- Heft 26: Hubschneider, H.: Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Personennahverkehr; 1983

Vorläufige Berichte des Instituts

- Nr. 1: Leutzbach, W., Koehler, R.: Binnenwasserstrassenverkehr als Zufallsverteilung; 1964.
- Nr. 2: Eick, P.: Experimentelle Überprüfung des Folgetests von WALD; 1964
- Nr. 3: Bexelius, S.: Größen der Verkehrstheorie - ihre Definition und Anwendung; 1965.
- Nr. 4: Leutzbach, W., Ernst, R.: Untersuchung über den Einfluß der Fahrbahnmarkierung auf das Verhalten der Fahrzeuglenker; 1965.
- Nr. 5: Gullón Löw, M.: Die Planung des spanischen Stadt- und Landstraßennetzes; 1965. +)
- Nr. 6: Bexelius, S.: An extended Model for Car Following; 1965.
- Nr. 7: Bexelius, S.: Beschreibung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf verschiedene Arten von Engpässen; 1965. +)
- Nr. 8: Leutzbach, W., Lenz, K.-H.: Wartezeitverluste an Schleusen; 1966.
- Nr. 9: Martin, W.: Zeitstudie über die Passagierabfertigung am Flughafen Stuttgart; 1967. +)
- Nr. 10: Droste, M.: Parkraumerhebungen in Intervallen; 1968.
- Nr. 11: Leutzbach, W.: Bewegung als Funktion von Zeit und Weg; 1968 (reprinted in Transportation Research, Vol 3 (1969) 421-428).
- Nr. 12: Droste, M.: Die Berechnung optimaler Signalzeitenpläne als Problem der ganzzahligen linearen Programmierung; 1969.
- Nr. 13: Ludes, K., Siegener, W.: Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes Fahrverhalten; 1969.
- Nr. 14: Haigh, F.A.: Problems in Transport Safety; 1970.
- Nr. 15: Dilling, J.: Reisegeschwindigkeit und Straßencharakteristik; 1970. +)

- Nr. 16: Coblentz, H.S.: Transportation Planning and Social Issues: Function and Dysfunction; 1971. +)
- Nr. 17: Köhler, U.: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsganglinie bzw. Geschwindigkeitsprofil und Häufigkeitsdichte der Geschwindigkeiten; 1971. +)
- Nr. 18: Brilon, W.: Der Zusammenhang zwischen räumlich-zeitlichen Kennwerten des Verkehrsablaufs und lokal ermittelten Parametern; 1973. +)
- Nr. 19: Vásárhelyi, B.: Stochastische Simulation an Straßenkreuzungen nach dem "rechts-vor-links-Prinzip"; 1975.
- Nr. 20: Bahm, G., Laubert, W.: Modelle zur Simulation des Betriebsablaufs von neuen Personennahverkehrssystemen; 1977.
- Nr. 21: Wiedemann, R, Brilon, W., Brannolte, U.: Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen; 1977.
- Nr. 22: Brannolte, U., Vásárhelyi, B.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf kurvigen Landstraßen; 1977. +)
- Nr. 23: Sparmann, U.: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Vorbeifahrtenhäufigkeit auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen; 1979.
- Nr. 24: Stucke, G.: Ermittlung der Teilströme aus Querschnittsmessungen; 1979.
- Nr. 25: Leutzbach, W.: Zur Problematik der Messungen und Beobachtungen aus einem fahrenden Fahrzeug; 1981.

Institutsnotizen

- Nr. 1: Bisbee, E.F.: Beispiele zur Transportanalyse; 1967 +)
(übersetzt von W. Siegener)
- Nr. 2: Vergleich einiger Verkehrserzeugungs- und Verteilungs-
modelle; Seminarbericht SS 1968 +)
- Nr. 3: Berechnungsbeispiel zum Verkehrsablauf an Engpässen;
Seminarbericht WS 1968/69
- Nr. 4: Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des +)
Straßennetzes und der Kapazität des Parkraums; Se-
minarbericht SS 1969
- Nr. 5: Brilon, W.: Erzeugung von Zufallszahlen; 1970
- Nr. 6: Dilling, J.: Charakteristik des Verkehrsablaufs
auf einem Autobahnabschnitt; 1970
- Nr. 7: Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verschie-
dener Ausbauvarianten einer Straßenkreuzung;
Seminarbericht WS 1969/70
- Nr. 8: Untersuchung der Verkehrssicherheit einer Straßen-
kreuzung; Seminarbericht SS 1970
- Nr. 9: Einsatz eines Kabinen-Taxi-Systems
(CAT) für den Bereich der Universität Karlsruhe;
Seminarbericht SS 1971
- Nr. 10: Wirtschaftlichkeitsrechnung im Straßenbau - ein
Optimierungsbeispiel; Seminarbericht WS 1971/72
- Nr. 11: Möglichkeiten der Steuerung von Lichtsignalanlagen
in städtischen Netzen; Seminarbericht SS 1972
- Nr. 12: Exkursionsbericht SS 1973
- Nr. 13: Unfalluntersuchung und Stauberechnung auf einem +)
Abschnitt der Bundesautobahn; Seminarbericht SS 1973
- Nr. 14: Wochenendverkehr im nördlichen Schwarzwald; +)
Seminarbericht WS 1973/74
- Nr. 15: Geschwindigkeitsbeschränkungen; Seminarbericht SS 1974
- Nr. 16: Autohöfe - ihre Bedeutung für den Güterverkehr;
Seminarbericht WS 74/75
- Nr. 17: Die Karlsruher Häfen; Seminarbericht SS 1975
- Nr. 18: Lärmschutz an Straßen; Seminarbericht WS 75/76 +)

