

Analyse und Optimierung von öffentlichen Straßenverkehrsnetzen auf Basis einer objektorientierten, logistischen Betrachtungsweise

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. György Sárközi

geb. am 15.03.1955 in Sajószentpéter (Ungarn)

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk

Prof. Prof. h. c. Dr.-Tech. Habil. PhD. Béla Illés

Promotionskolloquium am 06. September 2011

KURZFASSUNG

Ein leistungsfähiges Verkehrssystem ist Voraussetzung für eine moderne Gesellschaft, für Wirtschaftswachstum, für Beschäftigung und Wohlstand. Im Hinblick auf die Entwicklung von strukturschwachen Gebieten ist ein leichter Zugang zu Infrastrukturen unerlässlich. Die Verbesserung der räumlichen Erreichbarkeit ist jedoch nicht allein durch Investitionen in öffentliche Verkehrsmittel zu verwirklichen, sondern durch die Optimierung der öffentlichen Verkehrsnetzwerke. Änderungen in den Elementen der Verkehrsnetzwerke und deren Verbindungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität und auf den Preis der Dienstleistungen sowie auf die Zufriedenheit der Fahrgäste.

In der vorliegenden Dissertationsschrift erfolgt die Analyse und Optimierung von Straßenverkehrsnetzwerken mit Hilfe einer objektorientierten, logistischen Betrachtungsweise. Nach einem Überblick über die Grundlagen der Analyse und Untersuchung von Netzwerken wurde eine Abgrenzung des untersuchten Systems vorgenommen. Danach wurde unter Nutzung objektorientierter Gesichtspunkte ein allgemeines mathematisches Modell des öffentlichen Straßenverkehrsnetzwerkes erstellt, das neben den Netzwerkobjekten, wie Knoten und Kanten, auch die Objekte des Verkehrssystems, wie die Fahrzeugflotte und die Mengen der Fahrzeugdepots und Fahrgäste beinhaltet. Während der Anwendung des logistischen Modells wurden die sich auf die Qualität der Verkehrsdienstleistung auswirkenden Zeitindikatoren und die für die Nachhaltigkeit wichtigen Wirtschaftlichkeitsindikatoren untersucht.

Für die durchzuführenden Simulationsverfahren war es erforderlich, den Simulationsalgorithmus und die Struktur der Datenbank zu definieren. Mit Hilfe des, auf Basis des allgemeinen logistischen Modells, erstellten Simulationsmodells wurde das öffentliche Straßenverkehrsproblem eines gegebenen Wirtschaftsraumes in Ungarn untersucht und optimiert. Das simulierte Netzwerk behandelt die Lösungssuche für einen typischen Anwendungsfall. Dieser betrifft die Abwicklung von Anschlussverkehren aus der Agglomeration des nach einem Taktfahrplan abgewickelten, öffentlichen Straßenverkehrs zwischen zwei wettbewerbsfähigen Knoten des Netzwerkes. Ziel war es, die durchschnittlichen und maximalen Wartezeiten und Reisezeiten sowie die maximalen Kosten der einzelnen Varianten zu optimieren. Anhand des vorgestellten Beispiels ist nachweisbar, dass das allgemeine logistische Modell und das daraus abgeleitete Simulationsverfahren fähig sind, die komplizierten Optimierungsprobleme der öffentlichen Straßenverkehrsnetze abzubilden und nachhaltige Lösungen zu generieren.

ÖSSZEFOGLALÓ

A hatékony közlekedési rendszer a modern társadalom, a gazdasági növekedés, foglalkoztatás és jólét fontos előfeltétele. A területfejlesztés szempontjából az infrastruktúrákhoz való hozzáférés a hátrányos térségek számára elengedhetetlen. A térségi elérhetőség javítása nem csak a közösségi közlekedés járműparkjának fejlesztésével, hanem a közlekedési hálózatok rendszerének optimalizálásával oldható meg.

A közlekedési hálózatok elemeinek és azok kapcsolatainak megváltoztatása meghatározó befolyást gyakorol a szolgáltatások minőségére és árára, valamint az utasok megelégedettségére.

Jelen doktori munkában a személyközlekedési hálózatok elemzése és optimalizálása az objektumorientált logisztikai szemléletmód alkalmazásával történik.

A hálózatok elemzése és vizsgálata alapjainak áttekintése után lehatároltam a vizsgált rendszer határait. Ezt követően az objektumorientált szempontok alapján megalkottam a közösségi személyszállítási hálózat általános matematikai modelljét, amely a hálózati objektumok (csomópontok és élek) mellett tartalmazza a közösségi személyszállítási rendszer olyan kapcsolódó objektumait, mint a járműflotta, a telephelyek és az utasok halmaza.

A logisztikai modell alkalmazása során a közlekedési szolgáltatás minősége szempontjából fontos időtényezőket és fenntarthatóság szempontjából fontos gazdaságossági tényezőket vizsgáltam. A későbbi szimulációs vizsgálatokhoz szükség volt a szimulációs algoritmus valamint a szimulációs eljárás adatbanki struktúrájának meghatározására. Összefoglaltam a szimulációs vizsgálatok eredményeinek kiértékelésére alkalmas optimalizálási eljárásokat.

Az általános logisztikai modell alapján kialakított szimulációs modell alkalmazásával egy adott magyarországi térség közösségi személyszállítási problémáját vizsgáltam és optimalizáltam. Két versenyképes hálózati csomópont között kialakított ütemes menetrend szerint fenntartott személyközlekedéshez illesztett agglomerációs csatlakozások esetében szimulált hálózaton kerestem megoldásokat az átlagos és maximális várakozási és eljutási idők, valamint a változatokhoz tartozó maximális költségek vonatkozásában.

A bemutatott példa alapján bizonyítható, hogy az általános matematikai modell és az ez alapján kialakított szimulációs eljárás alkalmas a közösségi személyszállítási hálózatok bonyolult optimalizálási problémáinak kezelésére és fenntartható megoldások megtalálására.

ABSTRACT

A prospering transport system is an important precondition for a modern society, for economic growth, employment and welfare. Concerning the development in rural areas an easy access to the infrastructures is essential. Making regional accessibility better is not only investing in the rolling fleets of public transport but also optimizing public transport networks.

Changes in the elements and connections of transport networks have an influence on the quality and price of public services offered as well as on passenger satisfaction.

In the present paper an analysis and optimization of public transport networks by object oriented logistical approach will be presented.

Following a short overview on the basics for analyzing and examining of networks a setting up of the borders of the examined system was done. From an object oriented point of view the general mathematical logistical model of the public transport networks was determined which besides the networks objects like the knots and edges also involves the objects of the transport system like the vehicle fleet, depots and passengers. During the application of the logistical model the time factors influencing the quality of public transport services have been examined as well as the economic factors responsible for sustainability.

For the simulation process a simulation algorithm and a data storage structure was to be defined. By applying the simulation model built up from the general logistical model the public passenger transport network of a given economic area in Hungary have been examined and optimized.

In the simulated network in case of connecting services from the region to a high frequency public transport service according to tact schedule between two competitive knots (towns) of the network solutions to optimize the average and maximum waiting and traveling times were presented and the maximum cost of the variants calculated.

According to the presented sample it can be stated that the general logistical model and the simulation process based on it is able to deal with the complicated optimizing problems of the public passenger transport networks and to find sustainable solutions.

VORWORT

Der Lehrstuhl für Materialfluss und Logistik der Universität Miskolc (Ungarn) und die Personenbeförderungsgesellschaft Borsod Volán AG (Ungarn) arbeiten seit einigen Jahren sehr eng zusammen. Durch diese bilaterale Zusammenarbeit wurde es möglich, einerseits für die Studierenden der Universität Miskolc Diplomarbeitsthemen und Praktikumsplätze auf dem Gebiet Verkehr und Logistik anzubieten, andererseits wurden den leitenden Fachgebietsexperten und Mitarbeitern der Borsod Volán AG relevante, wissenschaftliche Methoden und Verfahren näher gebracht. Als Generaldirektor der Gesellschaft, der sich seit langen Jahren mit den verschiedensten komplexen Problemen des Verkehrs und der Logistik befasst, fühlte ich eine starke Motivation, meine praktischen Erfahrungen auch wissenschaftlich zusammenzufassen. Durch das Aufstellen eines allgemeinen, logistischen Modells für den öffentlichen Straßenverkehr soll eine für die Bestellorganisation, für Fahrgäste und Interessenvertreter sowie für Politiker und Fachpolitiker gleichermaßen verständliche Simulation der Vorgänge und Funktionen der Verkehrsnetze entwickelt werden, die es ermöglicht, wissenschaftlich begründete, aber auch praxisorientierte Entscheidungen hinsichtlich der Finanzierung, Qualität und Quantität der öffentlichen Dienstleistungen zu treffen.

Besonderen Dank schulde ich Herrn Professor Dr. József Cselényi (gest. 2007), der es für wichtig erachtete, einen Hochschullehrer für meine wissenschaftliche Arbeit zu gewinnen. Herrn Prof. Dr. habil. Béla Illés danke ich für seine Betreuung auf dem Gebiet der Logistik und für seine Unterstützung dahingehend ein gemeinsamer Doktorand der Universitäten Miskolci Egyetem und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg zu werden und dadurch auch die Betreuung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Michael Schenk zu erhalten. Sehr positiv war auch die Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Forschungsinstituts Zoltán Bay, insbesondere mit Herrn Richárd Ladányi, der mir mit seinen Spezialkenntnissen auf dem Gebiet der Simulation bei der Modellbildung beratend zur Seite stand und mit allen meinen Kollegen, die mir diese Arbeit ermöglicht haben und ohne deren Beistand und Langmut mit mir diese Arbeit nicht hätte fertig gestellt werden können.

Miskolc, im Juni 2011

György Sárközi

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	I
Összefoglaló	II
Abstract.....	III
Vorwort.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Verzeichnis der Abbildungen	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Formelverzeichnis.....	XII
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
2 Problemstellung und Ziel der Arbeit.....	2
2.1 Problemstellung	2
2.2 Ziel und Vorgehensweise der Arbeit	2
2.2.1 Ziel der Arbeit.....	2
2.2.2 Vorgehensweise der Arbeit.....	2
3 Grundlagen zur Untersuchung von Verkehrsnetzwerken	5
3.1 Graphentheoretische Grundlagen von Netzwerken.....	5
3.2 Bewertung und Analyse von Verkehrsnetzwerken.....	9
3.3 Einflussfaktoren, Methoden und Trends in der Entwicklung von öffentlichen Straßenverkehrsnetzen	16
3.3.1 Rolle der Verkehrspolitik.....	16
3.3.2 Mobilität der Zukunft, aktuelle Trends in der Verkehrslogistik.....	20
3.3.3 Konventionelle Verfahren zur Behandlung komplexer Entscheidungs- situationen im öffentlichen Personenverkehrsnetz.....	29
3.3.4 Weiterentwicklungen im methodischen Bereich.....	32
3.3.5 Modelle in der Verkehrslogistik	35
3.3.6 Spezifische Gesichtspunkte der logistischen Betrachtung eines Netzwerkes im öffentlichen Straßenverkehr	37
4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes.....	39
4.1 Angabe des Straßennetzes des öffentlichen Personenverkehrs	40
4.1.1 Relationsmatrix bezogen auf das Straßennetz	41
4.1.2 Angabe der Weglänge bezogen auf das Straßennetz	41
4.2 Angabe des Verkehrsnetzes bezogen auf das Straßennetz.....	42

4.3	Fahrzeugflotte und ihre Kennwerte	44
4.4	Fahrzeugdepots und ihre Kennwerte bezogen auf das Straßenverkehrsnetz	45
4.5	Anzahl der Fahrgäste und ihre Kennwerte bezogen auf die Haltestellen	47
4.5.1	Einsteigende und wartende Fahrgäste	47
5	Indikatoren und Faktoren des mathematischen Modells.....	56
5.1	Zeitindikatoren	56
5.1.1	Nominelle und tatsächliche Fahrtzeiten	56
5.1.2	Aufbau einer Datenbank zur Speicherung der Ergebnisse der Untersuchung von Zeitindikatoren im Simulationsmodell	60
5.2	Faktoren der Wirtschaftlichkeit.....	62
5.2.1	Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Fahrtstrecken	62
5.2.2	Aufbau einer Datenbank zur Speicherung der Ergebnisse der Untersuchung von Wirtschaftlichkeitsindikatoren im Simulationsmodell.....	65
6	Möglichkeiten zur Bildung von Zielfunktionen für Optimierungen im mathematischen Modell	67
6.1	Bedeutung der Bildung von Zielfunktionen in der Optimierung.....	67
6.2	Konstrukte von Zielfunktionen.....	67
6.2.1	Maximierung der gewichteten Summe der normalisierten Zielfunktionen.....	70
6.2.2	Maximierung der gewichteten Summe der minimierten, normalisierten Zielfunktionen.....	71
6.2.3	Maximierung des Auslastungsgrades der normalisierten Zielfunktionen	71
6.2.4	Stufenweise Optimierung.....	71
6.2.5	Spieltheorie	72
7	Anwendung des mathematischen Modells für eine Simulation im Straßenverkehrsnetz.....	74
7.1	Beschreibung des Simulationsproblems	74
7.2	Auswahl und Vorstellung der rechnergestützten Simulationsumgebung	76
7.2.1	Grundlagen der Simulation	76
7.2.2	Vorstellung der Software SIMUL8 Professional	83
7.3	Gestaltung des zu simulierenden Netzwerkes.....	85
7.3.1	Definition der Systemgrenzen	86
7.3.2	Definition der Randbedingungen	88
7.3.3	Aufbau und Beschreibung der Objekte des Netzwerkes.....	92
7.4	Simulationsuntersuchungen.....	99
7.4.1	Verifizierung des Modells	99
7.4.2	Problem des Anpassens der Sammelfahrten.....	102

7.4.3	Wirkung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte auf die maximalen Reise- und Wartezeiten	104
7.4.4	Bestimmung der minimalen Taktzeit für ein vorgegebenes Kostenniveau bei Minimierung der Wartezeiten	105
7.5	Schlussfolgerungen für das Simulationsmodell	108
8	Zusammenfassung und Ausblick	110
	Literaturverzeichnis	113
	Anlagenverzeichnis	121
	Anlagen	125
	Anlage 5-1 Algorithmus zur Simulationsuntersuchung der Zeitfaktoren	125
	Anlage 5-2 Algorithmus zur Simulationsuntersuchung der Wirtschaftlichkeit	129
	Anlage 7-1 Anlagen zu SIMUL8	133
	Anlage 7-2 Detaillierte Daten der Fahrgastzählungen	159

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 2-1	Vorgehensweise der Arbeit	4
Abbildung 3-1	Ein ungerichteter Graph	6
Abbildung 3-2	Lineare Struktur	7
Abbildung 3-3	Geschlossene Rahmenstruktur	8
Abbildung 3-4	Linienstruktur bezogen auf Punkt B	8
Abbildung 3-5	Linienstruktur bezogen auf alle Punkte	8
Abbildung 3-6	Jeder Knoten ist von einem beliebigen anderen Knoten erreichbar	9
Abbildung 3-7	An einen inneren Rahmen sich anschließende Knoten	9
Abbildung 3-8	Zusammenhang zwischen der Länge des Netzwerkes und der Entfernung der Knoten	10
Abbildung 3-9	Zustandsänderung im Verkehrsnetz	14
Abbildung 3-10	Mathematische Parameter des Materialflusses	15
Abbildung 3-11	Wirkungsbeziehungen im Einflussfeld von „Mobilität“	22
Abbildung 3-12	Logistikziele – Internationaler Vergleich	23
Abbildung 3-13	Verbesserungsansatz der Nutzung von Navigationssystemen	28
Abbildung 3-14	Traditionelles, hierarchisches Vorgehen in der Verkehrsplanung	30
Abbildung 3-15	Planungsprozess im ÖPV	31
Abbildung 3-16	Funktion und Bedeutung der Verkehrsmodelle in den Entscheidungsprozessen	36
Abbildung 3-17	Bereiche der Modellbildung als Betrachtungsgegenstand	38
Abbildung 4-1	Referenzmodell eines Straßennetzes des öffentlichen Personenverkehrs	40
Abbildung 4-2	Relationsmatrix des Straßennetzes	41
Abbildung 4-3	Wegematrix des Straßennetzes	41
Abbildung 4-4	Gestaltung des Verkehrsnetzes	42
Abbildung 4-5	Fahrtmatrix (Matrix J)	43
Abbildung 4-6	Beispiel der mathematischen Bestimmung einer Fahrt	43
Abbildung 4-7	Modifizierte Fahrtmatrix zur Beschreibung aller Fahrten	44
Abbildung 4-8	Matrix der Fahrzeugkennwerte	45
Abbildung 4-9	Angabe der Fahrzeugdepots	46
Abbildung 4-10	Angabe der Fahrzeugdepots mit Matrix T	46

Abbildung 4-11	Verteilung der Fahrzeuge unter den Fahrzeugdepots	47
Abbildung 4-12	Einteilung eines Tages an der Haltestelle i in Zeitintervalle $\Delta t_{i,j}$	48
Abbildung 4-13	Dichtefunktion der gleichmäßigen Verteilung	48
Abbildung 4-14	Verteilungsfunktion der gleichmäßigen Verteilung	49
Abbildung 4-15	Methode zur Bestimmung der Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall für eine gegebene Fahrt	50
Abbildung 4-16	Zusammenfassung der Parameter A der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der wartenden Fahrgäste an den Haltestellen	51
Abbildung 4-17	Zusammenfassung der Parameter B der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der wartenden Fahrgäste an den Haltestellen	52
Abbildung 4-18	Methode für die Bestimmung der Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall für eine gegebene Fahrt	53
Abbildung 4-19	Zusammenfassung der Parameter C der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an den Haltestellen	54
Abbildung 4-20	Zusammenfassung der Parameter D der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an den Haltestellen	54
Abbildung 4-21	Matrix U der zu erwartenden Anzahl der wartenden Fahrgäste pro Fahrt, pro Haltestelle und pro Zeitintervall	55
Abbildung 4-22	Matrix U^* der zu erwartenden Anzahl der aussteigenden Fahrgäste pro Fahrt, pro Haltestelle und pro Zeitintervall	55
Abbildung 5-1	Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden	57
Abbildung 5-2	Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen nicht zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden	58
Abbildung 5-3	Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm für den i -ten Fahrzeugtyp auf der l_k -ten Wegstrecke	58
Abbildung 5-4	Simulationsergebnisse in der Datenbank	61

Abbildung 5-5	Bildung der Einnahmen und Kosten bezogen auf eine Fahrtstrecke	63
Abbildung 5-6	Simulationsergebnisse der Wirtschaftlichkeitsprüfung in der Datenbank	66
Abbildung 6-1	Ordnungsprinzip der Simulationsergebnisse	67
Abbildung 7-1	Optimierung eines Taktfahrplans im ÖPV	75
Abbildung 7-2	Makroskopische und mikroskopische Simulation	78
Abbildung 7-3	Zusammenhang der Detailliertheit und Komplexität der Simulationsmodelle	81
Abbildung 7-4	Übersicht der Modellbildungsverfahren	82
Abbildung 7-5	Programme zur Modellierung	83
Abbildung 7-6	Rolle des Objekts „Haltestelle“ in der Simulation	94

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1	Zusammenfassung der Bewertungskriterien von Netzwerken	13
Tabelle 3-2	Potenziale der Nutzung von Navigationssystemen in der Verkehrslogistik	28
Tabelle 7-1	Vergleich der makroskopischen und mikroskopischen Simulation	80
Tabelle 7-2	Zusammenfassende Tabelle der Fahrgastzählungen, aufgeteilt nach Tageszeiten (ohne Sammelpassagiere)	89
Tabelle 7-3	Parameter der Fahrzeuge, die für die Personentransportaufgabe benutzt werden können	91
Tabelle 7-4	Vergleich von Fahrgastzählungsdaten und Simulationsdaten	100
Tabelle 7-5	Sammelverkehr, berechnet aufgrund der Simulationsdurchschnitte	101

FORMELVERZEICHNIS

Formel 3-1	Gesamtwartezeit aller Personen an einer Haltestelle in einer Periode	33
Formel 3-2	Aktualisierte Schätzung der Verkehrsnachfrage	35
Formel 4-1	Bestimmung der Entfernung zwischen zwei beliebigen Punkten in der Wegematrix	42
Formel 4-2	Bestimmung der Fahrlänge mit Hilfe der Knotenpunktentfernungen	44
Formel 4-3	Dichtefunktion der gleichmäßigen Verteilung der Fahrgastzahl	49
Formel 5-1	Bestimmung der Fahrlänge mit Hilfe der Haltestellenentfernungen l_k	56
Formel 5-2	Bestimmung der Entfernung l_k im Fall, dass sich die Haltestellen zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden (1)	57
Formel 5-3	Bestimmung der Entfernung l_k im Fall, dass sich die Haltestellen zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden (2)	57
Formel 5-4	Bestimmung der Entfernung l_k im Fall, dass sich die Haltestellen zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden (3)	57
Formel 5-5	Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen nicht zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden (1)	57
Formel 5-6	Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen nicht zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden (2)	57
Formel 5-7	Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen nicht zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden (3)	57
Formel 5-8	Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen nicht zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden (4)	57

Formel 5-9	Bestimmung der Fahrtstrecke l_k mit Hilfe des Geschwindigkeits-Zeit-Diagramms	59
Formel 5-10	Bestimmung der durchschnittlichen Geschwindigkeit $v_{\text{durchschn.}}$	59
Formel 5-11	Notwendige Zeit für den i -ten Fahrzeugtyp für das Befahren der Wegstrecke l_k	59
Formel 5-12	Notwendige Zeit für den i -ten Fahrzeugtyp für das Befahren der l -ten Fahrlänge	59
Formel 5-13	Bestimmung der Summe der nominellen Wartezeiten für die l -te Fahrt bei dem i -ten Fahrzeugtyp	59
Formel 5-14	Bestimmung der nominellen Fahrtzeit der l -ten Fahrt beim i -ten Fahrzeugtyp	60
Formel 5-15	Bestimmung der Einnahmen zwischen den Punkten $(i-1)$ und i einer Fahrtstrecke	63
Formel 5-16	Bestimmung der Kosten zwischen den Punkten $(i-1)$ und i einer Fahrtstrecke	64
Formel 5-17	Bestimmung des Wirtschaftlichkeitsindikators für eine Fahrtstrecke	64
Formel 5-18	Bestimmung des Wirtschaftlichkeitsindikators für die gesamte Fahrt	64
Formel 6-1	Normalisierter Wert der i -ten Zielfunktion der j -ten Parametervariante	68
Formel 6-2	Optimaler Wert der i -ten Zielfunktion durch Minimierung	68
Formel 6-3	Optimaler Wert der i -ten Zielfunktion durch Maximierung	68
Formel 6-4	Wert der Matrix $C(i,j)$ im Fall einer minimierenden Zielfunktion	69
Formel 6-5	Wert der Matrix $C(i,j)$ im Fall einer maximierenden Zielfunktion	69
Formel 6-6	Randbedingung für die Elemente der Matrix $C(i,j)$	69
Formel 6-7	Wert der Matrix $D(i,j)$ im Fall einer maximierenden Zielfunktion	69
Formel 6-8	Wert der Matrix $D(i,j)$ im Fall einer minimierenden Zielfunktion	69
Formel 6-9	Randbedingung für die Elemente der Matrix $D(i,j)$	70

TABELLENVERZEICHNIS UND FORMELVERZEICHNIS

Formel 6-10	Wert der gewichteten normalisierten Zielfunktion der j -ten Lösung	70
Formel 6-11	Voraussetzungen für den Gewichtungsfaktor $K(i)$ der i -ten Zielfunktion	70
Formel 6-12	Optimale Variante durch Maximierung der gewichteten Summe der normalisierten Zielfunktionen	70
Formel 6-13	Minimum der minimierten normalisierten Zielfunktion der j -ten Lösung	71
Formel 6-14	Optimale Variante der minimierten normalisierten Zielfunktionen	71
Formel 6-15	Ausnutzungsgrad der normalisierten Zielfunktionen der j -ten Lösung	71
Formel 6-16	Optimale Variante der normalisierten Zielfunktionen der j -ten Lösung	71
Formel 6-17	1. Voraussetzung für einen Sattelpunkt in der Spieltheorie	72
Formel 6-18	2. Voraussetzung für einen Sattelpunkt in der Spieltheorie	72
Formel 6-19	3. Voraussetzung für einen Sattelpunkt in der Spieltheorie	72
Formel 6-20	Bestimmung der optimalen Strategie in der Spieltheorie	73
Formel 6-21	Randbedingungen für die Vektoren X^T	73
Formel 6-22	Randbedingungen für die Vektoren y^T	73
Formel 6-23	Wert des Spieles, bestimmt durch die optimale Häufigkeit der Parametervarianten	73
Formel 7-1	Bestimmung der Reisezeit	75
Formel 7-2	Minimierung der Summe der Wartezeiten	75

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

APS	Advanced Planning System
B&B	Branch-and-Bound Methode (deutsch: Verzweigung und Schranke)
B&C	Branch-and-Cut Methode (Vgl. zur Methode [Nem88]) (deutsch: Verzweigung und Schnitt)
BFS	Breadth-First-Search (deutsch: Breitensuche)
BIP	Brutto Inlandsprodukt
DB	Datenbank
DSS	Decision Support System (deutsch: Entscheidungsunterstützungssystem)
EMME/2	Software, Abkürzung für Equilibre Multimodale, Multimodal Equilibrium
ERP	Enterprise Resource Planning
ERTRAC	European Road Transport Advisory Council
EU27	übliche Bezeichnung für statistische Bemessung der 27 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union
EUREK	Europäisches Raumentwicklungskonzept
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
EVES	Einheitliche Verkehrsentwicklungsstrategie
GIS	Geoinformationssystem
GPS	Global Positioning System (deutsch: Globales Navigationssystem)
ITS	Intelligent Transport Systems (deutsch: Intelligente Transportsysteme)
IuKT	Informations- und Kommunikations- Technologien
KPI	Key Performance Indicators (deutsch: Schlüssel-Produktivitäts-Kennzahlen)
MDVSP	Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem (deutsch: Mehrdepot Fahrzeugeinsatzplanungsproblem)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
OD-Matrix	Origin- / Destination-Matrix (deutsch: Quelle-Senke-Matrix)
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr

ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonenverkehr
PVI	Planmäßige Vorbeugende Instandhaltung
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

Die Logistik ist die Wissenschaftsdisziplin, die sich mit den Material- und Informationsflüssen befasst. Sie bestimmt wesentlich die Wirksamkeit von Nationalwirtschaften. In den letzten 40 Jahren waren folgende Entwicklungstendenzen (Vgl. dazu [IIIGI07], [Bau92]) für den Bereich der Logistik charakteristisch:

- 1980-er Jahre: Probleme von logistischen Betriebsmitteln
- 1990-er Jahre: Fragen der logistischen Versorgungsketten
- 2000-er Jahre: Aufgaben des optimalen Betriebs von logistischen Netzwerken
- 2010-er Jahre: Sicherheit, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz in logistischen Netzen

Diese Entwicklungstendenzen führten zu einer Herausbildung einer neuartigen Betrachtungsweise sowohl auf dem Gebiet der Produktion als auch auf dem Gebiet der Dienstleistungen. Diese neue Betrachtungsweise lässt sich durch folgende Aussagen charakterisieren:

- Die Durchführungsqualität von logistischen Tätigkeiten hat einen bedeutenden Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen.
- Die anknüpfenden, logistischen Dienstleistungen bestimmen grundsätzlich die Durchführungsqualität von Produktions- und Dienstleistungsprozessen.
- Auf dem Gebiet der logistischen Dienstleistungen spielen die logistischen Netzwerke eine wesentliche Rolle.
- In Zusammenhang mit dem optimalen Betrieb von Netzwerken rücken virtuelle Unternehmen in den Vordergrund.
- Die rasante Entwicklung der Informatik und Datenverarbeitung macht es möglich, auch umfangreiche, komplizierte Systeme zu untersuchen und zu bewerten sowie eine ganzheitliche logistische Betrachtung in der Praxis anzuwenden. Das Planen, Testen und Betreiben technischer Lösungen ist dabei Gegenstand und Fokus des Digital Engineering. (vgl. [Sch10])

Die BVL-Studie zu Trends und Strategien in der Logistik im Fokus bis zu 2015 definiert die „Zuverlässigkeit der Logistik als Topziel noch vor der Kostensenkung. Logistikziele zur Verbesserung der Servicequalität, Zuverlässigkeit, Reaktionsfähigkeit und Flexibilität rücken in den Fokus der Logistikmanager und stehen oft in Konkurrenz zu Kostensenkungszielen.“ [BVL08]

2 Problemstellung und Ziel der Arbeit

2.1 Problemstellung

Das System der Straßenverkehrsdienstleistungen ist ein komplexes System, dessen wesentliches Teilsystem das Straßenverkehrsnetzwerk bildet. Die Änderungen in den Elementen des Straßenverkehrsnetzwerkes und deren Verbindungen haben einen bestimmenden Einfluss auf die Qualität und auf den Preis von Dienstleistungen sowie auf die Zufriedenheit der Fahrgäste. Entsprechend der europäischen Verkehrspolitik sollen Verkehrsdienstleistungen sicherer, effizienter und hochwertiger erbracht werden. Daraus ergibt sich als notwendige Aufgabe, ein allgemeines mathematisches Modell für Verkehrsnetzwerke als Ausgangspunkt für komplexe Optimierungsaufgaben für typische und atypische Mehrkriterien-Entscheidungen durch eine angewandte, logistische Betrachtung aufzustellen und es simulationsfähig zu entwickeln.

2.2 Ziel und Vorgehensweise der Arbeit

2.2.1 Ziel der Arbeit

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht - nach einem Überblick der wissenschaftlichen Grundlagen der Netzwerktheorie und der Ergebnisse in der Modellbildung auf dem Gebiet der Verkehrsnetzwerke - in der Konzeption und Implementierung eines neuen, allgemeinen, mathematisch-logistischen Modells für Verkehrsnetze.

Anhand eines ausgewählten Beispiels soll gezeigt werden, wie mit Hilfe dieses allgemeinen Modells eine Simulation für die Erreichung vorgegebener Optimierungskriterien durchgeführt werden kann, wobei in der Simulation die logistischen Parameter und Zusammenhänge des Modells angewendet werden.

2.2.2 Vorgehensweise der Arbeit

Zur Untersuchung des logistischen Netzwerkes des Straßenpersonenverkehrs werden die folgenden Gesichtspunkte für wichtig erachtet:

- Die Bestimmung eines allgemeinen, mathematischen Modells des Netzwerkes des Straßenpersonenverkehrs anhand objektorientierter Gesichtspunkte.
- Die Beschreibung der Netzobjekte durch allgemeine logistische Parameter.
- Die Erschließung des möglichen Beziehungssystems zwischen den Objekten des Netzwerkes.

- Die Beschreibung der einzelnen Netzwerkverbindungen durch logistische Parameter.
- Die Erschließung des, zum Funktionieren des Netzwerkes notwendigen, informationseitigen Hintergrundes.
- Die Analyse der zur Behandlung und Bearbeitung der Informationen benötigten Datenträger.
- Die Erschließung der möglichen Optimierungen und der notwendigen Beschränkungen durch die Anwendung die Funktion beschreibenden Informationen.
- Die Erstellung einer Methode zum Aufstellen gemeinsamer Zielfunktionen unter Berücksichtigung der beiden Sichten von Bestellorganisation und von Dienstleistungsunternehmen.
- Die Harmonisierungsmöglichkeiten des untersuchten, logistischen Netzwerkes im Zusammenspiel mit anderen, existierenden Netzwerken.

Diese aufgezählten Gesichtspunkte werden im Rahmen dieser Dissertationsschrift behandelt und entsprechend detailliert.

Die Abbildung 2-1 gibt eine Übersicht über die Vorgehensweise der Arbeit kapitelweise im Zusammenhang mit den Zielen und Methoden.

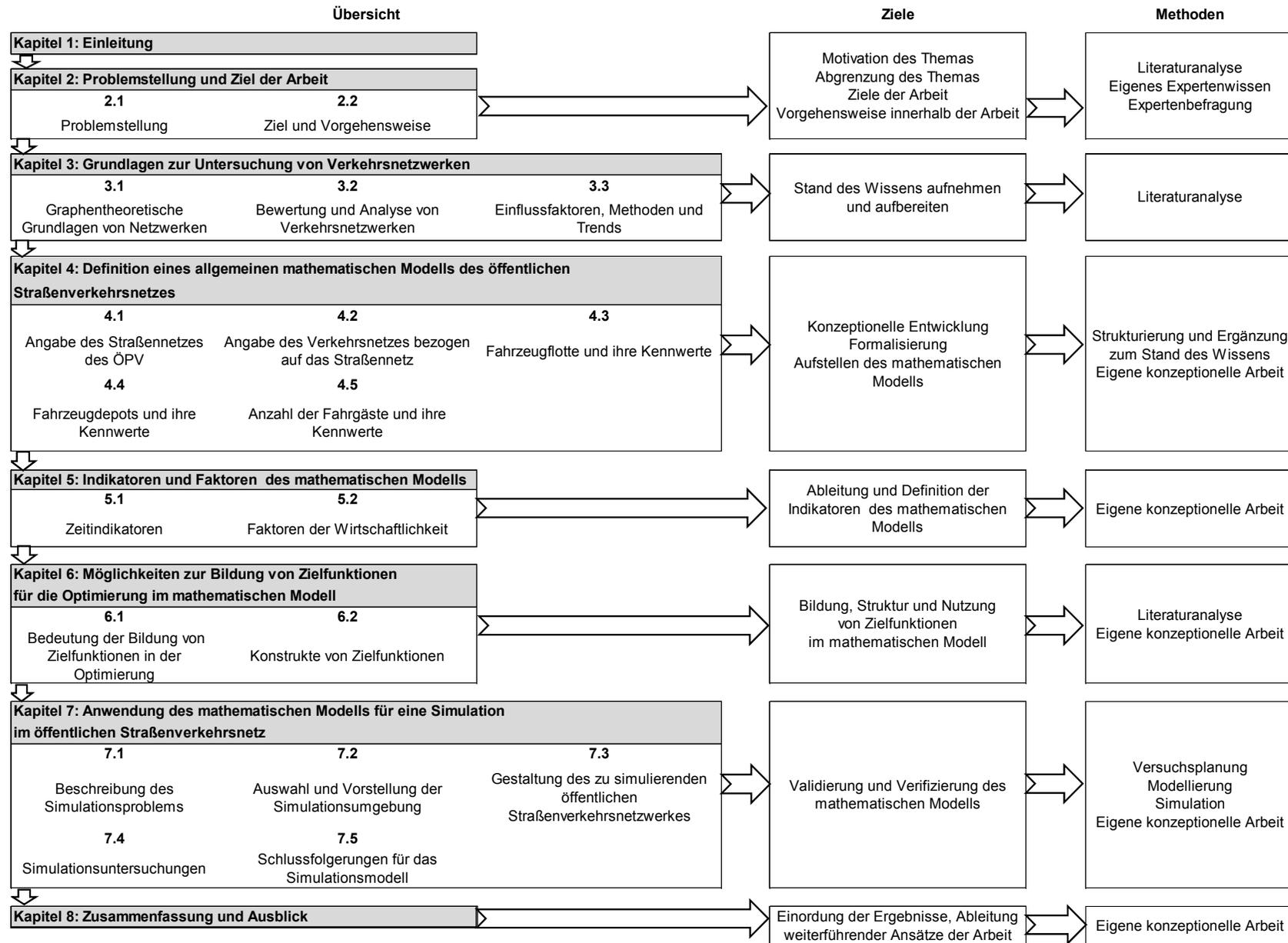


Abbildung 2-1: Vorgehensweise der Arbeit

3 Grundlagen zur Untersuchung von Verkehrsnetzwerken

Für netzartige Strukturen in Natur und Technik verwendet man mathematische Modelle [Tit03]. Als *Netzwerke* werden *Systeme* bezeichnet, deren zugrunde liegende Struktur sich mathematisch als *Graph* modellieren lässt und die über Mechanismen zu ihrer Organisation verfügen.

Allen diesen Netzen ist eine Grundeigenschaft gemeinsam. Sie bestehen stets aus zwei verschiedenartigen Mengen von Objekten. In Verkehrsnetzen sind Objekte der ersten Art zum Beispiel Orte oder Haltestellen im Straßennetz, welche durch Objekte der zweiten Art – zum Beispiel durch Straßen – verbunden werden [Tit03]

In diesem Kapitel sollen deshalb zunächst die theoretischen Grundlagen der Graphen erläutert werden, um später die spezifischen Eigenschaften und Zusammenhänge der Verkehrsnetzwerke, die für die Analyse und Optimierung dieser komplexen Systeme zugrunde liegen, behandeln zu können.

Unter dem Gesichtspunkt einer wirtschaftlichen-gesellschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit ist es erforderlich, die Wettbewerbsfähigkeit der Knoten und elementarer Netzwerkpunkte zu bestimmen, sowie die Knoten im Verhältnis zueinander zu qualifizieren und einzuordnen und im Endeffekt die, durch die Gesamtheit der Knoten zustande kommende, Wettbewerbsfähigkeit eines Raumes festzustellen. Die Wettbewerbsfähigkeit eines Wirtschaftsraumes hängt stark von der Anzahl der dort auffindbaren Knoten und elementaren Punkte sowie dem Funktionsumfang dieser Punkte ab. Die Wettbewerbsfähigkeit eines Wirtschaftsraumes steht in engem Zusammenhang mit der Komplexität des Netzwerkes und der Fortschrittlichkeit des Netzverbindingssystems.

3.1 Graphentheoretische Grundlagen von Netzwerken

Ein ungerichteter Graph $G = (V, E)$ besteht aus einer Knotenmenge V und einer Kantenmenge E , wobei jeder Kante $e \in E$ von G zwei (nicht notwendig verschiedene) Knoten aus V zugeordnet sind.

Um einen Graphen bildlich zu veranschaulichen, stellt man die Knoten als Punkte oder kleine Kreise dar. Eine Kante wird durch eine Strecke oder eine Kurve, die zwei Knoten verbindet, dargestellt. Abbildung 3-1 zeigt einen Graphen mit fünf Knoten und sechs Kanten.

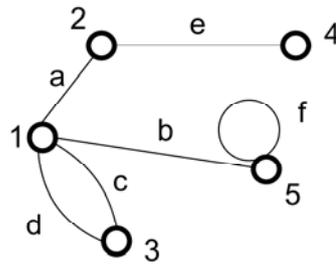


Abbildung 3-1: Ein ungerichteter Graph [Tit03]

Ein geschlossener Zug aus Kanten und Knoten heißt Masche.

Das eigentliche Kennzeichen eines Netzwerkes gegenüber anderen Typen von Strukturen ist, dass der Großteil der Knoten zu einer oder zu mehreren Maschen gehört.

Zwei Wege heißen *knotendisjunkt* oder *kreuzungsfrei*, wenn sie keine gemeinsamen Knoten haben.

Die *Knotenzusammenhangszahl* $\kappa(G)$ eines Graphen G ist die kleinste Anzahl von Knoten, deren Entfernung den Zusammenhang zerstört.

Ein Knoten x ist *Nachbar* eines Knotens y genau dann, wenn $\{x, y\} \in E(G)$ also wenn sie durch eine Kante verbunden sind.

Eine spezielle, entscheidende Eigenschaft der Knoten ist, dass sie Teile der Netzwerke sind, aber gleichzeitig eigene Eigenschaften aufweisen können. Auch die Kanten verfügen über eigene Eigenschaften, die ihre Funktion im Netzwerk bestimmen.

In gerichteten, kantenbewerteten Graphen findet man spezielle Knoten wie z.B. *Quellen* und *Senken*. Eine Quelle in einem gerichteten Graphen ist der Knoten, von dem aus alle anderen Knoten erreichbar sind, der selbst aber keinen Vorgänger hat. Eine Senke dagegen ist ein Knoten in einem gerichteten Graphen, der keinen Nachfolger hat.

Ein *Weg* $W=(v_1, v_2, \dots, v_p)$ ist eine Folge von Knoten, wobei immer v_i und v_{i+1} für alle $i = 1, \dots, p-1$ *adjazent* sein müssen.

Sind alle Knoten paarweise verschieden, so spricht man von einem *Pfad*.

Die Kantenmenge beschreibt, wie die *Knoten* der Knotenmenge des Graphen miteinander verbunden sind. Je nach Typ des Graphen unterscheiden sich die möglichen Formen von Kanten.

Zu einer *Mehrfachkante* oder *Multikante* fasst man eine Menge von Kanten zusammen, die zwischen denselben Knoten verlaufen und in gerichteten Graphen zusätzlich identische *Orientierung* besitzen. Einen Graphen mit Multikanten bezeichnet man mit *Multigraph*.

Für Optimierungsprobleme eignen sich *kantenbewertete Graphen*, wobei die Kanten mit verschiedenen Bewertungsfunktionen, Kennzahlen und Parameter versehen werden können.

In Netzwerken mit Quellen und Senken dürfen die Kanten nur positiv bewertet sein und die Kantenbewertung wird in diesem Zusammenhang in der Regel als *Kapazität* der gerichteten Kante bezeichnet.

In Netzwerken werden hauptsächlich sogenannte *Flüsse* und *Ströme* betrachtet (siehe S. 14).

Die gleichen Knoten können in verschiedenen Konfigurationen miteinander verbunden werden. Eine Auswahl solcher Strukturen findet man bei *Rodrigue* [Rod98]. (Vgl. dazu die Abbildungen 3-2 bis 3-7). Diese haben eine große Bedeutung für verschiedene, praktische Anwendungen.

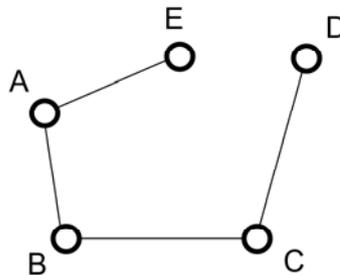


Abbildung 3-2: Lineare Struktur

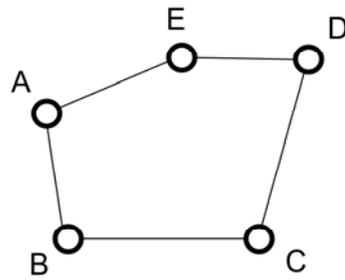


Abbildung 3-3: Geschlossene Rahmenstruktur

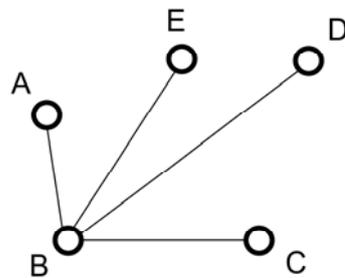


Abbildung 3-4: Linienstruktur bezogen auf Punkt B

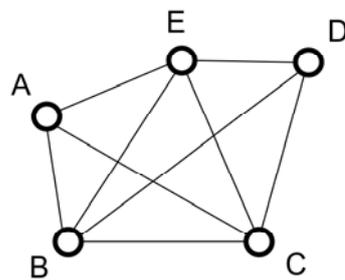


Abbildung 3-5: Linienstruktur bezogen auf alle Punkte

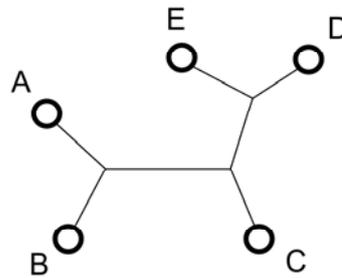


Abbildung 3-6: Jeder Knoten ist von einem beliebigen anderen Knoten erreichbar

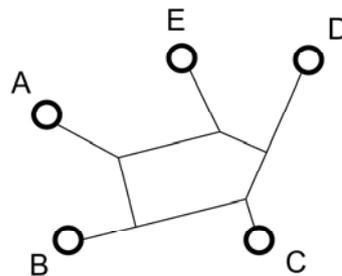


Abbildung 3-7: An einen inneren Rahmen sich anschließende Knoten

3.2 Bewertung und Analyse von Verkehrsnetzwerken

Netzwerke werden auf einer abstrakten Ebene in der *Netzwerktheorie* untersucht und in der Praxis in den jeweiligen Anwendungsgebieten, aus denen die konkreten Netze stammen.

Allgemein versteht man unter „Verkehrsnetz“ die, in einem bestimmten Raum, Gebiet zur Verfügung stehenden, an Verkehrsknotenpunkten miteinander verflochtenen Verkehrswege [Dud07]. Das bedeutet wiederum die Gesamtheit aller Anlagen auf oder unter der Erdoberfläche, auf denen sich die räumliche Fortbewegung von Personen und Gütern vollzieht. Im topographischen Sinne ist das die Gesamtheit aller Bahnen, Straßen, Wege und Flugplätze mit den zugehörigen Bauwerken [www02].

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine erweiterte Auffassung des Netzwerkes vorgestellt, indem außer den topographischen Objekten auch weitere Objekte des Verkehrssystems im Netzwerkbegriff involviert werden. (siehe Kapitel 4.) Ausführlicher wird ein solches Netzwerk untersucht, in dem sich die Fortbewegung und Beförderung von Personen im öffentlich zugänglichen Verkehr auf den Verkehrsstraßen vollzieht. Dieses Verkehrsnetz wird in der Arbeit „öffentliches Straßenverkehrsnetz“ genannt.

Anhand dieser Merkmale kann festgestellt werden, dass

- die Grundstruktur eines Verkehrsnetzes eine geographische Ausprägung hat, und
- einen Materialfluss mit entsprechenden Eigenschaften aufweist.

Als Nächstes werden Zusammenhänge in der Grundstruktur eines Verkehrsnetzes eingehender vorgestellt.

Die Grundstruktur des Verkehrsnetzes

In der Abbildung 3-8 ist der Zusammenhang zwischen der Länge des Netzwerkes und der Entfernung zwischen den Knoten dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die bequemeren, unmittelbaren Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten eine erhöhte Netzwerklänge und damit einen erheblichen Baukostenaufwand verursachen.

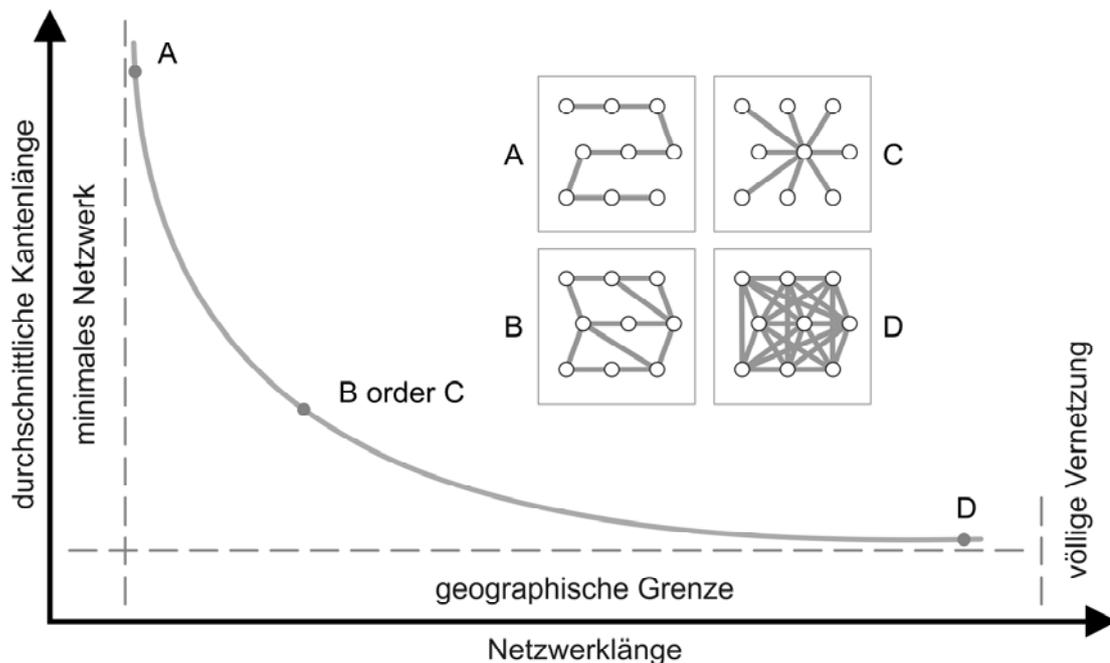


Abbildung 3-8: Zusammenhang zwischen der Länge des Netzwerkes und der Entfernung der Knoten [Rod98]

Die verschiedenen Netzwerkkonfigurationen bestimmen somit die Wirksamkeit der Konfigurationen derart:

- Die direkten Verbindungen ermöglichen die beste Funktion.
- Die Gestaltung von direkten Verbindungen verursacht höhere Kosten.

Die einzelnen Netzwerkkonfigurationen können anhand von Kennzahlen verglichen werden. Solche Kennzahlen können sein:

- die Zahl der zur Verbindung notwendigen Kanten
- die Zahl der zur Verbindung maximal möglichen Kanten
- die Zahl der aktuellen Kanten im Verhältnis zu der Zahl der maximal möglichen Kanten
- die Zahl der aktuellen Kanten im Verhältnis zu der Zahl der Knoten
- die Zahl der notwendigen Verbindungen aus einem Knoten zu allen anderen Knoten
- die Zahl der Verbindungen aus einem Knoten zu dem, am weitesten entfernten Knoten.

Die entsprechende Funktion eines Netzwerkes ist wichtig für die folgenden Elemente und Einheiten:

- Elemente und Einheiten, die Netzwerkdienste betreiben
- Elemente und Einheiten, die Dienstleistungen in Anspruch nehmen
- Elemente und Einheiten (lokale, regionale und staatliche), die auf die Gemeinpolitik Einfluss haben

Zur Analyse von Netzwerken laut *Fleischer* [Fle03] müssen grundsätzlich mindestens drei in ihrer Qualität differenzierte Ebenen unterschieden werden. Mit Hilfe dieser 3-Ebenen-Analysemethode erfolgt die Bewertung der Netzwerkeffektivität.

Die *erste Ebene* ist die Welt der Knoten. (Netzwerkelemente)

Die *zweite Ebene* ist das Netzwerk selbst, auch als Netzwerkebene bezeichnet, aufgebaut aus Knoten, die durch Kanten miteinander verbunden sind. Die Kanten repräsentieren hierbei keine selbstständige Ebene, da ihre Eigenschaften in erster Reihe oder ausschließlich mit dem Netzwerk selbst zusammenhängen. Charakteristisch für das Netzwerk sind seine Struktur und die Richtung.

Die *dritte Ebene* der Analyse ist der Raum, den das Netzwerk umspannt. Dieser Raum wird durch die funktionsreiche Welt der Knoten aufgebaut, wobei die Relationen der Knoten durch das Netzwerk strukturiert werden. Diese Ebene wird oft als Gemeinschaftsebene erwähnt. Die Gemeinschaftsebene hängt von der Ausdehnung des Netzwerkes ab.

In Abhängigkeit von der Ausdehnung des Netzwerkes unterscheidet man z.B. in:

- eine Siedlung,
- einen Kleinraum,
- eine Region,
- eine Nationalebene.

Auf der Gemeinschaftsebene entstehen die allgemeinen Ziele bezüglich des Netzwerkes. Die Bewertung bezieht sich hierbei auf die Erreichung und Verwirklichung dieser Ziele. Die grundsätzliche Aufgabe ist es, die für Gemeinschaft bestimmten politischen und berufspolitischen Zielstellungen zu verwirklichen.

Als allgemeine Ziele können benannt werden:

- die Erweiterung des Umfangs der Dienstleistungen,
- eine bessere Erreichbarkeit der Dienstleistungen,
- die komplexe, umfassende Bedienung der Kunden,
- eine Kosteneffektivität der Dienstleistungen.

Die effektive Erreichung der Ziele kann die Gemeinschaft durch die Zufriedenheit mit den Dienstleistungen und durch die Effektivität der Gemeinschaftskosten qualifizieren. Selbstverständlich spiegelt die Effektivität des Dienstleistungsnetzes nicht alle Gesichtspunkte der einzelnen Netzwerkteilnehmer wider. Im Allgemeinen ist ein gegenseitiger Kompromiss erforderlich. Ein „gegensätzlich interessierter“ Teilnehmer wird nicht an der Gestaltung und Aufrechterhaltung des Netzwerkes teilnehmen.

Die interessierten Teilnehmer können wiederum in drei Gruppen eingeteilt werden:

1. Die *Vorgesetzten* beaufsichtigen die Funktion des Netzwerkes in Zusammenhang mit den Zielen der Gemeinschaft und tragen eventuell zur Finanzierung bei.
2. Die *Agenten* arbeiten im Netzwerk in verschiedenen Verwaltungspositionen oder als Personal der Dienstleistungsorganisationen.
3. Die *Kunden* nehmen die Dienstleistungen im Netzwerk in Anspruch.

Die entsprechenden Ebenen, die Beteiligten und die Wirksamkeitskriterien sind in der Tabelle 3-1 enthalten.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Bewertungskriterien von Verkehrsnetzwerken

Ebene der Netzwerk-Analyse	Beteiligte (<i>stakeholders</i>)	Wirksamkeitskriterien
Öffentlichkeit	Vorgesetzte und Kunden Interessenvertreter der Verbraucher Gründer, Politiker, Gesetzgeber	Kosten der Gemeinschaft Entstehung des Gesellschaftskapitals Wahrnehmung und Akzeptanz der Problemlösungen Ergebnisse aus den Problemlösungen Wohlstandsindikatoren der Kunden
Netzwerk-beteiligte	Vorgesetzte und Agenten Gründer und Controller Betreiber des Netzwerkes Mitgliedsorganisationen	Erhöhung der Zahl der Netzwerkbe- teiligten Erweiterung der Dienstleistungen Abschaffung von parallelen Dienstleistungen Starke Verbindungen (multiplexity) Gründung der Netzverwaltungs- organisation Kosten der Dienstleistungen Bindungen ans Netzwerk
Individuelle und Organi- sations- teilnehmer	Agenten und Kunden Management und Auf- sichtsrat Personal der Organisationen Individuelle Kunden	Weiterbestehen der Organisation Erhöhung der Legitimität Mehr Einnahmenquellen Kosten der Dienstleistungsbetriebe Zugänglichkeit der Dienstleistungen Bedienung der Kunden Reduzierung der Konflikte zwischen den Beteiligten

Der Materialfluss

Die Definition des Materialflusses nach VDI 2689 lautet folgendermaßen [VDI10]:

„Materialfluss ist die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Zum Materialfluss gehören alle Formen des Durchlaufs von Arbeitsgegenständen durch ein System.“ [VDI10]

Bezüglich der Verkehrsnetze wird der Materialfluss als eine Sequenz von Ereignissen aufgefasst, wobei jedes Ereignis eine Positionsänderung mindestens eines beweglichen Objektes bedeutet.

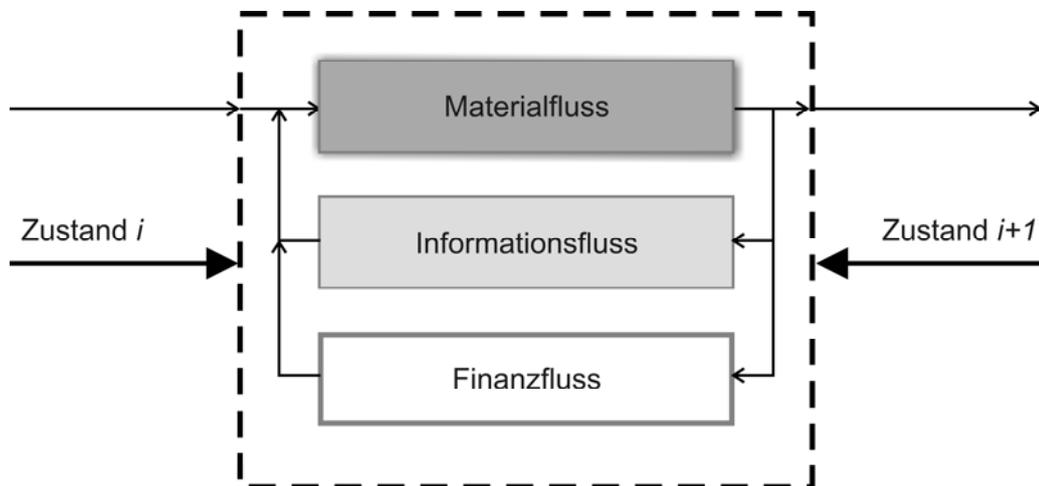


Abbildung 3-9: Zustandsänderung im Verkehrsnetz

Anhand der Abbildung 3-9 kann Folgendes festgestellt werden:

- das Verkehrsnetz geht aus einem i -ten Zustand in einen Zustand $(i+1)$ über, wenn innerhalb des Systems mindestens ein Ereignis im Materialfluss vor sich geht,
- ein Materialfluss wird von einem Informationsfluss und einem Finanzfluss begleitet,
- Material- und Informationsfluss können mit weiteren Flüssen anderer Art ergänzt werden.

Eine Ereignisfolge des Materialflusses kann an einem Beobachtungspunkt, z.B. an der Quelle F_i oder der Senke N_i , erfasst und dokumentiert werden. Dabei werden Zeitpunkte und Mengen erfasst. Daraus kann ein formales, mathematisches Modell entwickelt werden, das in der Abbildung 3-10 dargestellt ist:

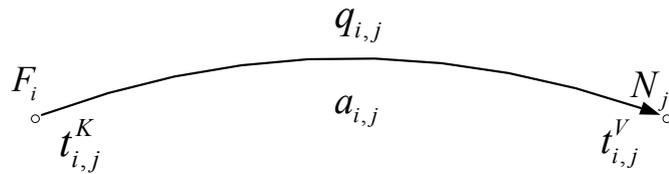


Abbildung 3-10: Mathematische Parameter des Materialflusses

Der Fluss erfolgt von der Quelle i in die Richtung der Senke j in der Relation $(i-j)$

F_i i -te Quelle des Materialflusses

N_j j -te Senke des Materialflusses

$q_{i,j}$ Materialflussintensität in der Relation $(i-j)$ [Menge/Zeiteinheit]

$t_{i,j}^K$ Anfangszeitpunkt eines Teilflusses in der Relation $(i-j)$

$t_{i,j}^V$ Endzeitpunkt eines Teilflusses in der Relation $(i-j)$

$a_{i,j}$ den Typ des Flusses beschreibende Parameter in der Relation $(i-j)$

Über die oben genannten Parameter hinaus können selbstverständlich weitere, ergänzende Parameter zur Beschreibung des Materialflusses herangezogen werden.