- Nr. 19: Der Einfluß des Fluglärms auf Planung und Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen; Seminarbericht SS 1976
- Nr. 20: Kombiniertes Verkehr; Seminarbericht WS 76/77
- Nr. 21: Koordinierung eines Straßenzuges mit Lichtsignalanlagen; Seminarbericht SS 1977
- Nr. 22: Die Sicherheit von Verkehrssystemen; Seminarbericht WS 77/78
- Nr. 23: Verkehrsablauf als Warteschlangenproblem; Seminarbericht SS 1978
- Nr. 24: Bordsteinparken; Seminarbericht WS 78/79 +)
- Nr. 25: Verkehrssteuerungssysteme; Seminarbericht SS 1979
- Nr. 26: Das Planspielmodell PLUS; Seminarbericht WS 79/80
- Nr. 27: Stauwarnanlagen auf Bundesautobahnen; Seminarbericht SS 1980
- Nr. 28: Planungsmodelle im Verkehrswesen; Seminarbericht WS 80/81 noch nicht erschienen
- Nr. 29: Linienplanung im öffentlichen Personennahverkehr; Seminarbericht SS 1981

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

- Leutzbach, W., Bexelius, S.: Probleme der Kolonnenfahrt; Heft 44 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1966.
- Lenz, K.-H.: Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie der Warteschlangen; Heft 66 der Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Kirschbaum Verlag, Bad Godesberg, 1966.
- Ernst, R.: Verkehrsablauf an Straßenknoten; Heft 60 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1967.
- Wiedemann, R.: Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen - Untersuchungen über die Ausbreitung von Fahrzeugpuls; Heft 74 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1968.
- Ziegler, M.: Wegewahl als Regelkreis - Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wegewahl, Reisezeiten und Verkehrsmengen; Heft 99 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1970.
- Hoefs, D. H. : Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen; Heft 140 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1972.
- Dilling, J.: Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken; Heft 151 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1973.
- Leutzbach, W., Wetterling, K.: Kurzfassungen ausgewählter Arbeiten aus der Bundesrepublik Deutschland, Techn. Untersuchungen; Heft 3 der Schriftenreihe "Forschung Stadtverkehr - Sonderreihe", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1974.
- Findeisen, H.-G.: Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeuge an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen; Heft 178 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1975.
- Brilon, W.: a) Unfallgeschehen und Verkehrsablauf.
b) Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen; Heft 201 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1976.

- Brilon, W., Brannolte, U.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Straßen mit Gegenverkehr; Heft 239 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1977.
- Handschmann, W., Voss, M.: Der Mensch als Fahrzeugführer; Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Menschen; Heft 8 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1978.
- Leutzbach, W. et al.: Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell; Heft 9 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1978.
- Sparmann, U.: Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen; Heft 263 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1978.
- Martin, W.: Verkehrsablauf auf Stadtstraßen mit Lichtsignalanlagen; Heft 268 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1979.
- Mohamed Ibrahim, M. Y.: Modell zur Anpassung eines städtischen Erschließungsnetzes an die wachsende Motorisierung in Entwicklungsländern unter besonderer Berücksichtigung des Radverkehrs; Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1979.
- Koffler, Th., Metzger, W.: Untersuchung über zweckmäßige Zeit- und Wegeabschnitte zur Erfassung des Verkehrsablaufs; Heft 283 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.
- Boll, C.: Reißverschlußverfahren zur Regelung des Verkehrs an Engstellen; Heft 291 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.
- Wetterling, K.: Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen Fahrvorschriften; Heft 292 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.
- Leutzbach, W. et al.: Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell, 2. Teil; Heft 16 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1980.
- Brannolte, U.: Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen; Heft 318 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.

Winzer, Th.: Messung von Beschleunigungsverteilungen; Heft 319 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.

Leutzbach, W., Beil, D.: Ein Matrixmodell zur Ermittlung der Verkehrsbelastung in Netzen; Heft 338 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1981

Leutzbach, W., Maier, W., Handschmann, W., Schuler, M.:
a) Einfluß von Verkehrsbeschränkungen und Ausbauförmern auf die Sicherheit an plangleichen, außerörtlichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen.
b) Einfluß von Verkehrsbeschränkungen und Ausbauförmern auf die Sicherheit an plangleichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen außerhalb bebauter Gebiete; Heft 376 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1982 (in Vorbereitung)

Im Buchhandel erhältlich:

Lenz, K.-H., Garsky, J.: Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Straßenverkehrstechnik; Kirschbaum-Verlag 1968

Leutzbach, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses; Springer-Verlag 1972.

Beckmann, H., Jacobs, F., Lenz, K.-H., Wiedemann, R., Zackor, H.: Das Fundamentaldiagramm; Kirschbaum-Verlag 1973.

Ruppert, W.-R., Leutzbach, W., Adolph, U.-M. et al.: Achslasten und Gesamtgewichte schwerer Lkw. Nutzen-Kosten-Untersuchung einer Anhebung der zulässigen Höchstwerte; Herausg. Bundesminister für Verkehr, Bonn. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1981, ISBN 3-88585-035-4

Die mit +) versehenen Veröffentlichungen sind vergriffen !