Anhand der angegebenen Parameter kann Folgendes festgestellt werden:

- Die einzelnen Materialflussparameter sind Funktionen der Zeit.
- Die Zeitfunktionen der Parameter können im Allgemeinen nicht in einer exakten Form angegeben werden.
- Die Werte der Parameter sollen als Wahrscheinlichkeitsveränderliche behandelt werden, d. h. sie sind stochastische Werte.

- Wenn einer der Parameter stochastisch ist, dann ist dies auch für den untersuchten Vorgang an sich wahr, was so viel bedeutet, dass dadurch auch die logistischen Vorgänge einen stochastischen Charakter besitzen.

3.3 Einflussfaktoren, Methoden und Trends in der Entwicklung von öffentlichen Straßenverkehrsnetzen

3.3.1 Rolle der Verkehrspolitik

Zur Analyse und Optimierung von Personenverkehrssystemen und -netzwerken ist es empfehlenswert, als Ausgangspunkt von der gültigen *Verkehrspolitik* auszugehen und die Ziele für die Optimierung aus dem verkehrspolitischen Zielsystem abzuleiten.

Deshalb ist ein kurzer, einleitender Einblick in dieses Gebiet notwendig.

Die Verkehrspolitik ist ein *staatlicher* Aufgabenbereich, der auch die allgemeine *Da-seinsvorsorge* berührt. Dabei verfolgt der Staat das Ziel, die *Verkehrsinfrastruktur* vorausschauend zu planen und umzusetzen. Weiterhin wird geregelt, wie die *Verkehrswege* zu nutzen sind.

Aus der Verkehrspolitik sind daher die wichtigsten Ziele für Analysen und Optimierungen von *Verkehrsnetzen* abzuleiten, damit der *Verkehr* ökonomisch effizient, ökologisch verträglich und sozial ausgewogen stattfindet. Dadurch, dass die *Europäische Union* den Europäischen Binnenmarkt immer weiter ausbaut, ergibt sich die Notwendigkeit einer gemeinsamen europäischen Verkehrspolitik.

Ein leistungsfähiges Verkehrssystem ist Voraussetzung für eine moderne Gesellschaft, für Wirtschaftswachstum, Beschäftigung und Wohlstand.

Im Folgenden werden die Ziele der Verkehrspolitik aus den Dokumenten der europäischen und nationalen Regelungen sowie die Methoden zu ihrer Realisierung aus der internationalen Fachliteratur kurz zusammengefasst.

Die Verkehrspolitik der EU, Bedeutung des Personenverkehrs

Im Jahr 2001 legte die Kommission ihr Weißbuch [EU-WB01] vor, mit dem 60 Maßnahmen zur Überarbeitung der europäischen Verkehrspolitik vorgeschlagen wurden. Am 22. Juni 2006 stellte die Kommission das überarbeitete Weißbuch [EU-WB06] vor.

Ziele der Verkehrspolitik

Eine nachhaltige Verkehrspolitik muss darauf ausgerichtet sein, dass die Verkehrssysteme den wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Anforderungen der Gesellschaft entsprechen.

Der Verkehrssektor ist ein wichtiger Wirtschaftsfaktor, weil die Mobilität von Gütern und Personen eine grundlegende Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit von Industrie und Dienstleistungen bildet.

Die Verkehrspolitik spielt bei der Stärkung des wirtschaftlichen und sozialen Zusammenhalts der Europäischen Union eine wichtige Rolle. Sie trägt zum Abbau des *regionalen Gefälles* bei, insbesondere durch einen leichteren Zugang zu den insularen und am Rande gelegenen Gebieten. Ferner wirkt sie sich positiv auf die Beschäftigungslage aus, indem Investitionen in Verkehrsinfrastrukturen und die Mobilität der Arbeitnehmer gefördert werden.

Der Verkehr ist ein wesentlicher Aspekt des *Europäischen Raumentwicklungskonzepts* (EUREK) [EU-REK99], einem gemeinsamen, integrierten Konzept für eine europäische Raumordnung. Im Hinblick auf eine einheitliche Entwicklung des europäischen Raumes ist ein leichter Zugang zu Infrastrukturen sicherlich unerlässlich; technische Hindernisse, die sich aus den einzelstaatlichen Verkehrssystemen ergeben, müssen beseitigt werden, die Entwicklung der strukturschwachen Gebiete ist zu fördern.

In unterschiedlicher Hinsicht wirken lokale und regionale öffentliche Verkehrsmittel der sozialen Ausgrenzung entgegen. Zum einen dienen sie dem Funktionieren des Arbeitsmarktes und der wirtschaftlichen Entwicklung; am Rande gelegene Wohngebiete und ländliche Regionen sind nicht mehr isoliert. Außerdem erhöhen sie die Lebensqualität, insbesondere im Hinblick auf die Umwelt (geringere Lärmbelastigung, bessere Luftqualität).

Da jedoch die Liberalisierung der Verkehrsdienste dazu führen kann, dass in wenig bevölkerten oder weit entlegenen Regionen keine ausreichenden Verkehrsdienste mehr vorhanden sind - was nicht im Sinne der Kohäsion wäre -, ist darauf zu achten, dass diese Dienste beibehalten werden, gegebenenfalls durch *öffentliche Dienstleistungsverträge*.

Daher ist in den nächsten Jahren Folgendes zu tun:

Zunächst ist der Gemeinschaftsbeitrag im Hinblick auf eine Verbesserung der *Wettbewerbsfähigkeit* und der *Beschäftigungslage* optimal zu nutzen. Daher werden die von den Strukturfonds finanzierten Projekte nach ihrem Nutzen für Wachstum, Wettbewerbsfähigkeit, Umwelt und Beschäftigungslage und dem Kriterium der *Nachhaltigkeit* ausgewählt. Ferner sollen Investitionen in den Bahn- und Seeverkehr sowie den kombinierten Verkehr und den *öffentlichen Verkehrsmitteln* gefördert werden. Die private Finanzierung wird unterstützt. Die Koordinierung der gemeinschaftsfinanzierten Instrumente ist zu verstärken.

Die Verkehrspolitik steht mit der Agenda von Lissabon für Wachstum und Beschäftigung voll im Einklang. Sie umfasst Ziele mit einer längerfristigen Orientierung, wobei bei allen politischen Optionen der Ausgleich zwischen den Hauptanliegen Wirtschaftswachstum, sozialer Sicherheit und Umweltschutz gesucht wird.

Angestrebt wird dabei,

- die Mobilität von ihren negativen Nebeneffekten abzukoppeln, wie z.B. Verkehrsüberlastung, Unfällen und Umweltverschmutzung;
- das spezifische Potenzial der einzelnen Verkehrsträger zu optimieren, da deren Kapazitäten in einigen Fällen, etwa in der Binnenschifffahrt, nicht in vollem Umfang genutzt werden;
- umweltfreundliche Antriebstechniken sowie den Einsatz von Verkehrsmitteln zu fördern, die umweltfreundlicher, sicherer und energieeffizienter sind;
- die Ko-Modalität zu fördern, d. h. die effiziente Nutzung der einzelnen Verkehrsträger oder ihrer Kombinationen, um die Ressourcen optimal einzusetzen.

Verkehrspolitische Schwerpunkte

Zur Verwirklichung dieser Ziele werden in dieser Mitteilung vier verkehrspolitische Schwerpunkte gesetzt:

1. Mobilität für Bürger und Unternehmen in der gesamten Union
2. Umweltschutz, Gewährleistung der Energieversorgungssicherheit, Förderung von Mindestnormen bei der Beschäftigung sowie Schutz von Passagieren und Bürgern

3. Innovationen im Hinblick auf die Erzielung von Fortschritten bei den beiden erstgenannten Zielen, die die Effizienz und Nachhaltigkeit der Aktivitäten im Verkehrssektor steigern
4. Maßnahmen auf internationaler Ebene, um auch Drittländer für diese Ziele zu gewinnen.

Die Verkehrspolitik der Republik Ungarn

Die für die Jahre 2008-2020 ausgearbeitete Einheitliche Verkehrsentwicklungsstrategie (EVES) [HU-EV08] berücksichtigt, dass Ungarn ein aktiver Teilnehmer des Regulationssystems und der Entwicklungspolitik der EU geworden ist. Deshalb beruht selbstverständlich die EVES auf den verkehrspolitischen Grundlagen der EU.

Das strategische Dokument besteht aus drei Teilen: Ausgehend aus einer detaillierten Analyse zeigte *das Grüne Buch* [HU-GB08] auf Schlüsselbereiche, wo Eingriffe am dringendsten zu treffen waren. Die Ziele wurden unter Beachtung der Meinungen von Kommunen, Unternehmen und Interessenvertretungen konkretisiert. Anhand der Vorschläge und Bemerkungen der fachlichen und gesellschaftlichen Organisationen wurde das Grüne Buch in ein *Weißbuch* [HU-WB08] umgearbeitet und mit einem neuen Kapitel „Monitoring“ ergänzt.

Prioritäten im Personenverkehr in Ungarn

1. Optimierung der Arbeitsteilung im Personenverkehr unter Beibehaltung des über dem EU27-Durchschnitt liegenden Anteiles des öffentlichen Personenverkehrs
2. Verbesserung der Effektivität der Arbeitsteilung im öffentlichen Verkehr durch die Ko-Modalität
3. Erreichung einer steigenden Mobilität durch Sicherung der Chancengleichheit in der Mobilität
4. Wirtschaftliche Nachhaltigkeit des Personenverkehrs durch Rationalisierungsmaßnahmen

Entwicklungsprioritäten für die Verkehrsinfrastruktur

Hinsichtlich der Verkehrsinfrastruktur ergeben sich folgende Entwicklungsprioritäten:

1. Ausbildung einer für die Wettbewerbsfähigkeit günstigen Hauptnetzinfrastuktur
2. Verbesserung der regionalen (räumlichen) Erreichbarkeit

3. Entwicklung der Infrastruktur des Stadtverkehrs und des regionalen Verkehrs
4. Vorbeugung der durch die ansteigende Achsenlast der Fahrzeuge verursachte Straßenabnutzung

Horizontale Themen

1. Verringerung der Zahl der bei Straßenverkehrsunfällen Verstorbenen unter 500 Personen/Jahr
2. Ausbildung von umweltfreundlicheren und energieeffizienten Verkehrssystemen
3. Sicherung einer langfristigen Nachhaltigkeit durch die Entwicklung der Infrastruktur
4. Beschleunigung in der Einführung von ITS-Anwendungen

3.3.2 Mobilität der Zukunft, aktuelle Trends in der Verkehrslogistik

Mobilität ist einer der drei wichtigsten *Megatrends* der letzten 30 Jahre, welcher in den letzten 5-10 Jahren in wichtigen sozialen und Verbrauchertrends resultierte. [Wint09] Ausreichende Mobilität ist nicht nur eine der wichtigsten Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Erfolg, sondern auch ein wesentlicher, grundlegender Aspekt unseres alltäglichen Lebens, ein Teil unserer Lebensqualität. Deshalb bilden Aussagen über die künftigen Entwicklungen und deren Vernetzungen sowie das Zusammenführen dieser Entwicklungen zu einem Gesamtbild der Mobilitätssituation Spannungsfelder der Diskussion verkehrspolitischer Natur.

Eine umfassende und in dieser Vollständigkeit bis dahin nicht auffindbare Studie über die künftige Entwicklung der Mobilität in Deutschland wurde in der Betreuung des *Instituts für Mobilitätsforschung* (IFMO) ausgearbeitet [IFMO02].

Die Studie wurde mit der *Szenariotechnik* nach *Geschka* [Gesch90] erstellt.

Für die Untersuchungen wurden folgende *Einflussumfelder* für die Entwicklung der Mobilität in Deutschland vom Institut IFMO festgelegt:

- wirtschaftliche Entwicklung, Bevölkerungsentwicklung, raumstrukturelle Entwicklung
- Politik, insbesondere Verkehrspolitik, Umweltpolitik, Verkehrsinfrastruktur
- Technik, Technologie, Innovation
- Mensch und Arbeitswelt
- Gesellschaft, Lebensgestaltung, Werte
- Angebotsstrategien der Verkehrsträger, Mobilitätsdienstleistungen.

Als Grundlage für die Szenariobildung wurden *Meta-Deskriptoren* identifiziert, die hohe Mobilitätsrelevanz aufweisen und gleichzeitig einen sehr starken Einfluss auf die künftige Entwicklung ausüben. Dies sind folgende Einflussfaktoren:

- die wirtschaftliche Entwicklung (BIP)
- die nationale und europäische Ordnungspolitik für den Straßenverkehr
- die nationale und europäische Verkehrsorganisation und -lenkung für Luft und Schiene (inkl. ÖPNV)
- das Investitionsvolumen für die Verkehrsinfrastruktur
- der Umfang der Anlastung von externen (Umwelt-)Kosten
- die Bevölkerungsentwicklung
- das dominierende Mobilitätsleitbild.

In der Fortschreibung der Personenverkehrsszenarien [IFMO05] erwiesen sich folgende Einflussfaktoren als Haupttreiber für die Entwicklung des Personenverkehrs:

- Raumstrukturelle Bevölkerungsentwicklung
- Bruttoinlandsprodukt
- Ordnungspolitische Rahmenbedingungen für den Straßenverkehr
- Bedeutung der Verkehrspolitik in der Gesamtpolitik
- Gesamtinvestitionen in der Verkehrsinfrastruktur
- Ordnungspolitische Rahmenbedingungen für den Schienenverkehr

Abbildung 3-11 zeigt die Wirkungsbeziehungen im Einflussfeld „Mobilität“ auf Basis der sechs Einflussumfelder [IFMO05]:

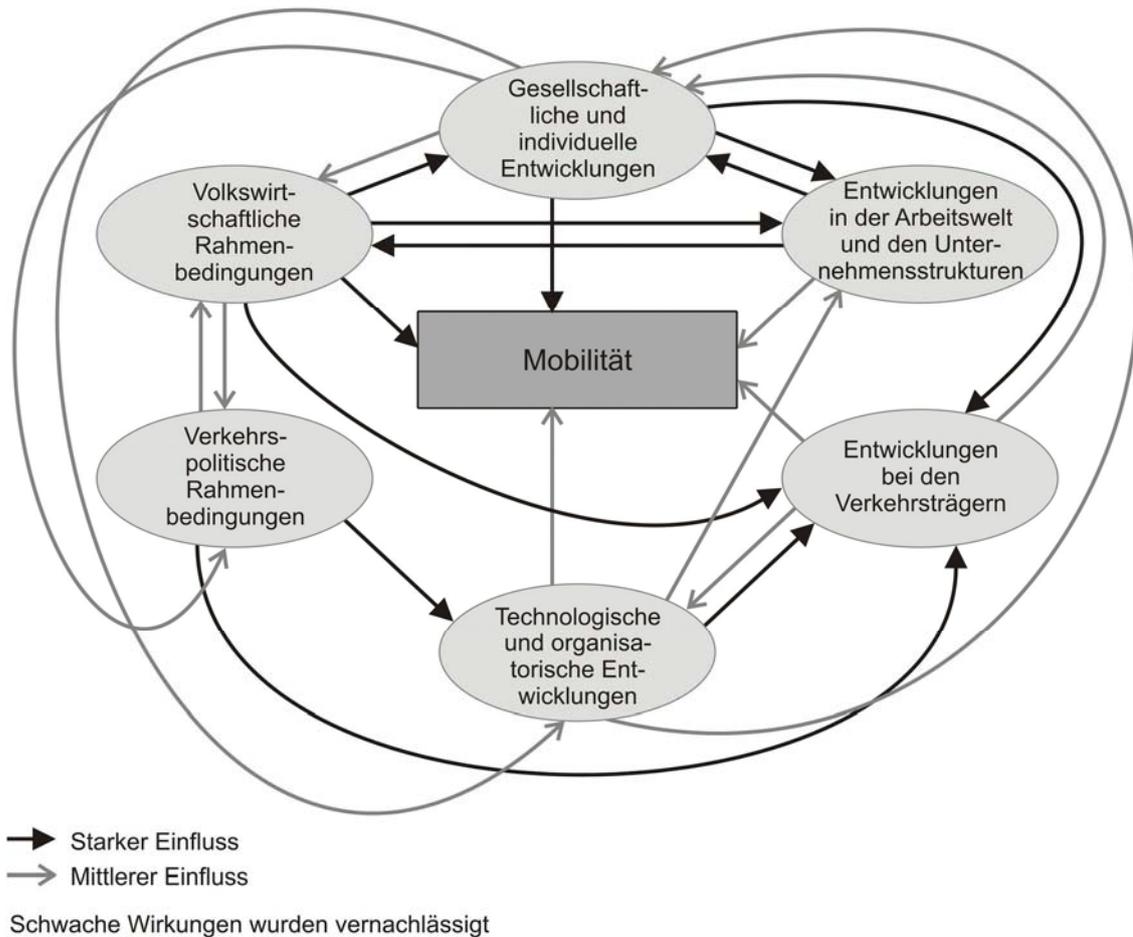


Abbildung 3-11: Wirkungsbeziehungen im Einflussfeld von „Mobilität“ [IFMO05]

Die mit der Methode der Szenariotechnik erarbeiteten Perspektiven wurden durch die Einführung und Analyse von sogenannten *Trendbruchereignissen* ergänzt, welche die möglichen Entwicklungsverläufe plötzlich in völlig andere Richtungen lenken können. Die vier Klassen von Trendbruchereignissen, die eine hohe Mobilitätsrelevanz aufweisen, sind:

- BIP-Entwicklung,
- Ölpreis-Entwicklung,
- Technik-Entwicklung und
- Weltmarkt-Entwicklung

Für eine logistische Annäherung spielen solche Trendbruchereignisse der Technikentwicklung eine ausgezeichnete Rolle, die als Quantensprünge zur gegenwärtig dominierenden Verkehrstechnik aufgefasst werden können.

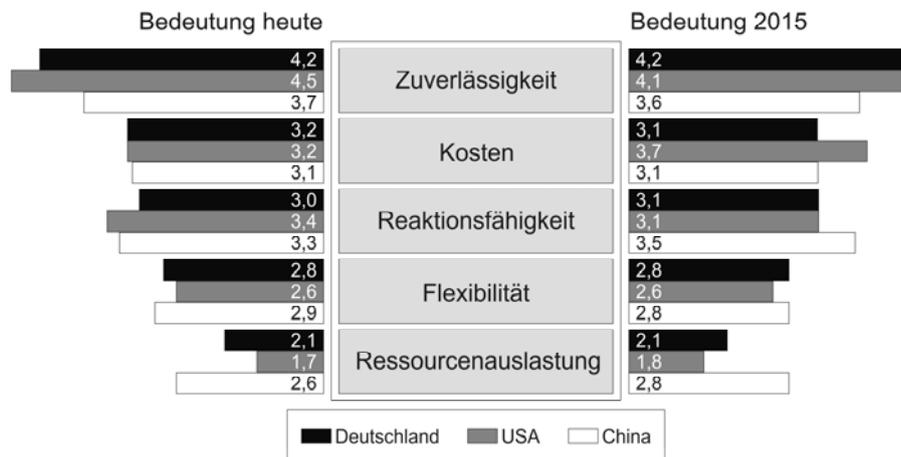
Die zwei Klassen von technologischen Quantensprüngen sind:

- die „neue Energietechnik im Kfz“ (alternative Antriebstechnologien fürs Auto)
- die „neue Transportinfrastruktur“ (alternative Technologien für Verkehrssysteme).

In dem Szenario „Mobilität braucht Aktion“ (vgl. dazu Szenariostudien [IFMO02]; [IFMO02]) geht man davon aus, dass weitblickende, auf eine Optimierung des Verkehrssystems hinzielende Entscheidungen getroffen und sukzessive umgesetzt werden sollen. Dazu sind auf das Gesamtsystem wirkende Innovationen notwendig, deren Einführung und Verbreitung bis 2020 bzw. 2025 zu einer erträglichen Verkehrssituation führen kann.

Szenarien für die Zukunft des Straßenverkehrs in Ungarn bis 2030 wurden von ERTRAC-Hungary ausgearbeitet. [ERTR09]

Die Globalisierung bildet branchen- und sektorübergreifend den bestimmenden Megatrend mit Blick in die Zukunft. Insofern gelten die allgemeinen *Trends der Logistik* maßgebend auch für den Verkehrslogistikbereich. Die Studie der Bundesvereinigung für Logistik bestätigt die wichtigsten Megatrends in der Logistik: Globalisierung, Umwelt, Sicherheit und Innovationen. [BVL08] (vgl. dazu Abbildung 3-12)



(1= "geringe Bedeutung" bis 5 = "hohe Bedeutung"; Mittelwerte aus allen Antworten)

Abbildung 3-12: Logistikziele – Internationaler Vergleich [BVL08]

Die Lösung der heutigen und vor allem der zukünftigen Verkehrsprobleme setzt eine *integrierte Verkehrspolitik* voraus, welche den Grundprinzipien der „Nachhaltigkeit“ und

„Zukunftsfähigkeit“ verpflichtet ist. Es reicht nicht aus, Innovationen in einzelnen Verkehrssystemen einzuführen, vielmehr geht es um die Optimierung von Schnittstellen entlang gebrochener Verkehrsketten und um die Verbesserung der Vernetzung.

Die Verkehrsketten sollten als Teilsysteme neuer Verkehrsnetze im Hinblick auf die Schnittstellen, die Anschlussinfrastruktur, den kombinierten Verkehr, Kooperationen von Infrastrukturbetreibern, aber auch von Verkehrsunternehmen, Wirtschaft, Arbeitgebern und öffentlicher Verwaltung ganz einheitlich betrachtet werden. [AgIVP02]

In einer Mitteilung über die nachhaltige Zukunft für den Verkehr betont die Europäische Kommission, dass das optimale Funktionieren des Verkehrssystems die vollständige Integration und *Interoperabilität* der einzelnen Teile des Gesamtnetzes sowie den Verbund der jeweiligen modalen Netze voraussetzt. Die Knotenpunkte stellen Logistikzentren des Netzes dar und bieten Anschluss- und Wahlmöglichkeiten für den Güter- und Personenverkehr. [MtEUK09]

Auf dem Wege zu einem integrierten, technologieorientierten nutzerfreundlichen System werden die Prinzipien der Intermodalität und Ko-Modalität in den Mittelpunkt gestellt. [SnVDA09]

Um eine bessere Verkehrsabwicklung in den Ballungsräumen zu erreichen, zeigen staatliche Institutionen immer größeres Interesse an mehr und effizienterer *intermodaler Vernetzung*.

Eine Reihe von Pilotprojekten in Ballungsräumen, die von der Bundesregierung, den jeweiligen Landesregierungen und regionalen Verkehrsbetrieben bzw. -verbänden finanziert wurden, z. B. „Mobinet“ in München, „WAYflow“ im Rhein-Main-Gebiet, „intermobil“ in der Region Dresden verliefen weitgehend erfolgreich. [IFMO02]

- Ein besonderes Hindernis bei der Umsetzung der Intermodalität sind die unklaren Zuständigkeiten für die Gestaltung der Schnittstellen.
- Den Verkehrsteilnehmern erscheint oft der Wechsel des Verkehrsmittels als lästiger Aufwand.

Um Verbesserungen des Umweltschutzes, der Verkehrssicherheit, der Qualität und der Wirtschaftlichkeit in den Verkehrsnetzen erreichen zu können, sind innovative Lösungen und Technologien wie neue Antriebstechnologien und Kraftstoffe, Werkstoff- und Konstruktionstechniken, Fahrerunterstützungssysteme, intelligente Transportsysteme sowie die Verkehrstelematik notwendig.

Über die technologische Entwicklung im Hinblick auf die aktuellen Trends und relevanten technischen Innovationen wird im nächsten Abschnitt eine Übersicht gegeben.

Relevante technische Innovationen in der Verkehrslogistik

Um die Ziele der gewünschten Szenarien [IFMO02] für eine bessere Verkehrsentwicklung erreichen zu können, ist die Ausarbeitung, Einführung und Verbreitung von Innovationen notwendig.

In einer näheren Beschreibung der *Entwicklungspfade* im Verkehrsbereich bis 2025 wurden vier relevante Innovationen benannt.

- die individuelle Verkehrssteuerung auf der Straße
- die Interoperabilität des Schienenverkehrs in Europa
- das Electronic Ticketing
- die Entwicklung und Einführung von Containerschiffen der 12.000 t EU-Klasse

In den letzten Jahren ist zur Lösung der Verkehrsprobleme zunehmend ein Lösungsansatz in den Vordergrund gerückt, welcher mit dem Begriff *Telematik* definiert ist.

Durch den internen Einsatz in einzelnen Verkehrsmitteln als auch durch die vernetzte und verkehrsträgerübergreifende Anwendung in einer integrierten Verkehrslogistik können Nutzungsoptimierungen der vorhandenen verkehrlichen Infrastruktur durchgeführt werden.

Die europaweite Kompatibilität der verwendeten Systeme macht es möglich, eine bessere Vernetzung von großen, komplexen verkehrslogistischen Systemen zu verwirklichen.

Eine Studie der Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e. V. hat die Zielsetzungen von Telematikanwendungen [AgBSVI99] folgendermaßen bestimmt:

- Erhöhung der Verkehrssicherheit
durch Einrichtungen in Fahrzeugen und am Fahrweg, sowie durch gezielte Verkehrsinformationen (z.B. durch Verkehrswarnfunk)
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit,
d. h. eine Erhöhung der Produktivität und Kapazität durch bessere Nutzung der vorhandenen Infrastrukturen aller Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser und Luft)
- Wahrung der Mobilität,
u.a. durch eine Verbesserung des Informationsniveaus

- Vernetzung der Verkehrsträger untereinander zur Ausnutzung der jeweiligen Systemvorteile
- Beitrag zur Umweltverträglichkeit, z. B. durch Verkehrsvermeidung und -verminderung durch moderne Leittechnik (Steuerungs- und Beeinflussungsstrategien, Logistikkonzepte)
- Service für Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer durch aktuelle, verkehrsträgerübergreifende Informationsbereitstellung

Am häufigsten wird Telematik im Straßenverkehr und im ÖPNV eingesetzt.

Im motorisierten Individualverkehr (MIV) findet man Anwendungen als Kollektive *Leit-systeme* und individuelle Leitsysteme, im öffentlichen Verkehr vor allem beim Betrieb schienengebundener Verkehre, aber auch schrittweise im Busverkehr.

Folgende *Informations- und Kommunikations-Technologien* (IuKT) haben *entlastende Wirkung auf die Verkehrssituation*. [IFMO02]

- City-Leitsysteme, flexible Geschwindigkeitsregelung auf Fernstraßen, Verkehrsinformation in Echtzeit, automatische Gebührenerhebung
- Systeme zur Abstimmung von Fahrplänen im Rahmen der besseren Vernetzung der Verkehrsmittel
- Verkehrsträgerübergreifende Mobilitätsberatung per Telefon/Handy
- Routen- und Auslastungsoptimierung für Lkw durch satellitengestützte IuK-Technologie
- Navigations- und Informationssysteme, Internetverfügbarkeit in den verschiedenen Verkehrsmitteln
- internetbasierte Buchungs- und Abrechnungssysteme in der Reiseorganisation und -abwicklung.

Die IuK-Technologie trägt zur Verbreitung der Heim- bzw. Telearbeit bei und reduziert dadurch den Berufs- und Pendlerverkehr, was wiederum die Bildung von Fahrgemeinschaften unmöglich macht.

Navigations- und Verkehrsinformationssysteme werden integraler Bestandteil vieler Modelle, reduzieren Staus und den Parksuchverkehr. Geeignete Systeme im Auto entlasten den Fahrer und machen das Fahren sicherer. Beispiele hierfür sind Adaptive Light Control, Brake Force Display, aktives Gaspedal, aktive Lenkung und Kamera mit Bildprozessor.

Geoinformatik in der Verkehrslogistik

Zur Unterstützung der IuK-Technologien mit einer höheren Genauigkeit für weitergehende Ortungs-Anwendungen und unabhängig von den amerikanischen Militärs (GPS) wird das unabhängige, hochpräzise System zur Ortsbestimmung und Zeitmessung „Galileo“ als eigenes europäisches Satellitensystem entwickelt.

Die wichtigsten allgemeinen Logistik-Anwendungen sind:

- Verkehrsleitsysteme
- Container-Management
- Flottenmanagement und Maut
- Sendungsverfolgung

An der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) wurde am 10. März 2010 das Entwicklungslabor und Testfeld für Ortung, Navigation und Kommunikation in Verkehr und Logistik in Deutschland eingeweiht. Damit kann in der Zukunft die Vernetzung der verschiedenen Technologien und z.B. der Aufbau von intelligenten und umweltorientierten Verkehrssystemen in der Verkehrs- und Logistikbranche und dem öffentlichen Nahverkehr verwirklicht und wesentliche Entwicklungen in der Telematik und Kommunikation erreicht werden. (Vgl. dazu [Sch10])

In einer Zusammenarbeit der Miskolci Egyetem (Universität Miskolc), der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) und der Borsod Volán AG. wurde im Juni 2010. eine Studie über die Anwendung des Galileo Navigationssystems in der Verkehrslogistik angefertigt. [MMBV10]

In der Abbildung 3-13 wird gezeigt, auf welchen Gebieten mit Hilfe des Navigationssystems wichtige Fortschritte erreicht werden können. (vgl. dazu Tabelle 3-2)

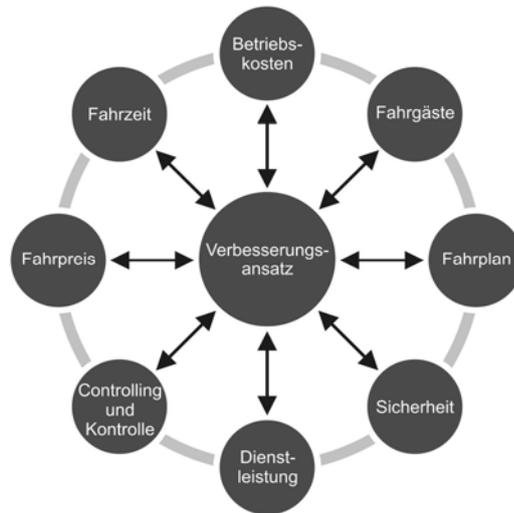


Abbildung 3-13: Verbesserungsansatz der Nutzung von Navigationssystemen

Tabelle 3-2: Potenziale der Nutzung von Navigationssystemen in der Verkehrslogistik

Verbesserungsansatz	Realisierung durch ...
Genauere Bestimmung der Fahrzeit der Fahrzeuge	aktuelle Verkehrsinformationen
Genauere Bestimmung der Anzahl der Fahrgäste	gerichtete Bewegungssensoren an den Türen
Bessere Kenntnisse über die Fahrge- wohnheiten der Fahrgäste	elektronische Fahrkarten
Kundenorientierte Anpassung und Optimierung der Fahrpläne	Erfassung von Adressdaten und digitale Fahrkarten
Genauere Bestimmung der Betriebskosten	die Sensoren im Fahrzeug
Niedrigere Betriebskosten	bessere Routenplanung
Bessere Informations- Dienstleistungen für die Fahrgäste	die Messung der aktuellen Position der Fahrzeuge
Bessere Verkehrskontrolle	aktuelle Verkehrsinformationen Regelung der Verkehrsampeln
Bessere Informations-Services für die Betriebsleitung	die erhöhte Quantität und Qualität von Verkehrsinformationen
Geringere Umweltbelastung durch Emissionen	optimierte Fahrrouten
Flexible Fahrpreistarife	digitale Fahrkarten
Verbesserte Planung der Instandhaltung	aktuelle Informationen über den Zustand von Motoren und Fahrzeugen
Einführung von neuen Dienstleistungen	z.B. Einführung von Taxi-Bussen (Der Bus fährt auf einer flexiblen Route.)
Erhöhung der Fahrt-Sicherheit	die neuen, on-Board-Sensoren in den Fahrzeugen

Diese Innovationen tragen dazu bei, eine verbesserte Entscheidungsfindung auch in komplexen Entscheidungssituationen zu ermöglichen. Verfahren zur Behandlung solcher komplexer Entscheidungssituationen werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

3.3.3 Konventionelle Verfahren zur Behandlung komplexer Entscheidungssituationen im öffentlichen Personenverkehrsnetz

Laut *Gigerenzer* [Gig99] folgen „gute“ Entscheidungen den Regeln der Logik, den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitstheorie oder der Maximierung des erwarteten Nutzens.

Die Definition der Komplexität nach *Baecker* [Bae99] lautet:

„Ein System (oder die Umwelt eines Systems für das System) ist umso komplexer, je mehr Elemente es aufweist, je größer die Zahl der Beziehungen zwischen den Elementen ist, je verschiedenartiger die Beziehungen sind, und je ungewisser es ist, wie sich die Zahl der Elemente, die Zahl der Beziehungen und die Verschiedenartigkeit der Beziehungen im Zeitverlauf verändert.“

Nach dieser Definition sind Personenverkehrsnetze komplexe Systeme: Um situationsadäquat richtige Entscheidungen treffen zu können, benötigt man Verfahren zur Behandlung komplexer Entscheidungssituationen.

Das Treffen von Entscheidungen lässt sich in einer Mehrschrittprozedur angeben:

1. Feststellen eines Entscheidungsbedarfs
2. Analyse des Entscheidungsumfeldes
3. Ermittlung der Entscheidungsalternativen
4. Beurteilung der möglichen Konsequenzen jeder Alternative
5. Entscheidung und Umsetzung einer Alternative
6. Beobachtung des weiteren Verlaufs und allenfalls Revision der Entscheidung bzw. laufende Prüfung auf Bedarf nach Folgeentscheidungen

Zum Treffen von Entscheidungen existieren eine Reihe von Planungs-, Optimierungs- und Modellierungsmethoden, die separat oder in Kombination Anwendung finden. Dabei ist anzumerken, dass sie häufig ebenfalls sehr komplexen Charakter besitzen und demzufolge einen hohen Modellierungsaufwand erzeugen.

Planung im Öffentlichen Personenverkehr (ÖPV)

Für die Qualität und Zuverlässigkeit der Dienstleistungen im ÖPV hat die *Planung* eine sehr große Bedeutung. Die *traditionelle Verkehrsplanung* besteht aus den, in Abbildung 3-14 dargestellten, hierarchischen Planungsschritten.

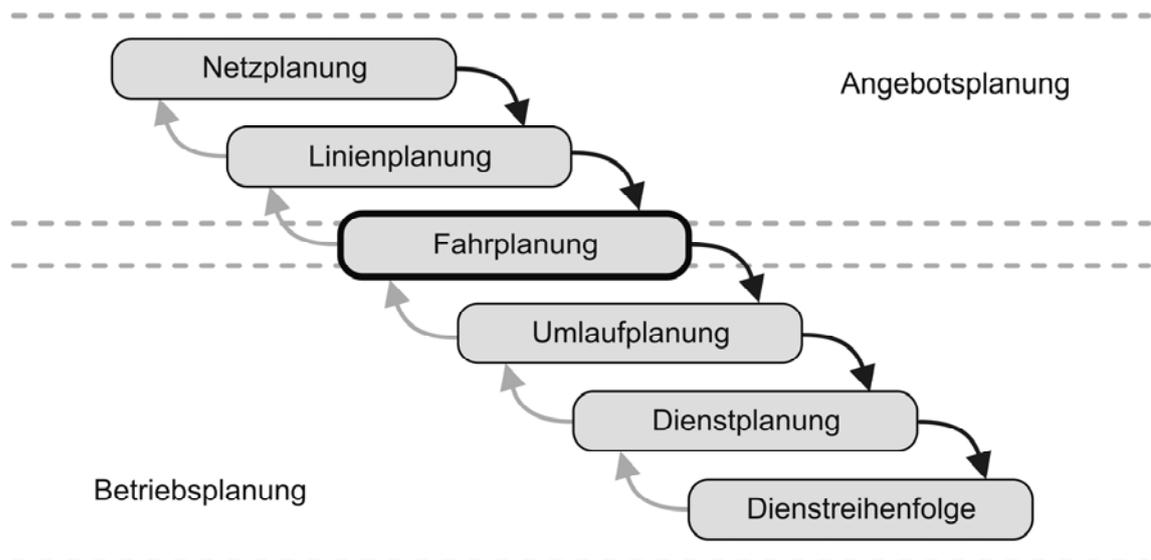


Abbildung 3-14: Traditionelles hierarchisches Vorgehen in der Verkehrsplanung
[Bus98]

Eine detaillierte Unterteilung des Planungsprozesses des öffentlichen Personenverkehrs in einzelne strategische und operative Planungsschritte ist in Abbildung 3-15 dargestellt.

Um eine gesamtkostenoptimale Planung unter Berücksichtigung der von den Bestellorganisationen vorgegebenen Erwartungen hinsichtlich der Dienstleistungsqualität im ÖPV zu erstellen, wäre es notwendig, die einzelnen Schritte des Planungsprozesses simultan zu lösen.

In die detaillierte Beschreibung dieser einzelnen Planungsschritte wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da sie in der relevanten Fachliteratur umfassend ausgeführt werden. (Vgl. dazu [Bor02] [Bor04] [Hag00])

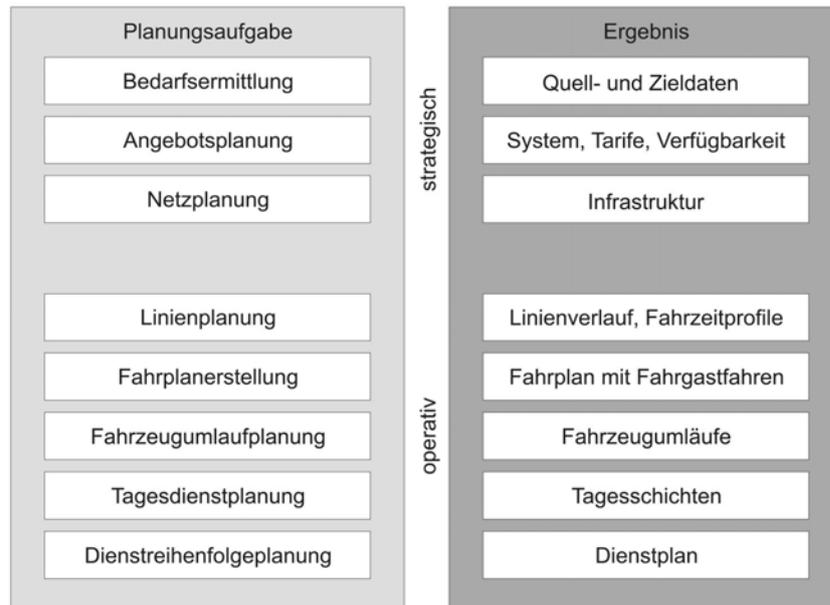


Abbildung 3-15: Planungsprozess im ÖPV [Bus97] [Ass80] [Kli05]

Im Rahmen der **Linienplanung** werden die Grundrouten und Fahrzeitprofile der zu bedienenden Linien bestimmt. Für die Linienplanung im ÖPV haben *Borndörfer*, *Grötschel* und *Pfetsch* [Bor04] Modelle entwickelt, *Bussieck* und *Zimmermann* [Bus97] Linienführungen optimiert und Routenplanungsmethoden ausgearbeitet.

Im Rahmen der **Fahrplanerstellung** werden die Taktfrequenz der Linie und die Abfahrtszeitpunkte für jede Linienfahrt bestimmt.

Ältere Studien wie z.B. von *Genc* [Gen03] beschäftigten sich mit der *Kernzeitoptimierung unter Nutzung des Branch-and-Bound-Verfahrens* und der linearen Programmierung.

Aktuell verwendet werden Module zur *Ganztagesoptimierung* mit diversen Methoden der künstlichen Intelligenz, die dabei bezüglich ihrer Eignung evaluiert werden. Ein von *Niepel* [Nie08] entwickeltes Verfahren macht es möglich, Nebenbedingungen wie den Verlauf der Linienvarianten, Taktdichten, etc. automatisch aus bestehenden Fahrplänen zu übernehmen, Fahrpläne zu bewerten und Optimierungsspielräume zu erkunden.

Mit einem vom *Kolonko* [Kol, Fun02] beschriebenen Instrument können genetisch optimierte Fahrpläne für Verkehrsnetze auf einem relativ abstrakten Planungslevel berechnet werden. Das Optimierungsverfahren ist in der Lage, komplexe Probleme mit mehrdimensionalen Zielsetzungen zu behandeln.

Ein spezielles Gebiet der Fahrplanung ist die *Taktfahrplanung*. Für die Lösung der Probleme in der Taktfahrplanung haben *Serafini* und *Ukovich* [Ser89] ein mathemati-

ches Modell ausgearbeitet. *Nachtigall* [Nac98] befasste sich mit der Optimierung von periodischen Netzwerken. Verbesserungen und Verfeinerungen in den Modellen und Optimierungsverfahren haben die Arbeiten von *Liebchen*, *Schmidt* und *Willumsen* [Wil81] mit sich gebracht.

Im Rahmen der **Fahrzeugumlaufplanung** werden die vom Fahrplan vorgegebenen Personenbeförderungsfahrten den vorhandenen Fahrzeugen zugeordnet. Auf dem Gebiet der Fahrzeugumlaufplanung untersuchten *Daduna* und *Völker* [Dad97] die unscharfen Abfahrtszeiten.

Neue Lösungsmodelle im öffentlichen Verkehr mit mehreren Depots und Fahrzeugtypen stellten *Melloulli* und *Kliewer* [Mel02] vor, basierend auf den Arbeiten von *Löbel* und *Strubbe* [Löb96]. *Fischetti* [Fis99] befasste sich eingehend mit der Anwendung der *Branch-and-Cut* Methode für die Lösung des sogenannten *Multi-Depot Vehicle Scheduling* Problems.

Die Planung des Personaleinsatzes zur Bedienung der im Rahmen der Umlaufplanung festgelegter Fahrzeugumläufe erfolgt im Rahmen der **Dienstplanung** und der **Dienstreihenfolgeplanung**.

3.3.4 Weiterentwicklungen im methodischen Bereich

Seit einigen Jahren werden verstärkte Anstrengungen unternommen, mathematische Methoden zu erschließen, um mehr Planungsschritte in die Optimierungsverfahren zu integrieren. Betriebsplaner werden durch Softwarepakete unterstützt, welche über einen mathematischen Optimierungskern verfügen.

Liebchen [Lie06] hat ein Optimierungsmodell vorgestellt, das dazu geeignet ist, für die Dienstplanung sehr geeignete Fahrpläne zu konstruieren, ohne dabei die Angebotsqualität aus dem Visier zu verlieren. Trotz ständiger Weiterentwicklung dieses Modells [Lie07], [Lie08] steht jedoch die Integration einer vollwertigen Linienplanung mit einer vollwertigen Fahrplanoptimierung weiterhin aus.

Der Zweck und Nutzen der Integration besteht darin, in frühen Planungsschritten verlässliche Kosten- und Qualitätswerte für die nachgelagerten Planungsschritte zu liefern. Zur Erreichung dieses Zieles kann auch das von *Michaelis* und *Schöbel* [MicSchö07] vorgestellte, heuristische Verfahren beitragen.

Für die Planung werden Optimierungsmodelle entwickelt, die für die integrierte Planung reale Eingangsgrößen aus den Prozessen im öffentlichen Verkehrsnetz benötigen.

Für die Planung und Simulation mit Hilfe der logistischen Betrachtungsweise braucht man, in geeigneter Struktur,

- die Kenntnis des Fahrgästeflusses und
- die Anzahl der Fahrgäste als Quell- und Zieldaten.

Kenntnis des Fahrgästeflusses

Mit der Darstellung des Fahrgästeflusses im ÖPNV haben sich *Kirchheim* und *Rudnicki* [Kir,Rud97] in Form stochastischer Prozesse befasst und festgestellt, dass die hierbei auftretenden realen Größen, im Unterschied zu den geplanten Größen (z. B. Fahrpläne u. ä.), Zufallsgrößen darstellen, deren Verhalten durch ihre Verteilungsgesetze zu beschreiben sind.

Folgende Einflussfaktoren bestimmen die realen Größen im ÖPNV:

- Linienführung mit Fahrzeugfolge und Einwirkung anderer Verkehrsteilnehmer
- eingesetzte Fahrzeugtypen mit ihrer Kapazität, ihrer Zuverlässigkeit, Nutzerservice und Bedieneigenschaften für die Fahrzeugführer
- Auslastung und Passagierverhalten

Die Untersuchungen von *Adamski* [Ada92] beweisen, dass die Haltedauer der Fahrzeuge an den jeweiligen Haltestellen durch die Ein- und Aussteigeregeln, das Ein- und Aussteigerverhalten und die Anzahl der Passagiere stark beeinflusst wird. Die Haltedauern wiederum beeinflussen die Fahrplantreue der eingesetzten Fahrzeuge und somit die Zuverlässigkeit der Verkehrsdienstleistung.

Rudnicki [Rud92] hat festgestellt, dass bei Haltestellen mit hoher Busfrequenz (z. B. Busfolge im Mittel 5 Minuten oder kürzer) sich die Passagiere nicht an einem Fahrplan orientieren. Für Haltestellen mit geringer Busfrequenz (z. B. Busfolge im Mittel 15 Minuten oder länger) wurde ein Modell der Personenankünfte folgendermaßen beschrieben:

Die Gesamtwartezeit W aller Personen an einer Haltestelle in einer Periode beträgt:

$$W = \sum_{k=1}^{N_n} W_k = N_n \cdot Z_n - \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{l=1}^k S_k = N_n \cdot Z_n - \sum_{k=0}^{N_n-1} (N_n - k) \cdot S_{k+1} \quad \text{Formel 3-1}$$

Wobei:

N_n : Anzahl der Passagiere, die in der n -ten Periode $T_{n-1}^{\delta}, T_n^{\delta}$ an der Haltestelle eintreffen und dort auf den Bus warten

T_k : der Zeitpunkt, an dem der k -te Passagier in der n -ten Periode eintrifft;
 $k = 1, 2, \dots, N_n$

$W_k = T_n^{\delta} - T_{n-1}^{\delta}$ die Wartezeit des k -ten Passagiers an der Haltestelle,

$Z_n = T_n^{\delta} - T_{n-1}^{\delta}$ die Dauer der n -ten Periode (Periodenlänge),

$T_0^{\delta}, T_1^{\delta}, T_2^{\delta}, \dots$ die realen (nicht fahrplanmäßigen) Ankunftszeiten der Fahrzeuge
 (der öffentlichen Verkehrsmittel) an einer Haltestelle der betrachteten Linie,

S_k : der Zeitraum zwischen zwei eintreffenden Personen
 ($S_k := T_k - T_{k-1}$ für $k = 1, 2, 3, \dots$)

sind, unter der Bedingung

$S_1 + S_2 + \dots + S_k \leq Z < S_1 + S_2 + \dots + S_k + S_{k+1}$, wenn das Ereignis $\{ N_n = k \}$

vorliegt.

Bestimmung der Anzahl der Fahrgäste als Quell- und Zieldaten

Die Bestimmung der Verkehrsnachfrage ist Voraussetzung für die Modellierung und Simulation von Verkehrsnetzwerken. Die Verkehrsaktivitäten der Menschen in einem Raum können zweckmäßig vektorieil in Verkehrsmodellen zusammengefasst werden. Laut *Steierwald* [Ste05] geht es bei den *Verkehrsstrommodellen* darum, die Verkehrsströme F_{ij} von den Quellen i zu den Zielen j zu bestimmen, den Quellverkehr Q_i jeder Verkehrszelle i also auf die Zielverkehrszelle j zu „verteilen“ (Verkehrsverteilungsmodell). Die Matrix F_{ij} der Quelle-Ziel-Ströme heißt Quelle-Ziel-Matrix oder Verkehrsmatrix. Aus der englisch-amerikanischen Fachliteratur wird der Ausdruck *Origin-Destination-Matrix*, kurz *OD-Matrix* übernommen.

Bei den *Individualverhaltensmodellen* ist für einen bestimmten Verkehrsteilnehmer die Wahrscheinlichkeit $p_{j,i}$ für die Auswahl der Zielverkehrszelle j bei einem Weg von Quelle i aus zu ermitteln. (Verkehrszielwahlmodell)

Seit dem ersten mathematischen Modell von *Voorhees* [Voo56] aus dem Jahr 1956 zur Ermittlung der Quelle-Ziel-Ströme entwickelte sich die Verkehrsmodelltheorie. Bis in die Siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts dominierten Modelle in Analogie zu Newtons Gravitationsgesetz (*Gravitationsmodelle*). Dann wurden allgemeingültige Konzepte wie

die der Entropiemaximierung oder der Informationsminimierung (Entropiemodelle) konzipiert, die in der Physik als statistische Theorien weit verbreitet sind.

Die Ermittlung von OD-Matrizen und somit die Bestimmung der Verkehrsnachfrage wurde anfänglich grundsätzlich auf Verkehrszählungen aufgebaut. (*Robillard* [Rob75]; *Willumsen* [Wil81]; *Bell* [Bel83]; *Brenninger-Goethe* [Bre89]).

Anfang der neunziger Jahre wurden die OD-Matrizen dynamisiert und neue Theorien und Annäherungen ausgearbeitet. (*Daly; Spiess*) [Dal90] [Spi90]

Vanderbei entwickelte zusammen mit *Iannone* [Van94] einen *Algorithmus* zur Erreichung einer hohen Wahrscheinlichkeit (*Maximum Likelihood Estimation*) im Poissonstochastischen Modell. In diesem Verfahren werden die Zählungsdaten in einem iterativen Prozess gesammelt. So wird ein Ergebnis mit einer immer höheren Wahrscheinlichkeit erreicht:

$$\tilde{\Lambda}^{(t+1)} = p\tilde{\Lambda}^{(t)} + q\tilde{\Lambda}^{(t,cur)} \quad \text{Formel 3-2}$$

wobei:

$\tilde{\Lambda}^{(t)}$ die derzeitige Schätzung,

$\tilde{\Lambda}^{(t+1)}$ die aktualisierte Schätzung,

p und q nicht negative reelle Zahlen mit ihrer Summe = 1 und

(t, cur) Zeitintervall der statistischen Beobachtung zwischen den Zeitpunkten t und $t+1$

sind.

Für die praktische Anwendung der OD-Matrix wird oft die, für die Verkehrsnetzplanung optimierte, Software EMME/2 benutzt. (*Spiess* [Spi90]; *Makula* [Mak00])

3.3.5 Modelle in der Verkehrslogistik

Im 5. Rahmenprogramm der EU im sogenannten „Polloco“ Projekt wurden folgende moderne Methoden der Entscheidungsunterstützung für das Transport- und Logistikbereich vorgestellt. [Pol04]

- Einfache Zielfunktionsoptimierungen (*Single – Objective Optimization Methods*)
- Heuristische Algorithmen (*Heuristic Algorithms*)
- Simulationstechniken (*Simulation Techniques*)

- Verkehrsregelungsmethoden (*Traffic Control Methods*)
- Multikriterium Entscheidungsunterstützung (*Multiple Criteria Decision Aid Methods*)

Die Funktion und Bedeutung der *Modelle* zur Unterstützung der Entscheidungen wird immer stärker. Abbildung 3-16 zeigt die Rolle der Verkehrsmodelle in den Entscheidungsprozessen:

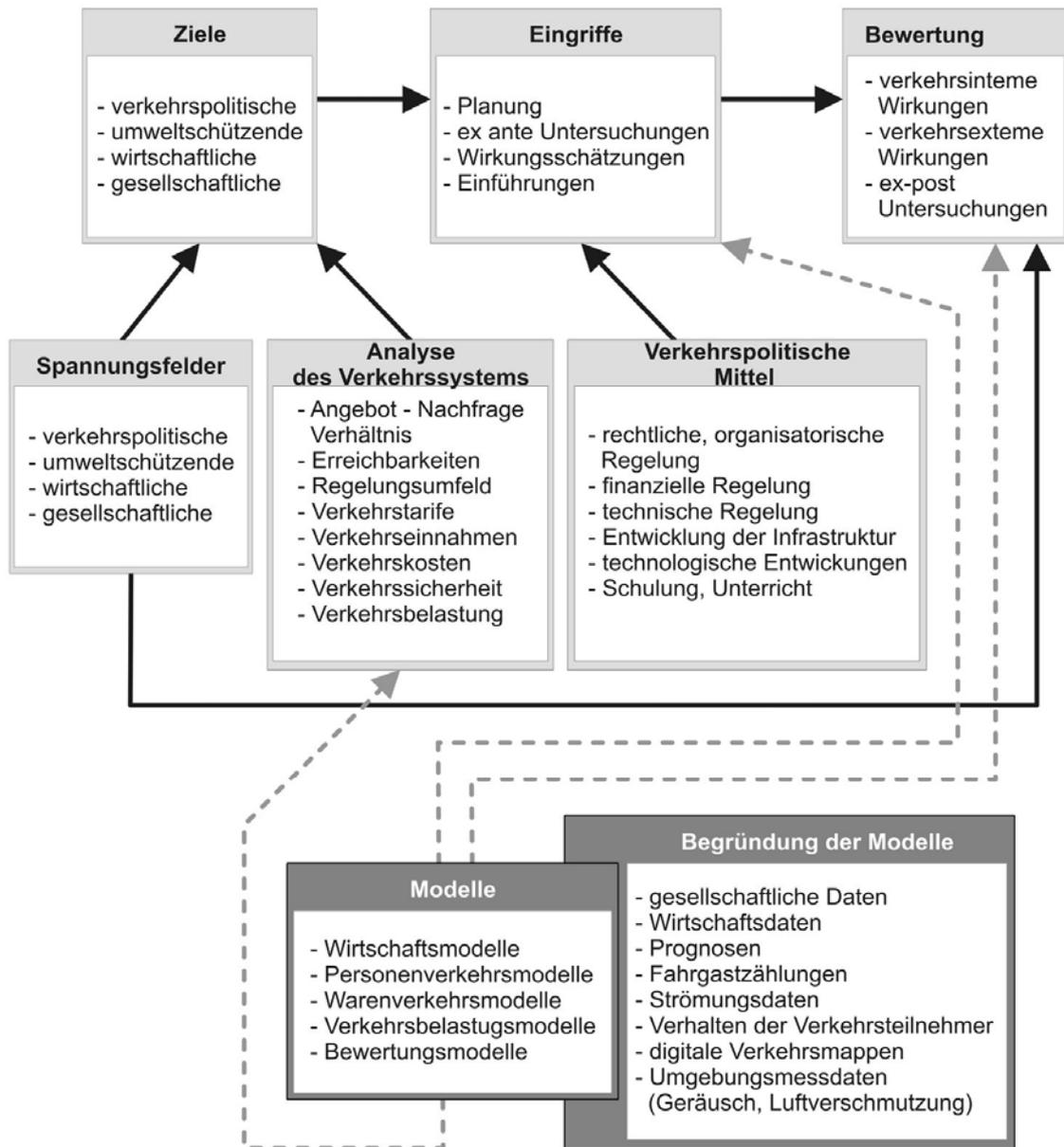


Abbildung 3-16: Funktion und Bedeutung der Verkehrsmodelle in den Entscheidungsprozessen [BeZs10]

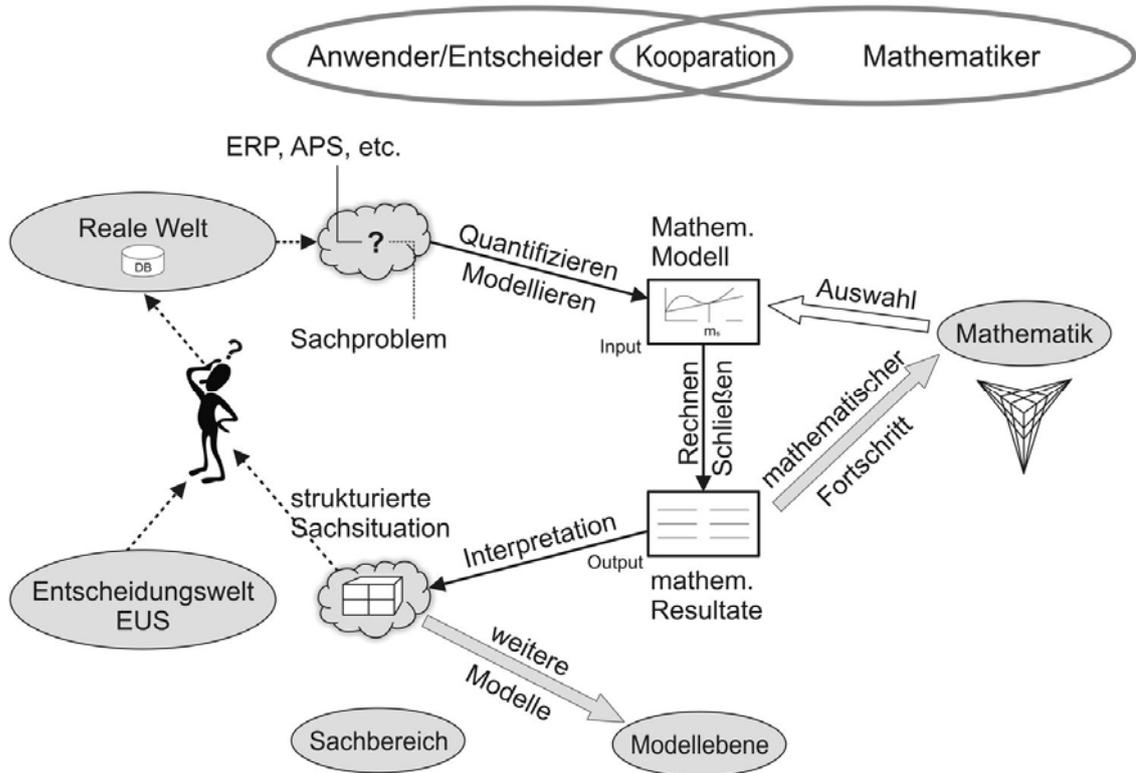
3.3.6 Spezifische Gesichtspunkte der logistischen Betrachtung eines Netzwerkes im öffentlichen Straßenverkehr

Zur Untersuchung des logistischen Netzwerkes im öffentlichen Straßenverkehr muss man zunächst die relevanten Gesichtspunkte festlegen. Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Gesichtspunkte sind die Folgenden:

- Sehr wichtig ist zunächst die Abgrenzung der Untersuchungen.
- Zur mathematischen Behandlung des abgegrenzten Systems soll ein Netzwerkmodell mit Hilfe der Graphentheorie geschaffen werden.
- In diesem Graphenmodell sollen die wirklichen Objekte mit den virtuellen Objekten identifiziert werden.
- Nach der Identifizierung der Objekte sollen sie mit Hilfe logistischer Parameter beschrieben werden.
- Die in der Wirklichkeit zwischen den Netzwerkobjekten bestehenden Verbindungen werden mit mathematischen Formeln beschrieben.
- Die im Verbindungssystem möglichen Netzwerkverbindungen werden durch logistische Parameter charakterisiert. Dazu soll die Menge der Parameter definiert werden.
- Das Betreiben der Netzwerkobjekte soll erschlossen und Betriebsstrategien zu den einzelnen Objekttypen ausgearbeitet werden.
- Im Fall solcher Mengen, die beim Betreiben des Netzwerkes interessieren, sollen die Interessen- und Erwartungsverhältnisse in Zusammenhang mit dem Netzwerk festgestellt werden.
- Zur Untersuchung des Netzwerkmodells müssen die notwendigen Zielfunktionen und derer Parameterabhängigkeit bestimmt werden.
- Im Fall der Anwendung der bestimmten Zielfunktionen müssen entsprechende Optimierungsmethoden gefunden werden, ergänzt mit den dazu gehörenden Restriktionen und Randbedingungen.

In Abbildung 3-17 sind die Bereiche der Modellbildung als Betrachtungsgegenstand dargestellt. Drei Bereiche bzw. Ebenen können unterschieden werden: die Sachebene (Reale Welt, Entscheidungswelt), die Modellebene und die Ebene der Mathematik. Die Modellebene steht im Schnittpunkt von Sachbereich und Mathematik. [Bar09]

Mit der Modellierung soll die Kooperation zwischen Sachexperten erleichtert und Entscheidungshilfe für die Ebene der Entscheidungsunterstützung (EUS) geleistet werden.



Legende:

- APS Advanced Planning System
- DB Datenbank
- EUS Entscheidungsunterstützungssystem
- ERP Enterprise Resource Planning

Abbildung 3-17: Bereiche der Modellbildung als Betrachtungsgegenstand [Oss00]

Bretzke [Br08] definiert ein logistisches Netzwerk als ein „geordnetes System von hierarchisch und geografisch angeordneten, im Hinblick auf ein Leistungsziel komplementären Ressourcenknoten und diese Knoten verbindenden Flüssen („Kanten“), dem die Aufgabe zufällt in einem Leistungsverbund Quellen bedarfsgerecht und wirtschaftlich mit Senken (Abnehmern) zu verbinden“.

4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes

Bei der Untersuchung des Straßenverkehrsnetzes wird von einem realen System ausgegangen. Ein solches Netzwerk besitzt folgende Elemente:

- Fahrzeugdepots, Parkplätze
- Instandhaltungswerkstätten
- Fahrzeugeinheiten, Fahrzeugflotte
- Fahrzeugpersonal
- Straßennetz
- Haltestellen
- Fahrgäste
- Anknüpfende Verkehrsinfrastruktur von anderen Verkehrszweigen
- Standort der Managementzentrale
- Wohnorte von Mitarbeitern
- usw.

Selbstverständlich können noch sehr viele, mit dem Betrieb des Netzwerkes in Verbindung stehende Elemente angegeben werden. Da die Anzahl der Elemente zur Behandlung im logistischen Modell in einer sinnvollen Größe begrenzt werden soll, werden die Untersuchungen an einem öffentlichen Straßenverkehrsnetz durchgeführt, das sich durch folgende Aussagen charakterisieren lässt:

- Gegeben sind das Straßennetz und seine Parameter.
- Gegeben ist die, für den öffentlichen Straßenpersonenverkehr geeignete, Fahrzeugflotte mit ihren Kennwerten.
- Gegeben sind die Haltestellen des Netzwerkes mit ihren Kennwerten.
- Gegeben sind die Fahrzeugdepots mit ihren Kennwerten.
- Gegeben ist die Menge der Fahrgäste mit ihren Parametern.

Das abgegrenzte, mathematische Modell des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes wird unter Nutzung der Graphentheorie angegeben. Die im untersuchten, realen System auffindbaren Objekte sind:

- Das Straßennetz des öffentlichen Verkehrs mit seinen charakteristischen Punkten und Verbindungssystemen.
- Die Haltestellen der Fahrzeuge und ihre Kennwerte, bezogen auf das Straßennetz des öffentlichen Verkehrs.

4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes

- Die Fahrzeugflotte und ihre Kennwerte.
- Die Fahrzeugdepots und ihre Kennwerte, bezogen auf das Straßennetz des öffentlichen Verkehrs.
- Die Menge der Fahrgäste und ihre Kennwerte, bezogen auf die Haltestellen der Fahrzeuge.

4.1 Angabe des Straßennetzes des öffentlichen Personenverkehrs

Eine mögliche Ausprägung des Straßennetzes eines öffentlichen Personenverkehrs ist in der Abbildung 4-1 dargestellt.

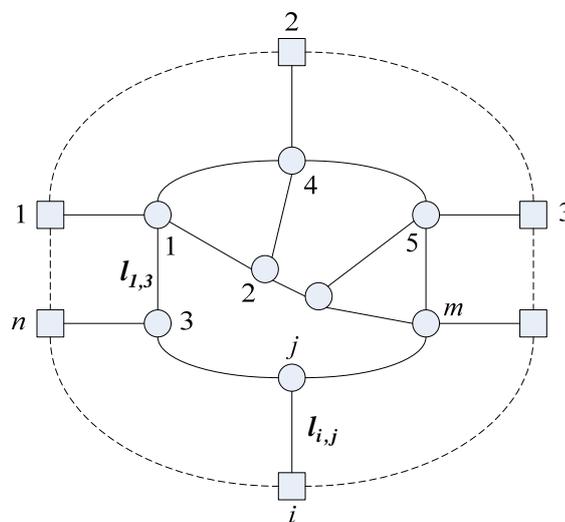


Abbildung 4-1: Referenzmodell eines Straßennetzes für den öffentlichen Personenverkehrs

Anhand der Abbildung 4-1 kann Folgendes festgestellt werden:

- Das Netzwerk ist mit einer Strichlinie abgegrenzt.
- Das Netzwerk hat Ein- und Austrittspunkte, die mit \square gekennzeichnet sind (n Stück).
- Das Netzwerk hat Knoten, die mit \circ gekennzeichnet sind (m Stück).
- Die Entfernungen zwischen den Punkten werden mit l_{ij} gekennzeichnet.

4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes

Die Abbildung 4-3 zeigt die Matrix, in der die möglichen Weglängen des Straßennetzes angegeben werden. Der Wert der Variable $L(i,j)$ wird folgendermaßen bestimmt:

- Wenn $K(i,j) = 1$, dann ist der Wert von $L(i,j)$ gleich der Länge zwischen i und j ;
- wenn $K(i,j) = 0$, dann ist der Wert von $L(i,j)$ gleich ∞ , d.h. dass zwischen i und j keine direkte Verbindung existiert.

Die Bestimmung der Entfernung zwischen zwei beliebigen Punkten in der Wegematrix ist durch die gemeinsame Verwendung der Matrizen K und L möglich. Mögliche Wege aus einem gegebenen Punkt p zu einem Punkt q können mit Hilfe der Relationsmatrix gefunden werden (vgl. *label technique*). Das Ergebnis sind eine oder mehrere Reihe(n) von Punkten, die aus dem Punkt p zu dem Punkt q führen.

z.B.:

$$p \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow i \rightarrow \dots \rightarrow z \rightarrow q.$$

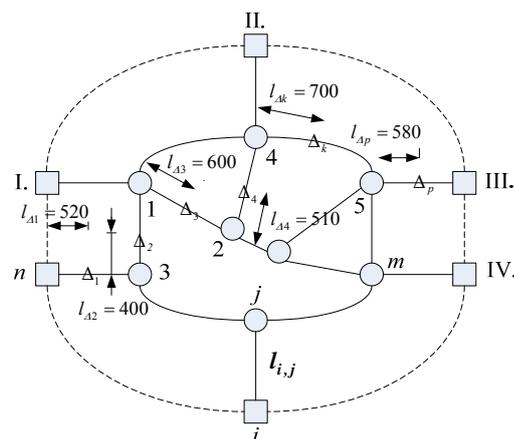
$$L_{pq} = L_{p3} + L_{31} + L_{1i} + \dots + L_{zg}$$

Formel 4-1

Wenn mehrere solche Punktreihen existieren, so kann es mehrere, unterschiedliche, mögliche Weglängen in der Relation p - q geben.

4.2 Angabe des Verkehrsnetzes bezogen auf das Straßennetz

Durch die Anwendung von Abbildung 4-1 wird das Verkehrsnetz auf Abbildung 4-4 projiziert.



Legende:

- äußerer anschließender Knoten an das abgegrenzte Verkehrsnetz
- innerer Knoten des abgegrenzten Verkehrsnetzes
- △ Haltestellen der Linie
- Abgrenzung des Verkehrsnetzes

Abbildung 4-4: Gestaltung des Verkehrsnetzes

4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes

Das untersuchte Verkehrsnetz der Abbildung 4-4 hat $i = 1, 2, \dots, n$ äußere Anschlusspunkte, $j = 1, 2, \dots, m$ innere Knoten und im Fall einer untersuchter Fahrt $k = 1, 2, \dots, p$ Haltestellen. In Bezug auf die Abwicklung einer Fahrt wird die Matrix J benutzt. Der Aufbau der Matrix J ist in der Abbildung 4-5 dargestellt.

$$J = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & & 2 & & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ \vdots \\ k \\ \vdots \\ \vdots \\ p \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccc} & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ J(k,1); & J(k,2); & J(k,3) \\ & & \\ & & \\ & & \end{array} \right] \end{matrix}$$

Legende:

- k Index der Haltestellen der untersuchten Fahrt
- $J(k,1)$ Anfangsknoten der Verkehrswegstrecke von der Haltestelle k
- $J(k,2)$ Endknoten der Verkehrswegstrecke von der Haltestelle k
- $J(k,3)$ Entfernung der Haltestelle k vom Anfangsknoten der Verkehrswegstrecke der Haltestelle k

Abbildung 4-5: Fahrtmatrix (Matrix J)

Als Beispiel für eine gegebene Fahrt kann die Matrix J folgendermaßen aussehen (Vgl. Abbildung 4-6)

$$J = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 3 & 520 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccc} n & & \\ 3 & 1 & 400 \\ 1 & 2 & 600 \\ 2 & 4 & 510 \\ 4 & 5 & 700 \\ 5 & \text{III.} & 580 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Abbildung 4-6: Beispiel der mathematischen Bestimmung einer Fahrt

Eine Verkehrslinie der Matrix sieht wie folgt aus:

$\Delta_1 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow \Delta_p$; das heißt, dass die Fahrt aus dem Ausgangspunkt über die Knoten 3, dann 1, dann 2, dann 4 und 5 zu der Endhaltestelle III führt.

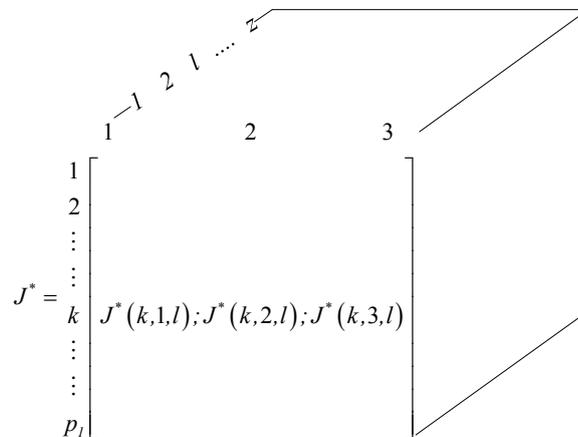
Die Fahrtlänge ist einfach zu bestimmen:

$$L = l_{n,3} - l_{A1} + l_{3,1} + l_{1,2} + l_{2,4} + l_{4,5} + l_{Ap} \quad \text{Formel 4-2}$$

Die Anzahl der von der Fahrt berührten Knoten ist fünf. Unter Verwendung von Abbildung 4-5 kann auch der Fall behandelt werden, wenn sich zwischen zwei Straßenknoten mehrere Haltestellen befinden.

Die Abbildung 4-5 enthielt eine Matrix für den Fall einer einzigen Fahrt. Im Verkehrsnetz gibt es dagegen auf einer Verkehrslinie in der Regel mehrere Fahrten. Zur Behandlung dieses Problems wird die Matrix J zur Matrix J^* modifiziert.

(Abbildung 4-7)



Legende:

- $J^*(k,1,l)$ Anfangsknoten der Verkehrswegstrecke von der Haltestelle k der Fahrt l
- $J^*(k,2,l)$ Endknoten der Verkehrswegstrecke von der Haltestelle k der Fahrt l
- $J^*(k,3,l)$ Entfernung der Haltestelle k vom Anfangsknoten der Verkehrswegstrecke der Haltestelle k der Fahrt l

Abbildung 4-7: Modifizierte Fahrtmatrix zur Beschreibung aller Fahrten

4.3 Fahrzeugflotte und ihre Kennwerte

Bei der Durchführung der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit spielen neben der mathematischen Beschreibung des Verkehrsnetzes die Kennwerte der Fahrzeugflotte eine wichtige Rolle. Diese Kennwerte können ebenfalls in einer geeigneten Matrix zusammengefasst werden (Abbildung 4-8).

$$B(i, j) = \begin{bmatrix} & 1 & 2 & \dots & j & \dots & \dots & b \\ 1 & & & & & & & \\ 2 & & & & & & & \\ \vdots & & & & & & & \\ i & & & & B(i, j) & & & \\ \vdots & & & & & & & \\ a & & & & & & & \end{bmatrix}$$

Legende:

- i laufender Index der angewandten Fahrzeugtypen
- a maximale Anzahl der Fahrzeugtypen
- j laufender Index der Fahrzeugparameter
- b maximale Anzahl der Fahrzeugparameter

Abbildung 4-8: Matrix der Fahrzeugkennwerte

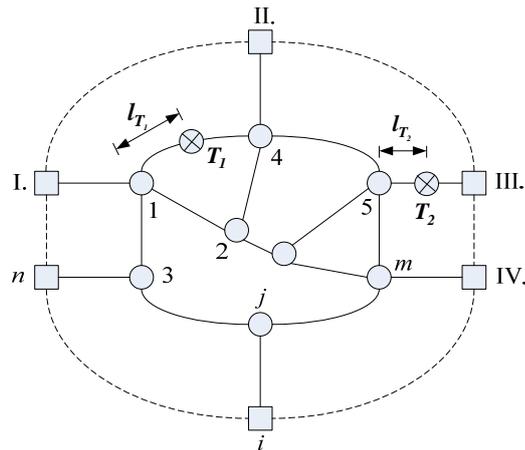
Die für die Fahrzeugtypen wichtigsten Parameter sind:

- Anzahl der zugelassenen Fahrgäste
- Spezifische Betriebskosten
- Spezifischer Kraftstoffverbrauch
- Spezifische Instandhaltungs- und Reparaturkosten
- Bestimmende Maße des Fahrzeuges, wie Länge, Breite und Höhe
- Anzahl der Türen für das Ein- und Aussteigen

Werden Gesichtspunkte des Umweltschutzes, der Ergonomie oder des Fahrkomforts in die Optimierung mit eingezogen, sollen natürlich weitere Parameter wie CO₂-Ausstoß, Umweltklasse, Sitzabstand, usw. berücksichtigt werden.

4.4 Fahrzeugdepots und ihre Kennwerte bezogen auf das Straßenverkehrsnetz

Die Methode für die Angabe der Fahrzeugdepots ist identisch mit der für die Bestimmung der Haltestellen im Verkehrsnetz. Dies wird in der Abbildung 4-9 näher erklärt:



Legende:

- äußerer anschließender Knoten an das abgegrenzte Verkehrsnetz
- innerer Knoten des abgegrenzten Verkehrsnetzes
- ⊗ Fahrzeugdepot
- Abgrenzung des Verkehrsnetzes
- l_{T_i} Entfernung des Fahrzeugdepots vom Anfang der Verkehrsstrecke

Abbildung 4-9: Angabe der Fahrzeugdepots

Für die Angabe der Depots wird die Matrix T benutzt. Der Aufbau der Matrix T wird in Abbildung 4-10 dargestellt.

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ \vdots \\ t \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccc} & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ T(i,1); & T(i,2); & T(i,3) \\ & & \\ & & \end{array} \right] \end{matrix}$$

Legende:

- i laufender Index der Fahrzeugdepots
- t maximale Anzahl der untersuchten Fahrzeugdepots
- $T(i,1)$ Anfangsknoten auf der Wegstrecke des Fahrzeugdepots i
- $T(i,2)$ Endknoten auf der Wegstrecke des Fahrzeugdepots i
- $T(i,3)$ Entfernung des Fahrzeugdepots i vom Anfangsknoten auf der Wegstrecke

Abbildung 4-10: Angabe der Fahrzeugdepots mit Matrix T

Außer der Positionierung der Fahrzeugdepots muss auch die Verteilung der Fahrzeugflotte unter den Fahrzeugdepots behandelt werden. Dazu dient die Matrix M .

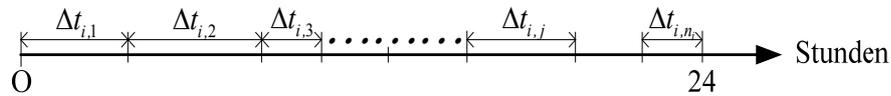


Abbildung 4-12: Einteilung eines Tages an der Haltestelle i in Zeitintervalle $\Delta t_{i,j}$

Die gewählten Zeitintervalle werden so festgelegt, dass in einem Zeitintervall die Dichtefunktion für die Zahl von einsteigenden Fahrgästen konstant ist (Vgl. Abbildung 4-13). In der Fachliteratur findet man verschiedene Verteilungsfunktionen. Bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird eine Verteilungsfunktion der Gleichverteilung verwendet. In diesem Fall kann die Anzahl von einsteigenden Fahrgästen x einen beliebigen Wert im Intervall von A bis B mit gleicher Wahrscheinlichkeit annehmen. Die Anzahl an Fahrgästen ist ganzzahlig, was in der Darstellung aufgrund der fehlenden Skalierung vernachlässigt wird.

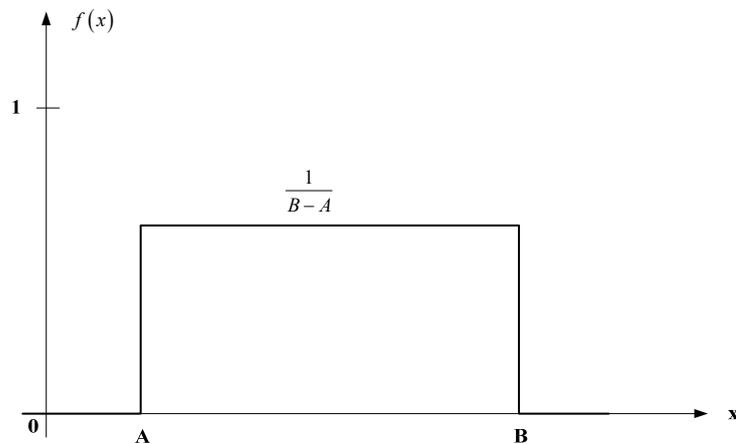


Abbildung 4-13: Dichtefunktion der gleichmäßigen Verteilung

Die Dichtefunktion $f(x)$ lässt sich folgenderweise interpretieren:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B-A} & ; \text{ wenn } A \leq x \leq B \\ 0 & ; \text{ für } x < A \text{ oder } x > B \end{cases} \quad \text{Formel 4-3}$$

Die minimal mögliche Fahrgastzahl in Abbildung 4-13 an der i -ten Haltestelle ist A_i , die maximal mögliche Fahrgastzahl ist B_i . Für die Bestimmung der Fahrgastzahl wird die

4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes

Verteilungsfunktion verwendet. Zu diesem Zweck wird anhand der Dichtefunktion der Abbildung 4-13 die dazugehörige Verteilungsfunktion bestimmt. (Vgl. Abbildung 4-14)

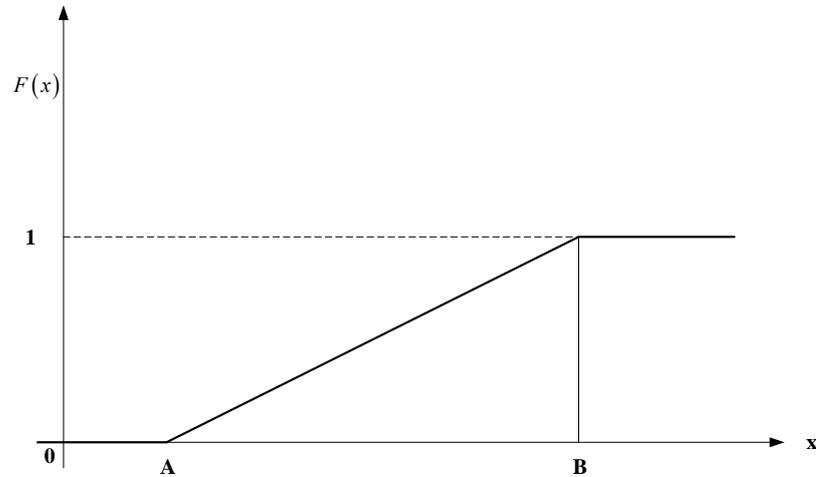


Abbildung 4-14: Verteilungsfunktion der gleichmäßigen Verteilung

Die Methode für die Bestimmung der Fahrgastzahl an der i -ten Haltestelle wird in Abbildung 4-15 gezeigt.

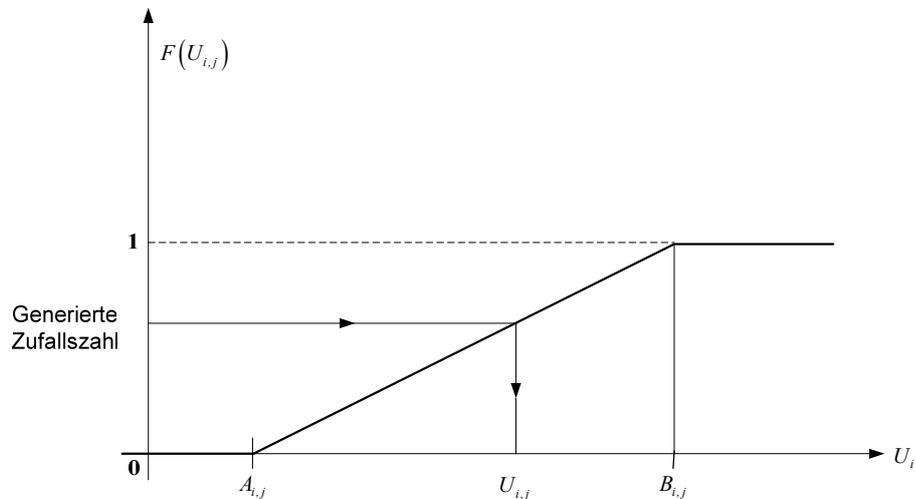


Abbildung 4-15: Methode zur Bestimmung der Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall für eine gegebene Fahrt

Anhand der Abbildung 4-15 können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die augenblickliche Fahrgastzahl $U_{i,j}$ an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall ändert sich zufällig.

4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes

- Die aktuelle Verteilungsfunktion hängt von den Parametern $A_{i,j}$ und $B_{i,j}$ ab. Die Parameter $A_{i,j}$ und $B_{i,j}$ sind Funktionen der Haltestelle i und des Zeitintervalls j .
- Die Bestimmung der Anzahl der, an der Haltestelle wartenden, Fahrgäste erfolgt durch eine generierte Zufallszahl.

Unter Beachtung dieser Methode müssen durch zielgerechte Zählungen im ÖPV die Verteilungsfunktionen für die wahrscheinliche Anzahl der wartenden Fahrgäste

- pro Fahrt l ,
 - pro Fahrt pro Haltestelle i ,
 - pro Fahrt pro Haltestelle pro Zeitintervall j
- aufgenommen werden.

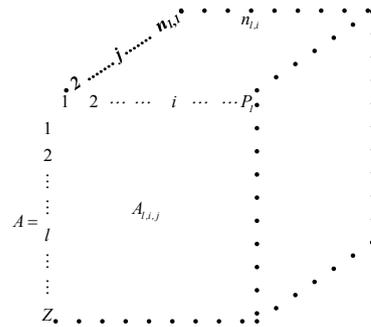
Vorausgesetzt, dass:

- die maximale Anzahl der untersuchten Fahrzeuge gleich z ist, wobei der laufende Index der Fahrt l ist,
- die maximale Anzahl der Haltestellen für die Fahrt l gleich P_l ist, wobei der laufende Index der Haltestelle i ist,
- die Anzahl der Zeitintervalle pro Fahrt und Haltestelle gleich $n_{l,i}$ sind.

Dann gilt Folgendes:

- Für eine Haltestelle entstehen $n_{l,i}$ Verteilungsfunktionen.
- Für eine Fahrt entstehen $\sum_{i=1}^{P_l} n_{l,i}$ Verteilungsfunktionen.
- Für die gesamten Fahrten entstehen $\sum_{l=1}^Z \sum_{i=1}^{P_l} n_{l,i}$ Verteilungsfunktionen.

Die Verteilungsfunktionen können mit Angabe der Parameter A und B (siehe Abbildung 4-14) als Funktion der Fahrt, der Haltestelle und des Zeitintervalls angegeben werden. Diese Zusammenhänge für Parameter A und B sind in den Abbildungen 4-16 und 4-17 dargestellt.



Legende:

- l laufender Index der Fahrt
- Z maximale Anzahl der untersuchten Fahrzeuge
- i laufender Index der Haltestellen
- P_l maximale Anzahl der Haltestellen für die Fahrt l
- j laufender Index der Zeitintervalle
- $n_{l,i}$ maximale Anzahl der Zeitintervalle für die Fahrt l in der Haltestelle k
- $A_{l,i,j}$ Wert des Parameters A der Verteilungsfunktion im Fall der j -ten Fahrt an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall.

Abbildung 4-16: Zusammenfassung der Parameter A der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der wartenden Fahrgäste an den Haltestellen

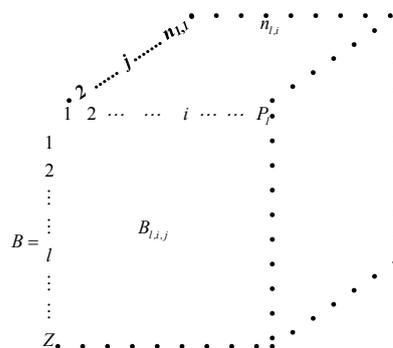


Abbildung 4-17: Zusammenfassung der Parameter B der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der wartenden Fahrgäste an den Haltestellen

Die Bezeichnungen der Abbildung 4-17 sind identisch mit denen in Abbildung 4-16 bis auf einen Unterschied, dass $B_{l,i,j}$ der Wert von Parameter B der Verteilungsfunktion im Fall der j -ten Fahrt an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall ist.

Mit der vorgestellten Methode lässt sich der stochastische Prozess der Veränderung der Anzahl der wartenden Fahrgäste in Abhängigkeit von den Fahrten, Haltestellen und Zeitintervallen im Fall einer gleichmäßigen Verteilung mathematisch behandeln. Das

heißt, dass man durch die Verwendung der notwendigen Verteilungsfunktionen die Anzahl der wartenden und einsteigenden Fahrgäste für jede Fahrt, für jede Haltestelle, in einem beliebigen Zeitintervall des Tages unter Beachtung von zufälligen Einflüssen bestimmen kann.

4.5.2 Aussteigende Fahrgäste

Die Veränderung der Zahl der Fahrgäste, die aus einer gegebenen Fahrt an einer gegebenen Haltestelle in einem gegebenen Zeitintervall aussteigen, weist ebenfalls stochastischen Charakter auf. Basierend auf den gesammelten Verkehrsdaten können mit der im Kapitel 4.5.1 beschriebenen Methode die notwendigen Verteilungsfunktionen und ihre Parameter angegeben werden.

Die Bestimmung der aussteigenden Fahrgastzahl für eine gegebene Fahrt an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall wird in der Abbildung 4-18 gezeigt.

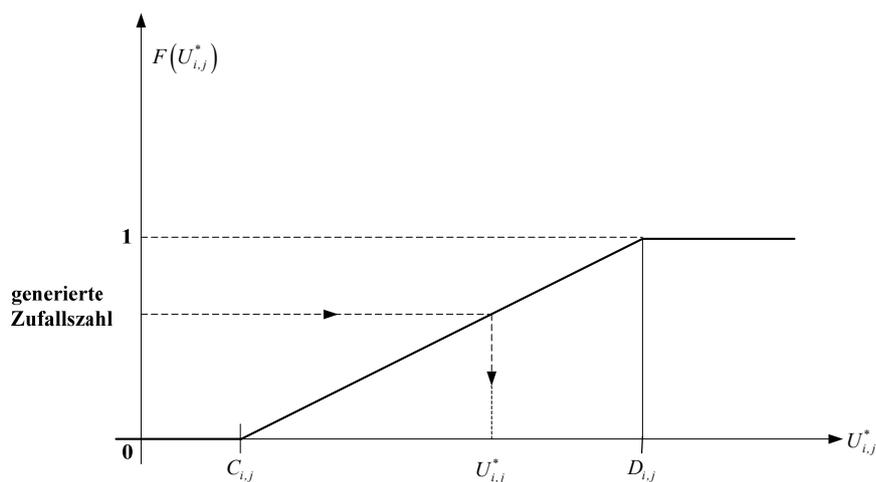


Abbildung 4-18: Methode für die Bestimmung der Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall für eine gegebene Fahrt

Anhand der Abbildung 4-18 kann Folgendes festgestellt werden:

- Die augenblickliche Fahrgastzahl $U_{i,j}^*$ an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall ändert sich zufällig.
- Die aktuelle Verteilungsfunktion hängt von den Parametern $C_{i,j}$ und $D_{i,j}$ ab. Die Parameter $C_{i,j}$ und $D_{i,j}$ sind Funktionen der Haltestelle i und des Zeitintervalls j .

4 Definition eines allgemeinen, mathematischen Modells des öffentlichen Straßenverkehrsnetzes

- Die Bestimmung der Anzahl der an der Haltestelle aussteigenden Fahrgäste erfolgt durch eine generierte Zufallszahl.

Unter Beachtung dieser Methode müssen durch zielgerechte Zählungen im ÖPV die Verteilungsfunktionen für die wahrscheinliche Zahl der aussteigenden Fahrgäste

- pro Fahrt l ,
 - pro Fahrt pro Haltestelle i ,
 - pro Fahrt pro Haltestelle pro Zeitintervall j
- aufgenommen werden.

Die Verteilungsfunktionen für die Bestimmung der Anzahl der aussteigenden Fahrgäste können mit Angabe der Parameter C und D als Funktion der Fahrten, der Haltestellen und des Zeitintervalls beschrieben werden.

Diese Parameter C und D werden in den Abbildungen 4-19 und 4-20 gezeigt.

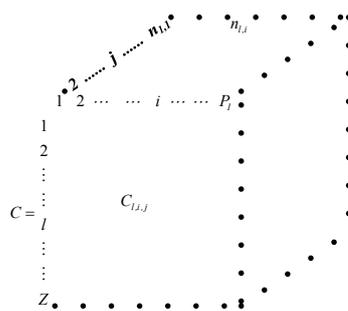


Abbildung 4-19: Zusammenfassung der Parameter C der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an den Haltestellen

Die Bezeichnungen der Abbildung 4-19 sind identisch mit denen in Abbildung 4-16 mit dem Unterschied, dass $C_{l,k,j}$ der Wert von Parameter C der Verteilungsfunktion im Fall der j -ten Fahrt in der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall ist.

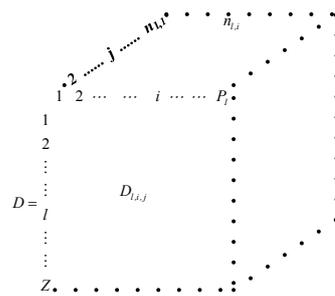


Abbildung 4-20: Zusammenfassung der Parameter D der Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an den Haltestellen

Die Bezeichnungen der Abbildung 4-20 sind identisch mit denen der Abbildung 4-16 mit dem Unterschied, dass $D_{l,i,j}$ der Wert von Parameter D der Verteilungsfunktion im Fall der j -ten Fahrt an der i -ten Haltestelle im j -ten Zeitintervall geeignet.

Die bisher vorgestellten Verfahren sind geeignet für die Beschreibung des stochastischen Prozesses in Zusammenhang mit der Veränderung der Menge der Fahrgäste im ÖPV in Abhängigkeit von den gegebenen Fahrten, Haltestellen und Zeitintervallen.

Realisierungen dieses stochastischen Prozesses sind:

- $U_{l,i,j}$ die zufällige, erwartete Anzahl der, auf eine bestimmte Fahrt l wartenden, Fahrgäste an der Haltestelle i , in einem gegebenen Zeitintervall j
- $U^*_{l,i,j}$ die zufällige, erwartete Anzahl der, von einer bestimmten Fahrt l aussteigenden Fahrgäste an der Haltestelle i , in einem gegebenen Zeitintervall j .

Diese Ergebnisse wurden in den Matrizen U und U^* zusammengefasst (vgl. dazu Abbildungen 4-21 und 4-22):

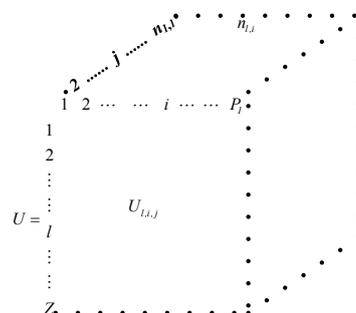


Abbildung 4-21: Matrix U der erwarteten Anzahl der wartenden Fahrgäste pro Fahrt, pro Haltestelle und pro Zeitintervall

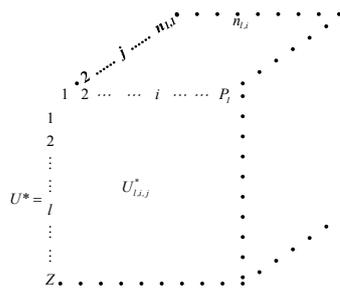


Abbildung 4-22: Matrix U^* der erwarteten Anzahl der aussteigenden Fahrgäste pro Fahrt, pro Haltestelle und pro Zeitintervall

Die Bezeichnungen der Abbildungen 4-21 und 4-22 sind identisch mit denen in Abbildung 4-16.

5 Indikatoren und Faktoren des mathematischen Modells

Mit der Aufstellung und Anwendung des mathematischen Modells wird die Untersuchung eines stochastischen Verkehrsprozesses im ÖPV-Netzwerk mit Hilfe von Simulationsmethoden möglich.

Die Zielstellungen für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit sind:

- ein (vielleicht der wichtigste) Indikator der Untersuchungen ist die Zeit,
- der zweite Indikator ist die Wirtschaftlichkeit des Betriebes,
- der dritte Indikator ist der Zufriedenheitsgrad der Fahrgäste,
- der vierte Indikator ist der Optimierungsgrad des Verkehrs.

5.1 Zeitindikatoren

Auf dem Gebiet der logistischen Dienstleistungen haben Zeitindikatoren eine große Bedeutung. Im Rahmen des mathematischen, logistischen Modells des ÖPV-Netzes soll die Untersuchung folgender Zeitindikatoren vorgenommen werden:

- nominelle und tatsächliche Fahrtzeiten,
- Aufgliederung der tatsächlichen Fahrtzeit auf Beförderungszeiten und Wartezeiten,
- nominelle und tatsächliche Folgezeiten der Fahrzeuge im ÖPV,
- nominelle und tatsächliche Reisezeiten zwischen zwei Haltestellen.

5.1.1 Nominelle und tatsächliche Fahrtzeiten

Die Weglängen des Straßennetzes sind aus der zweidimensionalen Matrix L (Abbildung 4-3) bekannt.

Zur Bestimmung der nominellen Fahrtzeit ist die Route der l -ten Fahrt aus der dreidimensionalen Matrix J^* bekannt (Abbildung 4-7).

Die technischen Parameter des i -ten Fahrzeuges auf der Fahrtroute sind aus der zweidimensionalen Matrix B bekannt (Abbildung 4-8).

Mit Hilfe der Matrizen L und J^* wird die Fahrtlänge folgendermaßen bestimmt:

$$S_l = \sum_{k=1}^{P_l-1} l_k \quad \text{Formel 5-1}$$

Wobei: l der laufende Index der Fahrt

- k der laufende Index der Haltestelle
- P_l die maximale Anzahl der Haltestellen der l -ten Fahrt
- l_k die Entfernung zwischen der k -ten und $(k+1)$ -ten Haltestelle der l -ten Fahrt

ist.

Dabei nimmt l_k folgende Werte auf:

- Die k -te und $(k+1)$ -te Haltestelle befinden sich zwischen zwei benachbarten Straßenknoten, d.h.:

$$J^*(k,1,l) \equiv J^*(k+1,1,l) \quad \text{Formel 5-2}$$

und

$$J^*(k,2,l) \equiv J^*(k+1,2,l) \quad \text{Formel 5-3}$$

dann

$$l_k \equiv J^*(k+1,3,l) - J^*(k,3,l) \quad \text{Formel 5-4}$$

Dies wird in der Abbildung 5-1 dargestellt.

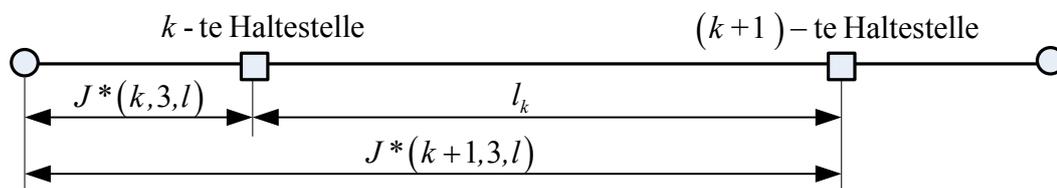


Abbildung 5-1: Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden

- Die k -te und $(k+1)$ -te Haltestelle befinden sich nicht zwischen den benachbarten zwei Straßenknoten, d.h.:

$$J^*(k,1,l) \neq J^*(k+1,1,l) \quad \text{Formel 5-5}$$

und

$$J^*(k,2,l) \neq J^*(k+1,2,l) \quad \text{Formel 5-6}$$

aber

$$J^*(k,2,l) \equiv J^*(k+1,1,l) \quad \text{Formel 5-7}$$

dann

$$l_k = L[J^*(k,1,l), J^*(k,2,l)] - J^*(k,3,l) + J^*(k+1,3,l) \quad \text{Formel 5-8}$$

Dies wird in Abbildung 5-2 dargestellt.

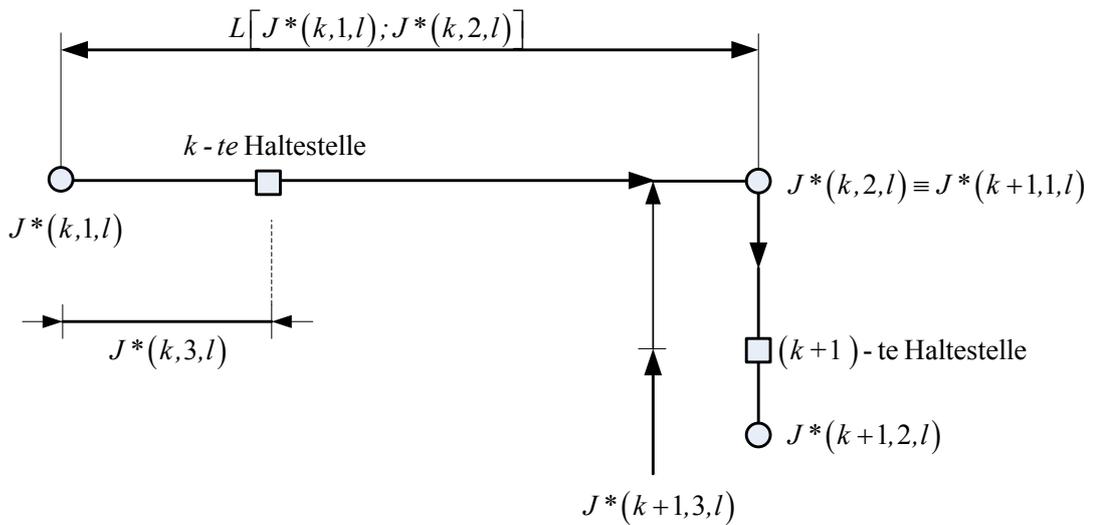


Abbildung 5-2: Bestimmung der Entfernung l_k in dem Fall, dass sich die Haltestellen nicht zwischen zwei benachbarten Straßenknoten befinden

Aus der zweidimensionalen Matrix B kann die Beschleunigung (a_i), die nominelle Geschwindigkeit (v_{ni}) und die Verzögerung (a_{li}) des i -ten Fahrzeuges entnommen werden. Für eine Entfernung l_k ist das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm in Abbildung 5-3. dargestellt.

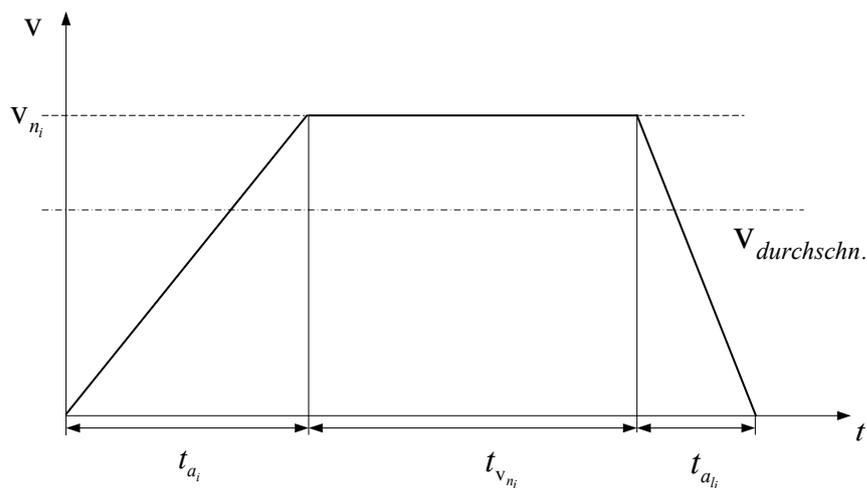


Abbildung 5-3: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm für den i -ten Fahrzeugtyp auf der l_k -ten Wegstrecke

Bei den Berechnungen wird eine durchschnittliche Geschwindigkeit $v_{\text{durchschn.}}$ unter Berücksichtigung der tatsächlichen Beschleunigung, der Endgeschwindigkeit und der Verzögerung des gegebenen Fahrzeuges bestimmt.

Entsprechend Abbildung 5-3 gilt:

$$\int_{(t)} v(t) dt = l_k \quad \text{Formel 5-9}$$

und

$$v_{\text{durchschn.},i,k} = \frac{l_k}{\frac{v_{ni}}{a_i} + t_{v_{ni}} + \frac{v_{ni}}{a_{li}}} \quad \text{Formel 5-10}$$

Die für das Befahren der Wegstrecke l_k notwendige Zeit für den i -ten Fahrzeugtyp ist:

$$t_{k,i}^n = \frac{l_k}{v_{\text{atl-}i,k}} \quad \text{Formel 5-11}$$

Die für das Befahren der l -ten Fahrtränge notwendige Zeit für den i -ten Fahrzeugtyp ist:

$$t_{l,i}^n = \sum_{k=1}^{P_l-1} t_{k,i}^n \quad \text{Formel 5-12}$$

Wird eine durchschnittliche Wartezeit für die Abwicklung des Ein- und Aussteigens berücksichtigt, so ist:

$$t_{v_{l,i}}^n = (P_l - 2) \cdot \Delta t_{v_{l,i}} \quad \text{Formel 5-13}$$

wobei:

$\Delta t_{v_{l,i}}$ die durchschnittliche Wartezeit für die Abwicklung des Ein- und Aussteigens für die l -te Fahrt bei dem i -ten Fahrzeugtyp

P_l die Anzahl der Haltestellen der l -ten Fahrt

$t_{v_{l,i}}^n$ die Summe der nominellen Wartezeiten für die l -te Fahrt bei dem i -ten Fahrzeugtyp

ist.

Die nominelle Fahrtzeit der l -ten Fahrt beim i -ten Fahrzeugtyp wird folgendermaßen bestimmt:

$$t_{l,i}^n = t_{l,i}^n + t_{v_{l,i}}^n \quad \text{Formel 5-14}$$

Bei der Bestimmung der tatsächlichen Fahrtzeit werden zwei Einflussgrößen berücksichtigt:

- bei den Wartezeiten des Fahrzeuges an der Haltestelle: die Anzahl der ein- und aussteigenden Fahrgäste,
- bei der Beförderungszeit: die Wartezeiten in den Straßenknoten der Fahrtroute.

Mit Hilfe der beschriebenen, mathematischen Methoden wurde ein Simulationsverfahren erarbeitet, das für die Untersuchung der Zeitindikatoren geeignet ist.

Zur Berechnung der Zeitindikatoren wurde ein in der Simulation verwendeter Algorithmus aufgestellt, der ausführlich in der Anlage 5-1 ausgeführt ist.

5.1.2 Aufbau einer Datenbank zur Speicherung der Ergebnisse der Untersuchung von Zeitindikatoren im Simulationsmodell

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen von Zeitindikatoren können folgendermaßen eingeordnet werden:

- geprüfte Fahrten,
- geprüfte Fahrzeuge,
- geprüfte Zeitintervalle und
- geprüfte Haltestellen.

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen sind:

- Ankunftszeit an der Haltestelle
- Anzahl der auf die Fahrt wartenden Fahrgäste
- Wartezeiten der einzelnen, wartenden Fahrgäste
- Anzahl der Fahrgäste auf der ankommenden Fahrt
- Auslastungsgrad bezogen auf die Fahrkapazität
- Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an der Haltestelle
- Beförderungszeit der Fahrt bis zur Haltestelle
- Wartezeiten der Fahrt bis zur Haltestelle
- Aussteigezeit der Fahrgäste an der Haltestelle
- Einsteigezeit der Fahrgäste an der Haltestelle

- Tatsächliche Folgezeit der Fahrten an der Haltestelle
- Abweichung der tatsächlichen Folgezeit von der nominellen Folgezeit
- Abfahrtszeit aus der Haltestelle

Der Aufbau der Datenbank ist in Abbildung 5-4 zu sehen:

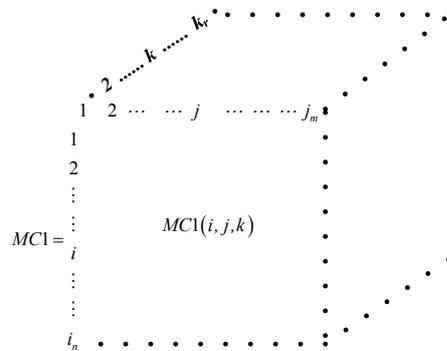


Abbildung 5-4: Simulationsergebnisse in der Datenbank

Die Abbildung 5-4 dient zur Zusammenfassung und Behandlung der Simulationsergebnisse. Die dreidimensionale Matrix $MC1$ steht in Zusammenhang mit der C -ten Fahrt,

wobei

- i der Laufindex des Zeitintervalls,
- j der Laufindex der Haltestellen,
- k der Laufindex der Fahrzeuge

ist.

Die Anzahl der Matrizen vom Typ MC soll mit der Anzahl der Simulationsergebnisse übereinstimmen, d.h. es sind 13 Matrizen.

Es ergeben sich somit die folgenden Ergebnismatrizen:

- $MC1$ - Ankunftszeitpunkt an der Haltestelle,
- $MC2$ - Anzahl der wartenden Fahrgäste,
- $MC3$ - gesondert definiert (siehe unten)
- $MC4$ - Anzahl der Fahrgäste auf der Fahrt
- $MC5$ - Auslastungsgrad bezüglich der Fahrkapazität
- $MC6$ - Anzahl der aussteigenden Fahrgäste
- $MC7$ - Beförderungszeit der Fahrt bis zur Haltestelle
- $MC8$ - Wartezeiten der Fahrt bis zur Haltestelle
- $MC9$ - Aussteigezeit der Fahrgäste an der Haltestelle

- $MC10$ - Einsteigezeit der Fahrgäste an der Haltestelle
- $MC11$ - Tatsächliche Folgezeit der Fahrten an der Haltestelle
- $MC12$ - Abweichung der tatsächlichen Folgezeit von der nominellen Folgezeit
- $MC13$ - Abfahrtszeit von der Haltestelle

Die Matrix $MC3$ fasst die Wartezeiten der wartenden Fahrgäste pro Zeitintervall, pro Haltestelle, pro Fahrzeugtyp und pro Fahrt zusammen. Die Matrix $MC3$ ist in der Praxis nicht nur *eine* dreidimensionale Matrix, sondern wird mit mehreren – entsprechend der Anzahl der wartenden Fahrgäste – dreidimensionalen Matrizen beschrieben.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse mit den vorgestellten 13 Matrizen vom Typ MC ist selbstverständlich nur für eine einzige Fahrt möglich. Untersuchen wir p Fahrten, so werden $13 \cdot p$ Matrizen notwendig. Das vorgestellte Datenmengensystem zeigt die Größe der Output-Daten der Simulation hinsichtlich der Zeitindikatoren.

5.2 Faktoren der Wirtschaftlichkeit

Über die Zeitindikatoren hinaus wird die Wirtschaftlichkeit als ein anderes bestimmendes Qualitätsmerkmal der logistischen Dienstleistung betrachtet. Die Wirtschaftlichkeit der Fahrten kann auf dem Gebiet der Verkehrsnetzwerke auf die einzelnen Fahrtenstrecken bezogen untersucht werden. Für diesen Zweck müssen die spezifischen Kosten festgestellt werden.

5.2.1 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Fahrtstrecken

Zur Untersuchung der Fahrten können spezifische Einnahmen und spezifische Kosten angegeben werden. Die Abbildung 5-5 zeigt die Bildung von Einnahmen und Kosten für die einzelnen Fahrtstrecken:

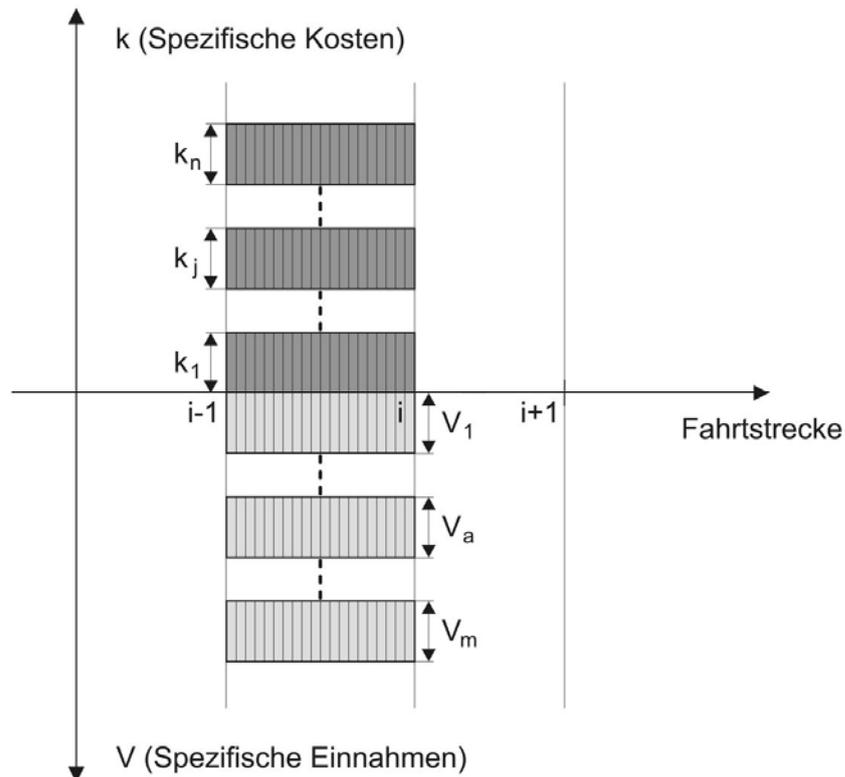


Abbildung 5-5: Bildung der Einnahmen und Kosten bezogen auf eine Fahrtstrecke

Zwischen den Fahrtpunkten $(i-1)$ und i können verschiedene, spezifische Kosten und Einnahmen definiert werden:

- spezifische Einnahmen: $(v_a; a = 1, 2, \dots, m)$.
- spezifische Kosten: $(k_j; j = 1, 2, \dots, n)$;

Anhand dessen kann die wirtschaftliche Bewertung einer Fahrt zwischen den Punkten $(i-1)$ und i der Fahrtstrecke folgendermaßen berechnet werden:

- Einnahmen zwischen den Punkten $(i-1)$ und i :

$$V_i = \sum_{a=1}^{m_i} \int_{(s_i)} v_a(i, s_i) ds_i \quad \text{Formel 5-15}$$

Wobei:

- v_a die j -ten spezifischen Einnahmen auf der i -ten Fahrtstrecke (zwischen den $(i-1)$ -ten und i -ten Punkten)

- S_i die Länge der i -ten Fahrtstrecke
- m_i die maximale Anzahl der spezifischen Einnahmen für die i -ten Fahrtstrecke ist.

- Kosten zwischen den Punkten $(i-1)$. und i :

$$K_i = \sum_{k=1}^{n_i} \int_{(s_i)} k_j(i, s_i) ds_i \quad \text{Formel 5-16}$$

Wobei:

- k_j die j -ten spezifischen Kosten auf der i -ten Fahrtstrecke
- s_i die Länge der i -ten Fahrtstrecke
- n_i die maximale Anzahl der spezifischen Kosten für die i -te Fahrtstrecke ist.

Die spezifischen Kosten können beliebige, in geschlossener Formation angegebene Funktionen sein. Durch die Bestimmung von K_i und V_i kann für die Fahrtstrecke i die für die wirtschaftliche Durchführung charakteristische Kennzahl G_i einfach bestimmt werden:

$$G_i = V_i - K_i \quad \text{Formel 5-17}$$

Wenn $G_i \geq 0$, dann ist die Durchführung wirtschaftlich.

Wenn $G_i < 0$, dann ist die Durchführung unwirtschaftlich.

zwischen dem $(i-1)$ -ten und dem i -ten Punkt der Fahrtstrecke.

Selbstverständlich kann die Wirtschaftlichkeit für die gesamte Fahrt geprüft werden.

Vorausgesetzt, dass die maximale Anzahl der Fahrtstrecken einer Fahrt gleich p ist, wird der Indikator für die Wirtschaftlichkeit folgendermaßen bestimmt:

$$G_p = \sum_{i=1}^p G_i \quad \text{Formel 5-18}$$

Wenn $G_p \geq 0$, dann ist die Durchführung wirtschaftlich.

Wenn $G_p < 0$, dann ist die Durchführung unwirtschaftlich.

Für die Durchführung der Simulation sollen auch hier die bereits beschriebenen Untersuchungsparameter wie:

- Anzahl und Art der Fahrten,
- Mögliche Fahrzeuge,
- Untersuchungsintervalle und
- Fahrtstrecken (zwischen den Haltestellen)

berücksichtigt werden.

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeitsindikatoren wurde ein in der Simulation verwendeter Algorithmus aufgestellt, der ausführlich in der Anlage 5-2 dargestellt ist.

5.2.2 Aufbau einer Datenbank zur Speicherung der Ergebnisse der Untersuchung von Wirtschaftlichkeitsindikatoren im Simulationsmodell

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen von Wirtschaftlichkeitsindikatoren können folgendermaßen eingeordnet werden:

- geprüfte Fahrten,
- geprüfte Fahrzeuge,
- geprüfte Intervalle und
- geprüfte Haltestellen.

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen sind bezogen auf Fahrten, Fahrzeuge, Zeitintervalle und Fahrtstrecken:

- die Größe der Einnahmen bei gegebenen spezifischen Einnahmen,
- die Größe der Kosten bei gegebenen spezifischen Kosten,
- die Kennwerte der Wirtschaftlichkeit bei gegebenen spezifischen Einnahmen und Kosten.

Der Aufbau der Datenbank ist in Abbildung 5-6 zu sehen:

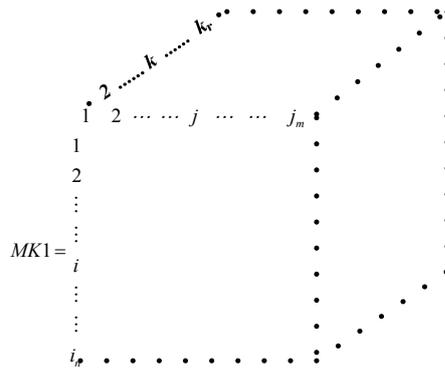


Abbildung 5-6: Simulationsergebnisse der Wirtschaftlichkeitsprüfung in der Datenbank

Die Abbildung 5-6 dient zur Zusammenfassung und Behandlung der Simulationsergebnisse der Wirtschaftlichkeitsprüfung.

Die dreidimensionale Matrix $MK1$ steht in Zusammenhang mit der k -ten Fahrt, wobei

- i der Laufindex des Zeitintervalls,
- j der Laufindex der Haltestellen,
- k der Laufindex der Fahrzeuge

ist.

Die Anzahl der Matrizen vom Typ MK soll mit der Anzahl der Simulationsergebnisse übereinstimmen, d.h. es ergeben sich drei Matrizen entsprechend folgender Liste:

- $MK1$ Höhe der Einnahmen
- $MK2$ Höhe der Kosten
- $MK3$ Kennwerte der Wirtschaftlichkeit

Die Zusammenfassung der Ergebnisse mit den vorgestellten 3 Matrizen vom Typ MK ist selbstverständlich nur für eine einzige Fahrt möglich. Untersuchen wir p Fahrten, so ist das Aufstellen von $3 * p$ Matrizen notwendig.

n	maximale Anzahl der zu untersuchenden Lösungen
$M(i,j)$	Wert der i -ten Zielfunktion bei der j -ten Lösung

ist.

Die Zielfunktionen haben unterschiedliche Dimensionen und können minimierend oder maximierend ausgelegt werden. Für das Herausfinden der optimalen Lösung können diese Probleme durch die Normalisierung der Zielfunktionen aufgehoben werden. Gewöhnlich kann eine normalisierte Zielfunktion mit der Anwendung der Matrix M in folgender Form aufgeschrieben werden:

$$N(i, j) = \frac{M(i, j)}{M_{opt}(i)} \quad \text{Formel 6-1}$$

Wobei

$N(i,j)$	der normalisierte Wert der i -ten Zielfunktion der j -ten Parametervariante
$M(i,j)$	der Wert der i -ten Zielfunktion der j -ten Parametervariante (Lösung)
$M_{opt}(i)$	der beste, empirisch ermittelte Wert bezogen auf die i -ten Zielfunktion

ist.

Im nächsten Schritt soll beachtet werden, dass es minimierende und maximierende Zielfunktionen gibt und ob und wie das Optimum einheitlich durch Minimierung oder Maximierung gefunden werden soll. Das Optimum der Zielfunktionen wird folgendermaßen gebildet:

- Wenn der optimale Wert der i -ten Zielfunktion durch Minimierung gesucht wird:

$$M_{opt}(i) = \underset{j}{\text{Min}} \{M(i, j)\} \quad \text{Formel 6-2}$$

$$(j=1 \dots n)$$

- Wenn der optimale Wert der i -ten Zielfunktion durch Maximierung gesucht wird:

$$M_{opt}(i) = \underset{j}{\text{Max}} \{M(i, j)\} \quad \text{Formel 6-3}$$

$$(j=1 \dots n)$$

Wenn die Aufgabe auf Minimierungen zurückzuführen ist, so wird folgende Formel gebildet:

$$C(i, j) = 1 - \frac{M_{opt}(i)}{M(i, j)} \quad \text{Formel 6-4}$$

(i=1...m) (j=1...n)

im Fall einer minimierenden Zielfunktion, bzw.:

$$C(i, j) = 1 - \frac{M(i, j)}{M_{opt}(i)} \quad \text{Formel 6-5}$$

(i=1...m) (j=1...n)

im Fall einer maximierenden Zielfunktion.

Die Besonderheit der Elemente der Matrix C ist, dass

$$0 \leq C(i, j) \leq 1 \quad \text{Formel 6-6}$$

(i=1...m) (j=1...n)

Mit den normalisierten Zielfunktionen in der Matrix C kann die optimale Lösung einheitlich durch Minimierung gesucht werden.

Wenn die Aufgabe auf Maximierungen zurückzuführen ist, so wird folgende Formel gebildet:

$$D(i, j) = \frac{M_{opt}(i)}{M(i, j)} \quad \text{Formel 6-7}$$

(i=1...m) (j=1...n)

im Fall einer minimierender Zielfunktion bzw.:

$$D(i, j) = \frac{M(i, j)}{M_{opt}(i)} \quad \text{Formel 6-8}$$

(i=1...m) (j=1...n)

im Fall einer maximierender Zielfunktion.

Für alle Elemente der Matrix D gilt, dass:

$$0 \leq D(i, j) \leq 1$$

$$(i=1 \dots m) \quad (j=1 \dots n)$$

Formel 6-9

Mit den normalisierten Zielfunktionen in der Matrix D kann die optimale Lösung einheitlich durch Maximierung gesucht werden. Für das Auffinden der optimalen Parametervariante können mehrere Methoden angewendet werden.

Solche Methoden sind:

- die gewichtete Summe der normalisierten Zielfunktionen soll maximal sein,
- der Wert der minimalen, normalisierten Zielfunktion soll maximal sein,
- der durchschnittliche Auslastungsgrad der normalisierten Zielfunktionen soll maximal sein,
- stufenweise Vorgehensweise einer Optimierung und
- Spieltheorie.

6.2.1 Maximierung der gewichteten Summe der normalisierten Zielfunktionen

Der Wert der gewichteten, normalisierten Zielfunktion der j -ten Lösung ist:

$$\varepsilon(j) = \sum_{i=1}^m D(i, j) \cdot K(i)$$

Formel 6-10

Wobei: $K(i)$ der Gewichtungsfaktor der i -ten Zielfunktion ist, unter der Voraussetzung, dass:

$$0 \leq K(i) \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{i=1}^m K(i) = 1$$

Formel 6-11

ist.

Die optimale Variante wird folgendermaßen bestimmt:

$$\varepsilon_{opt} = \underset{j}{\text{Max}} \{ \varepsilon(j) \}$$

$$(j = 1 \dots n)$$

Formel 6-12

Diese Methode ist empfehlenswert, wenn die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Zielfunktionen zuverlässig bekannt sind.

6.2.2 Maximierung der gewichteten Summe der minimierten, normalisierten Zielfunktionen

Das Minimum der normalisierten Zielfunktion der j -ten Lösung ist:

$$Z(j) = \underset{(i=1 \dots m)}{\text{Min}} \{D(i, j)\} \quad \text{Formel 6-13}$$

Die optimale Variante wird folgenderweise bestimmt:

$$Z_{opt} = \underset{(i=1 \dots n)}{\text{Max}} \{Z(i, j)\} \quad \text{Formel 6-14}$$

6.2.3 Maximierung des Auslastungsgrades der normalisierten Zielfunktionen

Der Auslastungsgrad der normalisierten Zielfunktion der j -ten Lösung ist:

$$\varepsilon(j) = \sum_{i=1}^m D(i, j) \quad \text{Formel 6-15}$$

Die optimale Variante wird folgenderweise bestimmt:

$$\varepsilon_{opt} = \underset{(j=1 \dots n)}{\text{Max}} \{\varepsilon(j)\} \quad \text{Formel 6-16}$$

6.2.4 Stufenweise Optimierung

Die Methode besteht darin, dass die gesamte Lösungsmenge in einer definierten Reihenfolge der Zielfunktionen immer weiter eingengt wird und so am Ende die optimale Lösung gefunden wird.

Erste Stufe:

Der Wert der ersten Zielfunktion soll größer als ein vorgegebener Wert $E1$ sein.

Wenn $M(1, j) < E1$, dann fallen diese Lösungen aus den weiteren Untersuchungen heraus.

Die Lösungsmatrix M wird in eine kleinere Matrix $M1$ modifiziert.

Zweite Stufe:

Der Wert der zweiten Zielfunktion soll größer als ein vorgegebener Wert $E2$ sein. Die Lösungsmatrix $M1$ wird in eine kleinere Matrix $M2$ modifiziert. Entsprechend dieser Methode kommen alle Zielfunktionen an die Reihe und ergeben eine Lösung. Diese Lösung ist ein lokales Optimum, da es in Abhängigkeit von der Reihenfolge der Zielfunktionen entsteht. Je mehr Zielfunktionen verwendet werden, desto mehr lokale Optima entstehen, in Abhängigkeit von der Reihenfolgenvariante der Zielfunktionen. Die Reihenfolge der Zielfunktionen wiederum wird durch ihre Wichtigkeit bestimmt.

6.2.5 Spieltheorie

Wenn die Gewichtungsfaktoren der Zielfunktionen nicht zuverlässig bekannt sind, kann die Anwendung der Spieltheorie zu einem Ergebnis führen. Die Aufgabe kann als ein strategisches, rechteckiges Spiel für zwei Personen mit Nullsumme aufgefasst werden, wobei ein Spieler von den Zielfunktionen, der andere von den Parameteralternativen wählen kann. Die Lösung wird mit der bereits definierten Matrix C gesucht. Wenn das Spiel einen Sattelpunkt aufweist, so gibt es auch eine reine Strategie des Spieles. Ein Sattelpunkt existiert, wenn:

$$\underset{(j=1\dots n)}{\text{Min}} \left\{ \underset{(i=1\dots m)}{\text{Max}} C(i, j) \right\} = \underset{(i=1\dots m)}{\text{Max}} \left\{ \underset{(j=1\dots n)}{\text{Min}} C(i, j) \right\} \tag{Formel 6-17}$$

Aus der Definition von $C(i,j)$ geht hervor, dass in jeder Reihe der Matrix C eine Null zu finden ist. Deshalb gilt:

$$\underset{(j=1\dots n)}{\text{Min}} \{ C(i, j) \} = 0 \tag{Formel 6-18}$$

Einen Sattelpunkt kann es nur geben, wenn:

$$\underset{(i=1\dots m)}{\text{Max}} \{ C(i, j) \} = 0 \tag{Formel 6-19}$$

Das heißt wiederum, dass es einen Sattelpunkt nur dann gibt, wenn eine solche Parametervariante existiert, bei der alle Zielfunktionen einen optimalen Wert haben. Daraus wird abgeleitet, dass es im allgemeinen Fall keinen Sattelpunkt gibt, eine optimale Lösung wird lediglich mit einer gemischten Strategie erreicht. Die optimale Strategie er-

gibt das Optimum der relativen Häufigkeiten der einzelnen Strategien. Für die optimale Strategie gilt, dass

$$X^T C y_0 \leq X_0^T C y_0 \leq X_0^T \cdot C \cdot y \quad \text{Formel 6-20}$$

Wobei:

X^T und y^T die Vektoren der relativen Häufigkeit sind, für die gilt, dass

$$\sum_{j=1}^n X_j = 1 \quad \text{und} \quad X_j \geq 0 \quad \text{Formel 6-21}$$

weiterhin

$$\sum_{j=1}^n y_j = 1 \quad \text{und} \quad y_j \geq 0 \quad \text{Formel 6-22}$$

und

$$\Gamma = X_0^T \cdot C \cdot y_0 \quad \text{Formel 6-23}$$

der Wert des Spieles; $X_0(i)$ die optimale Häufigkeit der i -ten, $y_0(j)$ der j -ten Parametervariante ist. Die Aufgabe ist das Auffinden der Vektoren X_0^T und y_0 , was durch Anwendung der Spieltheorie lösbar ist.

7 Anwendung des mathematischen Modells für eine Simulation im Straßenverkehrsnetz

In diesem Kapitel wird gezeigt, dass das, in den Kapiteln 4 bis 6 beschriebene, mathematische Modell, es durch seine allgemeine, determinierte Parameterstruktur ermöglicht, Netzwerke des öffentlichen Straßenverkehrs unter realitätsnahen Umständen zu untersuchen. Weiterhin sollen mit Hilfe eines geeigneten Simulationsmodells für ein Optimierungsproblem, das in der Praxis eines konkreten Straßenverkehrsunternehmens existiert, Lösungen gesucht werden. Anhand der praktischen Anwendbarkeit der Simulationsergebnisse können Aussagen und Schlussfolgerungen sowohl für das Simulationsmodell als auch für das allgemeine, mathematisch-logistische Modell getroffen werden.

7.1 Beschreibung des Simulationsproblems

Beschreibung des Verkehrsproblems

Gegeben sind zwei Knoten (städtische Busbahnhöfe), die im Regionalverkehr eine bedeutende Rolle spielen. Zwischen diesen beiden Knoten entsteht ein Personenverkehr mit ungleicher, veränderlicher Intensität. Dieser Personenverkehr wird durch die Fahrgäste des Raumes zwischen diesen beiden Knoten generiert und über einen Taktfahrplan im ÖPV bedient. An diese Knoten knüpfen mehrere Ortschaften durch wirtschaftliche Verbindungen (Arbeitsplätze) und über die Inanspruchnahme von öffentlichen Dienstleistungen (Schulwesen, Gesundheitswesen, usw.) an. Die Ortschaften sind meistens kleine Dörfer mit einer Population von weniger als fünfhundert Einwohnern oder höchstens Kleinstädte. Das bedeutet wiederum, dass die Fahrgastzahlen in diesen Ortschaften sehr niedrig sind. Trotzdem muss für diese Staatsbürger die Grundmobilität im Rahmen einer öffentlichen Personenverkehrsdienstleistung sichergestellt werden. Die Aufgabe besteht also darin, für die Bevölkerung eines Gebietes Verkehrslösungen zu finden, die eine vertretbare durchschnittliche Reisezeit als Minimalwert unter Beachtung eines bestimmten Kostenaufwandes des betätigten Verkehrssystems ermöglichen. Für diesen Zweck wird der zwischen den beiden Knoten funktionierende Taktfahrplan beibehalten und die Haltestellen dieser Fahrten als Umsteigepunkte für die Reisenachfrage aus der Agglomeration in die Richtung der regionalen Knoten definiert. Die Aufgabe soll unter Beachtung der Voraussetzungen in der bisherigen Praxis, der zurzeit gültigen Fahrpläne und der tatsächlichen Fahrgastzahlen zwischen den Knoten des ausgewählten Verkehrsnetzwerkes gelöst werden.

Optimierungsziele

Im Hauptfokus der Untersuchungen steht die Taktzeit der Fahrten zwischen den regionalen Knoten, die – unter Beachtung der Umsteigezeiten t_U – einen wesentlichen Einfluss auf die Reisezeiten t_R hat:

$$t_R = t_U + t_F \quad \text{Formel 7-1}$$

Indem die Fahrtzeit t_F aus dem Gesichtspunkt der Untersuchung als eine Gegebenheit betrachtet wird, da diese in erster Linie durch die Entfernungen der Knoten und die erreichbaren Durchschnittsgeschwindigkeiten beeinflusst wird, kann die Aufgabe auf die Minimierung der Summe der Wartezeiten in den Umsteigepunkten zurückgeführt werden (vorausgesetzt, dass die Ein- und Aussteigezeiten in der Reisezeit involviert sind):

$$\text{Min} \left\{ \sum_{j=1}^n \overline{t_{U,j}} \right\} \quad \text{Formel 7-2}$$

Wobei: j der Laufindex der Haltestellen der Fahrt zwischen den regionalen Knoten ist

Abbildung 7-1 zeigt die Variablen und Indikatoren der Simulation zur Optimierung eines Taktfahrplans des ÖPN.

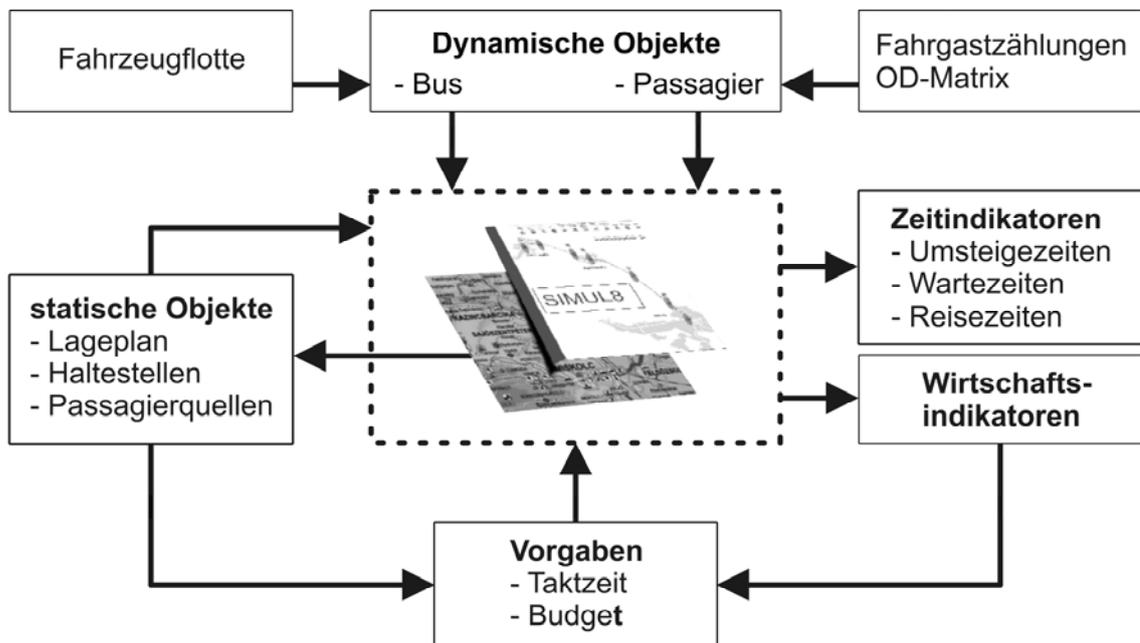


Abbildung 7-1: Optimierung eines Taktfahrplans im ÖPN

Die Abbildung zeigt auch, dass die Veränderung der Taktzeiten nicht nur Einfluss auf die Zeitfaktoren hat, sondern sich auch auf die Größe und Zusammensetzung der Fahrzeugflotte und dadurch auf die Höhe der Betriebskosten auswirkt.

Ziel der Simulationsuntersuchungen

Das Ziel besteht darin, mit Hilfe des Modells die Zeitindikatoren zu untersuchen, die sich aus den Verbindungen der Netzwerkobjekte ableiten lassen. Da diese sehr stark von den stochastischen Parametern der Verbindungen abhängen, sind sie mit traditionellen Methoden nicht untersuchbar. Die zweite Zielsetzung der Untersuchungen besteht in der Analyse der wirtschaftlichen Wirkungen, die mit dem Betrieb des Verkehrsnetzwerkes zusammenhängen. Diese Ziele bedingen einander in starkem Maße, da für ein Verkehrsnetzwerk die Zeitindikatoren eine wesentliche Wirtschaftsrolle spielen.

Für die Ausführung der Optimierungsaufgabe soll das Netzwerkmodell objektorientiert so aufgestellt werden, dass in den Objekten des Modells alle, mit mathematischen Formeln definierte Eigenschaften implementiert werden.

Dazu soll eine Simulationsumgebung ausgewählt werden, die für die Implementierung der Objekte des allgemeinen mathematischen Modells geeignet ist und die notwendigen logistischen Zielfunktionen formulieren lässt.

7.2 Auswahl und Vorstellung der rechnergestützten Simulationsumgebung

7.2.1 Grundlagen der Simulation

Simulationsuntersuchungen sind eine Art von Untersuchung, die für eine realitätsähnliche Modellierung der Prozesse von verschiedenen Systemen geeignet sind. Diese Untersuchungen machen es möglich, mit der Funktion des Systems zusammenhängende Experimente durchzuführen, ohne dass man in reale Prozesse eingreifen muss. So sind Zustandsänderungen numerisch abschätzbar und es wird möglich, Betriebsalternativen zu analysieren. Einige Lebensprozesse besitzen stochastische Eigenschaften, deshalb sollte man diese Prozesse mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung beschreiben.

Die Verwendung von computersimulierten Realitäten macht es möglich, die Hintergründe von Planungs-, Entscheidungs- und Urteilsprozessen, die sich bislang der direkten Beobachtung entzogen, sichtbar zu machen. Auf diese Weise lassen sich die

psychologischen Determinanten solcher Prozesse leichter ausfindig machen als durch die nachträgliche Erforschung solcher Prozesse in der «richtigen» Realität. [Dör89]

Der Ausdruck Simulation kommt aus dem Lateinischen Verb „simulare“ und wird vielfältig benutzt. Laut *Gredler* [Gred92] beinhaltet die Simulation die Erfahrung des Funktionierens in einer “bona fide” Rolle und die Wahrnehmung der Konsequenzen einer Aktion von Jemandem, der in der Durchführung dieser Rolle Entscheidungen trifft.

Für *Shubik* ist das Ziel der Simulation die Erreichung einer rapiden Analyse auf benutzerfreundlicher Weise. [Shu84]

Shannon findet die Bedeutung der Simulation darin, dass dadurch das Begreifen des Verhaltens eines Systems und die Bewertung verschiedener Strategien in einer gegebenen Struktur möglich wird. [Sha75]

Besonders wichtig ist Simulation für die Analyse von komplizierten Systemen, die ein dynamisches Systemverhalten aufweisen. Heutzutage ist die Durchführung der Simulation ohne Hilfe eines Computers undenkbar, es handelt sich hier um sogenannte Computersimulationen.

Nutzung der Simulation in den logistischen Prozessen des öffentlichen Straßenverkehrs

Verkehrs- und Logistiksysteme zählen zu den komplizierten Systemen mit dynamischen Systemverhalten, deshalb findet man viele Beispiele für Computersimulationen. Verkehrssimulationen werden grundsätzlich zunächst in zwei Gruppen eingeordnet: (vgl. dazu Abbildung 7-2)

- Makroskopische Simulation (Makrosimulation)
- Mikroskopische Simulation (Mikrosimulation)

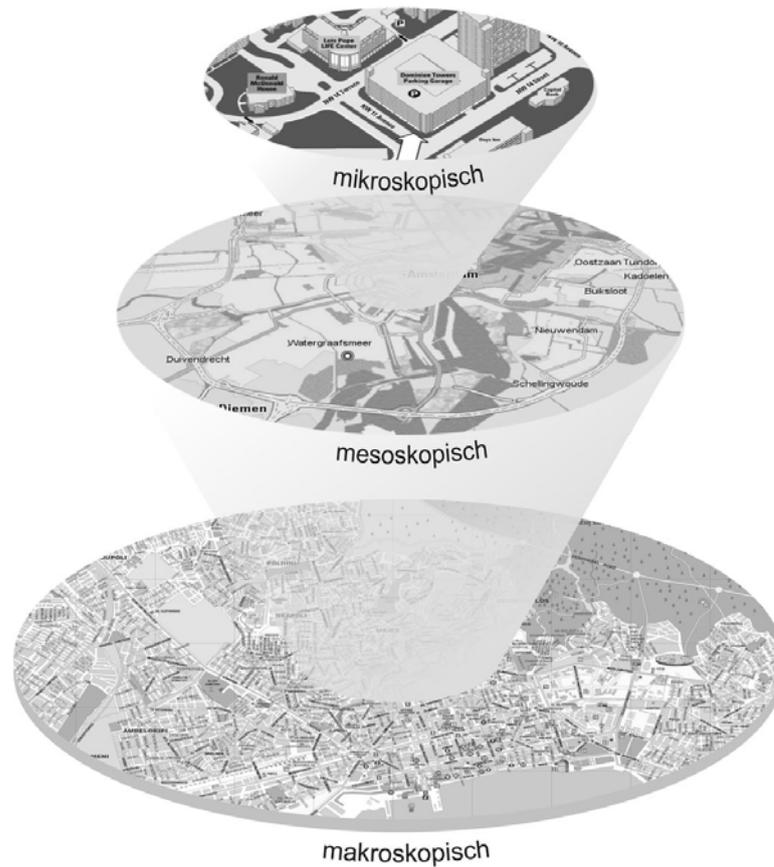


Abbildung 7-2: Makroskopische und mikroskopische Simulation [www01]

Mikroskopische Simulationssoftware

In der mikroskopischen Simulation hat jede Funktionseinheit der Realität ein individuelles Gegenstück mit allen relevanten Eigenschaften. Die Wechselwirkungen zwischen den Funktionseinheiten werden individuell berechnet.

Mikroskopische Simulation ist in erster Linie geeignet für:

- Planung von Situationen in Verkehrs- und Personenbeförderungssystemen
- Planung von Anschlüssen in multimodalen Systemen
- Planung von Verkehrsknotenpunkten
- Einstellung von Verkehrsampeln
- Verkehrsplanung von Kreuzungen
- Simulation des Fußgängerverhaltens

Bekannte mikroskopische Simulationsmodelle sind:

- LISA+ ist ein Softwarepaket zur Planung von Lichtsignalanlage. Es dient Verkehrsingenieuren zur Berechnung und Bewertung von Lichtsignalsteuerungen für Einzelknoten, für Grüne Wellen sowie für Straßennetze. Die integrierte Verkehrssimulation der geplanten Steuerung erlaubt eine Beurteilung der Verkehrsabläufe.
- PELOPS ist ein (sub)mikroskopisches, fahrzeugorientiertes Verkehrsfluss-Simulationsprogramm, welches durch eine Verknüpfung detaillierter, submikroskopischer Fahrzeugmodelle mit mikroskopischen, verkehrstechnischen Modellen sowohl eine Untersuchung des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens als auch eine Analyse des Verkehrsablaufs ermöglicht. Der Ansatz in PELOPS verfolgt die Simulation der drei wesentlichen Elemente des Verkehrs
 - Strecke/Umwelt
 - Fahrzeug und
 - Fahrermit ihren Wechselwirkungen.
- VISSIM ist eine mikroskopische, multi-modale Verkehrsfluss-Simulationssoftware. Seit ihrer Entwicklung im Jahre 1992 ist VISSIM die am weitesten verbreitete multi-modale mikroskopische Verkehrssimulation geworden. Der Name „VISSIM“ ist ein Akronym von „Verkehr In Städten - SimulationsModell“.
- AIMSUN ist eine mikroskopische Simulationssoftware für die Bewertung verschiedener Transportlösungen

Weitere bekannte Simulationssoftwaresysteme sind FOSIM, TRANSIMS, STEER, die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden.

Makroskopische Simulationssoftware

Gegenstück zur mikroskopischen Simulation bildet die makroskopische Simulation (Makrosimulation), bei der die Abbildung der Realität durch gemittelte Größen wie z.B. einen Fluss erfolgt.

Makroskopische Simulation ist in erster Linie geeignet für:

- Planung von Verkehrs- und Personenbeförderungssystemen
- Modellierung des Reisebedarfs
- Behandlung von Netzdaten
- Routenauswahl von neu einzustellenden Fahrten
- Analyse der Daten aus den Fahrgastzählungen
- Analyse der Auswirkungen des Verkehrs auf die Umgebung

Bekannte makroskopische Simulationsmodelle:

- VISUM ist eine weltweit bekannte Software für Verkehrsanalysen und Prognosen sowie für die *GIS-orientierte* Datenverwaltung im Verkehrs- und Transportbereich. Alle relevanten Verkehrsarten können gemeinsam in einem konsistenten Netzwerkmodell abgebildet werden, da VISUM für multimodale und intermodale Analysen ausgelegt ist.

Weitere bekannte Simulationssoftwaresysteme sind EMME/2, TransCad, TRIPS, CUBE, DYNAMEC und PTOPT, die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden.

Die Tabelle 7-1 enthält eine Gegenüberstellung von makroskopischer und mikroskopischer Simulation nach [Sar10].

Tabelle 7-1: Vergleich der makroskopischen und mikroskopischen Simulation [Sar10]

	Makroskopische Simulation	Mikroskopische Simulation
Paradigmen:	<p>Die Teilnehmer des Verkehrs werden durch Gruppenbildung behandelt</p> <p>Die jeweilige Größe des Verkehrs stellt einen statisch aufgefassten, für den geprüften Zeitraum geltenden Durchschnittswert dar</p> <p>Die Verbindungen zwischen den einzelnen Verkehrsobjekten werden vereinfacht dargestellt</p> <p>Typische Anwendung für langfristige Prognosen</p>	<p>Die Elemente des Verkehrs werden einzeln abgebildet</p> <p>„Real time“ dynamische Simulation</p> <p>Bewertung von Verkehrsknoten und Straßennetze</p> <p>Typisch für kurzfristige Prognosen</p>
Geschwindigkeits- und Kapazitätsabbildung	<p>Geschwindigkeitswerte werden zu Objektgruppen zugeordnet</p> <p>Die Kapazitätsparameter werden an den jeweiligen Verkehr angepasst</p>	<p>Jedem Fahrzeug sind Geschwindigkeitswerte zugeordnet</p> <p>Die Kapazität des Fahrzeug beeinflusst sein Verkehrsverhalten</p>
Detailliertheit des Modells	<p>Die Parametrierung der Objekte erfolgt gemäß der Objektfunktionen vereinfacht</p>	<p>Alle Objekte werden mit einer Reihe von Verkehrsparameter beschrieben</p>

Den Zusammenhang der Detailliertheit und Komplexität der Simulationsmodelle zeigt
Abbildung 7-3:

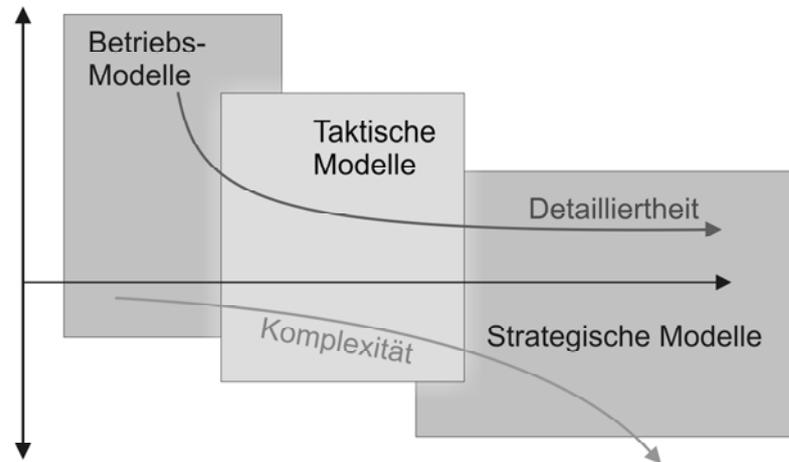


Abbildung 7-3: Zusammenhang zwischen der Detailliertheit und der Komplexität von
Simulationsmodellen [BeZs10]

Die Verbesserung der volkswirtschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Prozesse im
Verkehr- und Logistikbereich wird durch Anwendung von *Wirtschaftssimulationen* mög-
lich. Diese wird notwendig, um die wirtschaftlichen Zusammenhänge und Folgen der
Investitions- und Entwicklungsentscheidungen im Rahmen der Verkehrspolitik klarzu-
stellen.

Eine Übersicht der Modellbildungsverfahren wird in Abbildung 7-4 gezeigt:

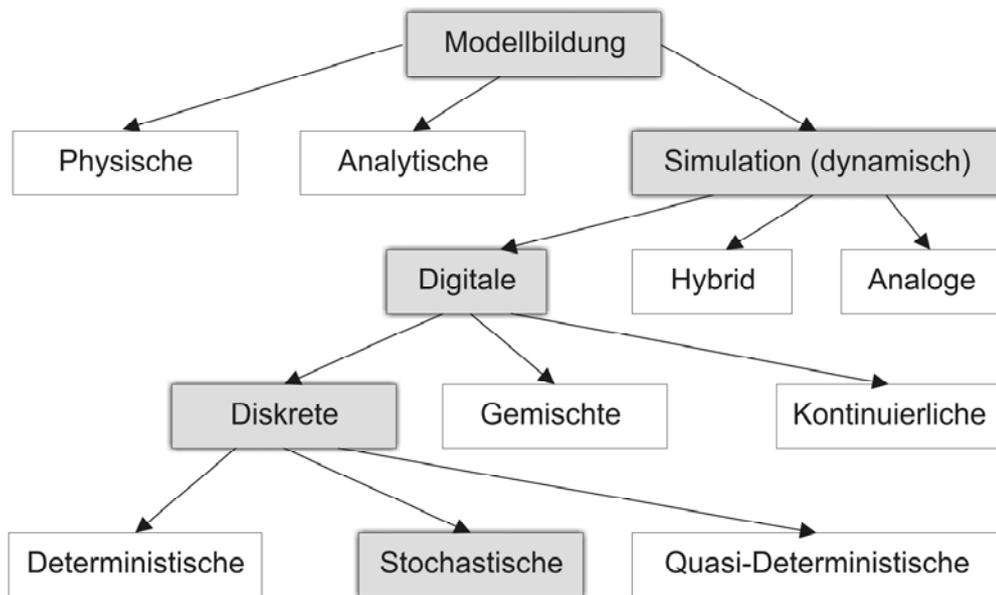


Abbildung 7-4: Übersicht der Modellbildungsverfahren [Sar10]

Morphologie des Modellbildungsverfahrens

Ist die Aufgabe – wie das im Rahmen dieser Arbeit der Fall ist - die Untersuchung eines Systems, das mehrere stochastische Prozesse umfasst und die Prozesse sind abhängig von irgendwelchen äußeren Umständen, dann ist die Anzahl der für die Beschreibung benötigten Definitionsgleichungen sehr hoch und noch höher ist die Anzahl der zur Systembeschreibung notwendigen Berechnungen. Deshalb werden die meisten Simulationsuntersuchungen mit Hilfe von virtuellen Modellen und Simulationssoftware durchgeführt.

Da das untersuchte Verkehrssystem

- infolge seiner Komplexität durch analytische Methoden nicht beschreibbar ist,
- durch eine große Anzahl von stochastischen Parameter beeinflusst ist,
- die Elemente des Systems miteinander in Wechselwirkung stehen,
- zwischen den Elementen des Systems logistische, wirtschaftliche und Informationsflüsse entstehen

entstand die Notwendigkeit einer Modellbildung mit einem

- mesoskopischen (Vgl. dazu [Sch09a])
- stochastischen

- verkehrswirtschaftlichen
- logistischen

Charakter.

Eine Aufteilung der zur Modellierung angewendeten Programmarten wird in Abbildung 7-5 dargestellt:

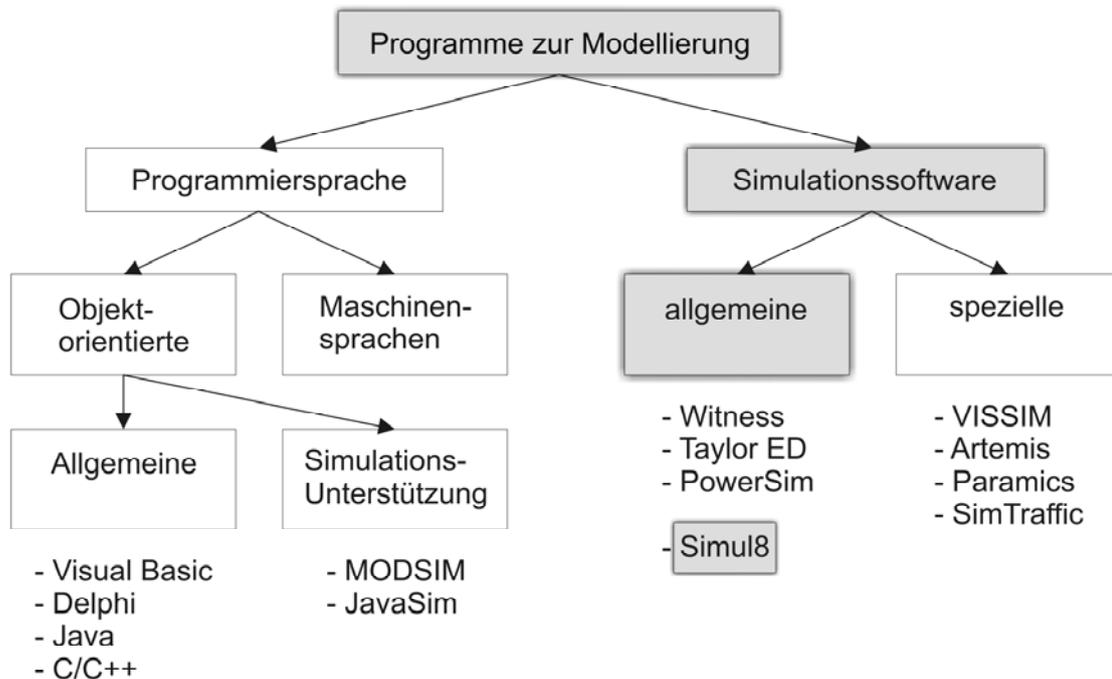


Abbildung 7-5: Programme zur Modellierung [Sar10]

Um die logistischen und verkehrswirtschaftlichen Parameter und Zielfunktionen entsprechend des allgemeinen, mathematischen Modells in die Modellbildung integrieren zu können, muss eine gut parametrierbare, allgemeine Software ausgewählt werden.

7.2.2 Vorstellung der Software SIMUL8 Professional

SIMUL8 ist eine Software für Windows, die vor allem für die Reproduktion von, mit diskreten Mengen beschreibbaren, Prozessen und für die Modellierung von mit, diesen Prozessen aufgebauten, Systemen (Netzen) anwendbar ist.

SIMUL8 arbeitet mit objektorientiert, das bedeutet, dass die Elemente der untersuchten Systeme mit Hilfe der in der Software enthaltenen Objekttypen definiert werden kann. Für die Beschreibung der Systemelemente gibt es zahlreiche eingebaute Verfahren und Funktionen. Die Software unterstützt die Modellierung von stochastischen Prozes-

sen. Die meisten Parameter von Objekttypen sind mit einer Verteilungs-, oder Dichtefunktion charakterisierbar.

Die Software generiert so viele Zufallszahlen, wie für die Präsentation der stochastischen Prozesse des untersuchten Systems verlangt werden. Da die zahlreichen, an die verschiedenen Objekte gebundenen Zufallszahl-Prozesse unabhängig bleiben sollten, benutzt die Software zum Generieren der Zufallszahlen Pseudoreihen. Generieren von Zufallszahlen auf diese Weise bedeutet auch, dass die produzierten Zufallszahlen in der Reihe nur von der ersten Zahl der Reihe abhängig sind. Damit kann garantiert werden, dass wenn die ersten Ziffern der Zufallszahlreihen des Systems ungleich angegeben werden, die Elemente der produzierten Reihen mit Sicherheit unabhängig voneinander sind. (vgl. dazu Anlage 7-1-1)

Ein weiterer Vorteil dieser Zufallszahlenbehandlung ist, dass wenn die Startwerte der, an die Objekte gebundenen Reihen mehrmals als Anfangswerte nutzt, erhält man immer eine Reihe von gleichen Zufallszahlen. SIMUL8 nutzt das aus und legt für alle einzelnen Objekte die Zufallszahlenprozesse fest. So ermöglicht SIMUL8 die Untersuchung von Systemen, wobei die stochastischen Eigenschaften der Objekte immer die gleichen Wirkungen haben. Mit dieser Methode sind die fälligen Abstraktions- oder Programmierfehler erkennbar und es kann eine Verifizierung des aufgebauten Modells realisiert werden.

Das Modell in den Simulationsuntersuchungen wurde nicht mit diesen gebundenen Reihen realisiert, weil für die allgemeingültige Zusammenfassung eine große Anzahl von, aus verschiedenen Simulationsabläufen gewonnenen, Ergebnissen benötigt wird. Mit den Einstellungsmöglichkeiten der Software können die Unterschiede der Parameter, die von Zufallszahlen abhängig sind, mit den Parametern der vorherigen Abläufe verglichen werden. Es ermöglicht auch antithetische Untersuchungen.

Das SIMUL8 ist nicht nur beim Generieren der Zufallszahlen für die Modellelemente und bei der Fertigstellung der Protokolle für die Untersuchungen nützlich, es unterstützt auch die Auswertung der Protokolle. Außerdem kann man mit dieser Software aufgrund der abgelaufenen Simulationen statistische Auswertungen erzeugen.

Die Experimente (vgl. dazu Anlage 7-1-2) bestehen aus mehrmaligen Abläufen des Modells. Während der Experimente werden Daten gesammelt, die in eine Datenbank gelangen. Dann werden die Daten verarbeitet. Da sich die Experimente aus den verschiedenen Einstellungen der beschreibenden Parameter zusammensetzen, ist es

möglich, Zielfunktionen zu definieren, die die Werte der Einstellungen auf eine vorgeschriebene Weise verändern.

Das bedeutet also, dass das Verhalten des Modells (konkreter Fall: das untersuchte Verkehrsnetz) während des Betriebs durch Veränderung der Parameter des Modells verändert wird, um es an die definierten Ziele anzupassen. Diese Eigenschaft befähigt SIMUL8, die für die erwarteten Eigenschaften des Systemmodells entsprechenden Objektparameter zu definieren.

Bezogen auf das Thema dieser Dissertation bedeutet das, dass mit der Simulationssoftware SIMUL8 ein, für die Lösung der Aufgabe geeignetes, Netzmodell definierbar ist. Die Software ermöglicht eine entsprechend detaillierte mathematische Abbildung von Objekten des Netzes und von anderen, den Betrieb des Netzes beeinflussenden Eigenschaften (zum Beispiel: Fahrplan der Fahrzeuge, die aus der Agglomeration kommen). Mit Hilfe der Software lässt sich erkennen, welche Taktzeiten für die Minimierung der Wartezeiten beim Umstieg oder welche Taktzeiten aus ökonomischen Gründen für die Fahrten zwischen den Knoten zu kalkulieren sind. Die Software erfasst während der Untersuchungen alle Werte der Netzparameter, was die Beurteilung aller Netzobjekte nach Effizienz, Kosten bzw. Auslastung ermöglicht.

Das Thema des nächsten Abschnittes ist die Zusammenfassung der, in dieser Dissertationsschrift verrichteten, Arbeit: die Definition der Systemgrenzen und Randbedingungen des Netzmodells, die konzeptionelle und programmtechnische Modellierung, die Untersuchungen und Auswertung der Ergebnisse. (vgl. dazu Anlage 7-1)

7.3 Gestaltung des zu simulierenden Netzwerkes

In der Praxis sind die Verkehrsnetze sehr vielfältig, sie können umfangreich und weit verzweigt sein, aber es gibt immer einige typische Merkmale für alle. Wenn man ihre Topologie beachtet, kann man erkennen, dass die Objekte vom gleichen Typ sich in logische Gruppen einordnen und diese Gruppen mehrfach in einem Netz zu finden sind. Wird ein von einem Personen beförderndes Omnibusverkehrsunternehmen auf irgendeinem Gebiet betriebenes Verkehrsnetz als Komplex der Fahrten zwischen verschiedenen Relationen betrachtet, dann sind die oben genannten Gruppen der Netzobjekte an einzelne Fahrten, die Garagen, Starthaltstellen und die Fahrzeuge selbst gebunden. Die von den Fahrten gebildeten Gruppen bilden das Betriebsgebiet des Unternehmens, die einzelnen Fahrten haben oft gemeinsame Betriebsgebiete. Abhängig von Eigenschaften des Betriebsgebiets kann das ganze Verkehrsnetz auf größere Mengen (Segmente) der oben genannten Gruppen geteilt werden. Diese Segmente, arbeiten quasi unabhängig voneinander, wenn man die verknüpfende Wirkung der Be-

triebsorganisation vernachlässigt. Das bedeutet, dass sich die Fahrten auf einem gegebenen Betriebsgebiet infolge der Siedlungsstruktur, der Bezirksverwaltungsgrenzen oder der Verkehrstopografie von anderen Fahrten des Unternehmens separieren, also können sie als selbstständige Netze (Segmente) eines größeren Netzes beschrieben werden.

Ist unser Ziel die Untersuchung der Benutzbarkeit der, für die Beschreibung von Verkehrsnetzen ausgearbeiteten, mathematischen Zusammenhänge und der Simulation für die Problemlösung, ist es zielwürdig, das zu untersuchende Verkehrsnetz aufgrund des vorher Geschriebenen zu teilen und die Segmente einzeln zu untersuchen. Die oben angeführte Simulationsmethode begründet sich auf einer parametrischen Systembeschreibung. Werden die Parameter mit Eigenschaften der Netzsegmente aufgefüllt, so kann man die Segmente einzeln untersuchen. Der Gesamteffekt, der in den Segmenten durch die Untersuchungen erzeugten, den Definitionen entsprechenden Betriebsbedingungen, kann durch entsprechende Partitionen den Betrieb des ganzen Verkehrssystems in Richtung der erwünschten Ziele verändern. Im nächsten Abschnitt erfolgt die Beschäftigung mit der Auswahl eines Segmentes für die Untersuchung, mit der Abgrenzung des Gebietes und der Funktionen des ausgewählten Segmentes, also mit der Bestimmung der Systemgrenzen.

7.3.1 Definition der Systemgrenzen

Die Untersuchung der Funktion von Verkehrsnetzen, mit den im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Methoden, ermöglicht die Lösung von Problemen der Praxis. Um die für die betriebliche Praxis charakteristischen Bedingungen vollständig beobachten zu können, wurde im Rahmen dieser Dissertation die Lösung der Aufgabe bezogen auf ein Segment eines realen öffentlichen Straßenverkehrsnetzes vorgenommen und dokumentiert.

Dazu wird die im Abschnitt 7.1.1 dieser Arbeit definierte Aufgabe mit der Untersuchung eines Segments vom ÖPV-Netz der Borsod Volán AG gelöst. Dieses Segment knüpft an zwei Städte (Miskolc und Kazincbarcika) an und bildet eine Verkehrsagglomeration um die frequentierte Verkehrsachse Miskolc - Kazincbarcika. (vgl. dazu Anlage 7-1-4/5)

Borsod Volán AG ist eine Firma, die sich mit der Personenbeförderung beschäftigt. Der Betriebsbereich der Firma befindet sich bis zu 95 % in der Region Nordungarn. Das „heimische“ Tätigkeitsgebiet verlassen nur einige Fahrten der Firma, diese Fahrten verkehren im ganzen Land. Borsod Volán AG betreibt den öffentlichen Personenver-

kehrsdienst mittels Omnibussen in der Region Nordungarn zusammen mit vier anderen Firmen mit ähnlichem Profil, diese sind Nógrád Volán, Hatvani Volán, Mátra Volán und Agria Volán. Im Komitat *Borsod-Abaúj-Zemplén*, welches ein Teilgebiet der Region ist (vgl. dazu Anlage 7-1-5), dominieren die Fahrten der Borsod Volán AG.

Miskolc ist der Sitz des Komitats. Kazincbarcika ist eines der industriellen Zentren, wo sich eine bedeutende Firma der chemischen Industrie, die Borsodchem AG, befindet. Zwischen den zwei Städten verkehren die Omnibusse des Borsod Volán nach einem Fahrzeugeinsatzplan, welcher fast einem Taktfahrplan entspricht. Diese Städte sind vorrangige Reisezielpunkte der Bevölkerung des Komitats. Die zwei Städte sind über die Hauptstraße 26 verbunden, die eine der wichtigsten Straßen des Komitats ist und deshalb eine gute Möglichkeit für die von anderen Gebieten anreisende Bevölkerung bietet, sich dem öffentlichen Verkehr anzuschließen.

Derzeit sind die Fahrpläne der, von der Agglomeration angefahrenen, Strecken nicht an einen Taktfahrplan angepasst. Damit ist die Taktzeit unabhängig von den Umsteigemöglichkeiten dieser Fahrten, was wiederum bedeutet, dass die Wartezeiten beim Umsteigen sehr lang sein können. Bisher gab es keine Möglichkeit, die Takte (Anzahl der Fahrzeuge in einem bestimmten Zeitintervall) nach den Interessen der Sammelpassagiere zu bestimmen und zugleich die Betriebskosten des Segmentes zu optimieren, weil die Mittel dafür nicht existierten.

Die Lösung der im Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Aufgabe ermöglicht die Verbesserung dieser Situation. Deshalb werden die in der Arbeit untersuchten Systemgrenzen laut der oben genannten Methoden definiert. Das Zeitintervall wird als „ein Tag“ definiert, da die Periodizität der in der Agglomeration bewohnten Strecken (wegen Arbeits- oder Ausbildungszwecken) dies begründet. Dieser Zeitraum wird in vier Zeitfenster (0 bis 8 Uhr, 8 bis 12 Uhr, 12 – 16 Uhr, 16-24 Uhr) geteilt, damit die Veränderung des Passagierverkehrs mathematisch angegeben werden kann. Die Aufgabe besteht in der Verbindung mit dem Personenverkehr, deshalb bildet das Simulationsmodell die Objekte ab, die für die Versorgung dieser Funktion notwendig sind. Nachfolgend werden die Simulationsuntersuchungen dargestellt, die Personenverkehrseigenschaften der Fahrten von Kazincbarcika nach Miskolc analysiert und schließlich die Zeit- und Kostenfaktoren optimiert.

7.3.2 Definition der Randbedingungen

Bestimmung der Fahrtroute und Fahrzeit

Die Borsod Volán AG, als Unternehmen, das in dieser Relation die Dienstleistung bietet, ist bestrebt, seine Tätigkeiten zu rationalisieren. Deshalb sammelt das Unternehmen regelmäßig Daten über die Auslastung der Fahrten, die in dem Dienstleistungsgebiet verkehren. Dafür werden von Zeit zu Zeit Fahrgastzählungen zur Bestimmung von OD-Matrizen durchgeführt. Diese Daten hat Borsod Volán für die Simulation zur Verfügung gestellt. Die detaillierten Daten der Fahrgastzählungen sind in der Anlage 7-2 zu finden, Tabelle 7-2 enthält die Zusammenfassung dieser Datenbank.

Die Haltestellen der Fahrten zwischen den beiden Städten, die im Simulationsmodell als Knoten des Verkehrsnetzes implementiert werden, sind in der Tabelle mit Rot markiert. Es wurde bei der Auswahl betrachtet, dass ein Teil dieser Haltestellen aufgrund ihrer Lage als natürliche Verbindungspunkte für die Fahrten aus der Agglomeration dienen, andererseits dienen diese Haltestellen als Teilungspunkte, wenn man den Passagierverkehr (Anzahl der zu- und absteigenden Fahrgäste) betrachtet.

Tabelle 7-2: Zusammenfassende Tabelle der Fahrgastzählungen, aufgeteilt nach Tageszeiten, ohne Sammelpassagiere

Haltestellen	einsteigende Fahrgäste								aussteigende Fahrgäste							
	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe	Gruppe		
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%		
1 Kazincbarcika, aut. áll.	534		292		569		212		0		0		0		0	
2 K. barcika, Ifjúmunkás tér	143		52		113		53		7		4		7		1	
3 K. barcika, kórház	168		77		80		64		12		11		38		5	
4 Kazincbarcika, vh.	188		86		118		63		21		27		62		23	
5 Kazincbarcika, központi isk.	249	65%	83	67%	114	72%	77	74%	16	11%	31	17%	73	23%	40	21%
6 K. barcika, temető	58		29		45		19		91		63		72		36	
7 K. barcika, Szt. Flórián t. aut. vt	178		86		203		71		90		32		127		41	
8 K. barcika, VOLÁN tp.	23		2		4		20		11		2		4		0	
9 K. barcika, BORSODCHEM IV. k	9		4		16		8		23		7		16		17	
10 Berente, PVC gyár b. út	48		10		45		20		74		23		21		43	
11 Berente, Hőerőmű gy. felüljáró	1	2%	0	1%	11	4%	0	3%	15	4%	2	3%	5	2%	8	7%
12 Berente, Bányagépjavitó üzem	6		4		11		4		12		10		11		7	
13 Sajószentpéter, Szabadság tp.	119		28		26		16		9		19		60		30	
14 S. péter, parasznai elág.	276		114		77		44		61		68		208		73	
15 Sajószentpéter, posta	64	27%	66	24%	55	14%	34	16%	11	6%	25	15%	64	26%	16	19%
16 S. péter, edelényi elág.	145		36		72		23		61		31		62		17	
17 Sajószentpéter, Kossuth u. 32.	38		15		8		10		6		14		56		16	
18 Piltatanyai elág. [1]	1		0		0		0		11		1		13		1	
0 Faiskola	0		0		0		0		6		0		0		0	
0 Sajóbábonyi elág. [2]	3		0		6		0		10		7		43		13	
0 Sajóbábony, lakótelep	4		0		0		2		0		0		7		1	
0 Sajóbábony, ófalu bej. út	2		0	1%	0	1%	0	2%	0	3%	0	1%	4	6%	0	3%
0 Sajóbábony, gyártelep	0		0		0		0		31		0		3		0	
19 SAJÓBÁBONYI ELÁGAZÁS	0		0		0		0		0		0		0		0	
20 Sajókeresztúri elág. [1]	4		0		0		1		4		0		11		1	
21 Borsodi Ércelőkészítő Mű bej. u	2		8		4		6		5		0		0		4	
22 26. sz. fő. u. Sz. besenyői elág.	1		0		5		3		3		3		19		4	
23 Miskolc, Stromfeld laktanya	1		3		16		7		19		17		4		22	
24 Miskolc, repülőtér bej. út	74		30		63		28		257		40		120		99	
25 Miskolc, megyei kórház	50	5%	44	7%	86	9%	6	5%	376	75%	126	64%	111	44%	37	50%
26 Miskolc, Levente vezér u.	1		0		1		0		14		11		7		11	
27 Miskolc, aut. áll.	0		0		0		0		1134		495		520		225	
Insgesamt/Kontrolle	2390	100%	1069	100%	1748	100%	791	100%	2390	100%	1069	100%	1748	100%	791	100%

Mit Hilfe dieser Teilungspunkte lässt sich die Linie zwischen den beiden Städten gut auf Strecken aufteilen. Die Straßenstrecken des Simulationsmodells sind in der Anlage 7-1-6 zusammengefasst.

Da gleichzeitig mit der Untersuchung Busse in dieser Relation fahrplanmäßig fahren, werden die Parameter der Fahrzeit in der Simulation einfach übernommen. Laut den Erfahrungen von Borsod Volán beträgt dieser Wert 63 Minuten (siehe Anlage 7-1-23). Es ist möglich, diesen Wert zu fixieren, weil die Fahrzeit vor allem von den Eigenschaften des Linienverkehrs und von der Anzahl der zu- und absteigenden Passagiere in den Haltestellen beeinflusst wird. Diese Faktoren können im Grunde genommen als konstant für die gegebene Zeitdauer von einem Tag angesehen werden.

Sammelfahrten- und Fahrpläne

Hauptziel der Simulationsuntersuchungen ist:

- die Gestaltung eines Taktverkehrs in der oben genannten Relation, dessen Kosten vorab bestimmt wurden und
- die Minimierung der Umsteigezeiten der, aus der Agglomeration zukommenden, Passagiere.

Die Verbindung der Sammelfahrten an eine gegebene Strecke des oben konstruierten Netzsegmentes ist durch Sortierung nach ihrer Linienführung möglich. (vgl. dazu Anlage 7-1-7)

Die, in der Anlage 7-1-7 aufgelisteten Fahrten werden als gegeben betrachtet, das heißt, dass die Modifizierungsmöglichkeit der Fahrpläne oder der Anzahl der Fahrzeuge in diesen Relationen nicht untersucht wird. Fahrpläne der Sammelfahrten werden in der Anlage 7-3 detailliert. In der Simulation wurden nur die Umsteigezeiten der nach Miskolc fahrenden Passagiere betrachtet. Das geschieht natürlich auf eine gewichtete Art und Weise. Basis der Minimierung sind: Wartezeiten multipliziert mit der Anzahl der wartenden Passagiere. Diese Regel macht es möglich, einen Takt zu erzeugen, der sich besser an die Fahrpläne der am stärksten befahrenen Sammelfahrten anpasst.

Bestimmung der Fahrzeugtypen und –Parameter für den Taktfahrplan

Die Zuordnung von Aufgaben und Ressourcen ist bei allen Vertaktungsproblemen ein sehr wichtiges Element. Aus der Natur der untersuchten Aufgabe ergibt sich, dass in diesem Fall das als Ressourcen definierbare Systemobjekt „das Fahrzeug (= Omnibus)“ zu wählen ist. Der Fahrplan, der sich durch Simulationsuntersuchungen formuliert, bestimmt im Grunde genommen die Personenbeförderungsaufgaben für die Zeitdauer der Simulation und befriedigt die Zielfunktion, die am Anfang der Simulation angegeben wurde. Das bedeutet in diesem Fall, dass die Kosten und Fahrpläne die Anzahl der Fahrten bestimmen, die an der gegebenen Strecke täglich benötigt werden, um der Verkehrsnachfrage der Fahrgäste zu entsprechen.

In der Simulation müssen selbstverständlich die, zum Verrichten der Aufgabe benötigten, Ressourcen in die Betrachtung einbezogen werden. Die Zuordnung von Ressourcen für eine Personenverkehrsaufgabe kann nur aufgestellt werden, wenn die Anzahl der täglich benötigten Fahrten bekannt ist. Da eines der Ziele der Simulation die Bestimmung der Anzahl der täglich benötigten Fahrten ist, ist die Beachtung der Ressourcen vor den Untersuchungen nur möglich, wenn die Parameter der für die Abwicklung der Personenverkehrsaufgaben potentiell geeigneten Fahrzeuge der Fahrzeugflotte bestimmt werden. In diesem Fall bedeutet die Fahrzeugflotte Omnibusse, mit den Parametern der Tabelle 7-3. Die Bestimmung der Taktzeit ist Aufgabe der Simulationsuntersuchungen. Die Taktzeit ist ein Parameter mit Zeitcharakter. Bei der Bestimmung der Taktzeit sind nach Definition der zu lösenden Aufgabe die Kosten in Betracht zu ziehen. Die Betriebskosten wurden aufgrund der Kostenausweise und Fahrzeugdaten der Borsod Volán AG entsprechend Tabelle 7-3 angesetzt.

Tabelle 7-3: Parameter der Fahrzeuge, die für die Personentransportaufgabe benutzt werden können

Kategorie Fahrzeuglänge [m]	Kapazität [Stehplätze+ Sitzplätze]	spezifische Betriebskosten [Ft/km]	spezifische Betriebskosten [Ft/min]
11,0	75	336	132
11,5	76	276	108
11,9	96	427	167
12,0	105	396	155
12,7	92	342	134
12,9	106	365	143
16,5	123	438	172
17,9	142	410	161
18,1	147	622	244

Für Simulationsuntersuchungen ist die Implementierung einer Omnibusflotte mit den genannten Parametern notwendig. Die Anzahl der Fahrzeuge in der Omnibusflotte ist

vor der Untersuchung im Simulationsmodell variabel. So wird bei der Lösung der Aufgabe analysiert, was eine Änderung der Parameter der Fahrzeuge zur Folge hat.

7.3.3 Aufbau und Beschreibung der Objekte des Netzwerkes

Im vorherigen Abschnitt wurden die Randbedingungen der Aufgabe detailliert. Diese Randbedingungen sind die Anfangsdaten des zu erstellenden Modells für die Simulationsuntersuchungen. In diesem Abschnitt wird das Simulationsmodell dargestellt. Außerdem werden auch die Objekte des Simulationsmodells dargestellt, um zu zeigen, wie die Parameter abgebildet wurden.

Die Anlagen 7-1-8 und -9 stellen maßstabgerecht die räumliche Lage des ausgewählten Netzsegmentes dar und zeigen die vom Segment betroffenen Städte und deren schematisches Straßennetz und die Hauptverkehrsstraße, die die beiden Städte verbindet und als Fahrtlinie dient. Rot markiert sind die Objekte, die nach den, im Abschnitt 7.3.2 beschriebenen, Gesichtspunkten gewählt wurden und die auch in der Tabelle 7-2 rot markiert sind.

Die Sammelfahrten haben Anschluss an die Knoten 7; 12; 14 entsprechend der Tabelle 7-2. Die detaillierte Modellierung der Sammelfahrten wird hier nicht untersucht (vgl. dazu Anlage 7-1-10). Deshalb sind die Sammelfahrten mit der Anzahl der Passagiere, die an den Haltestellen der Verbindungspunkte von Zeit zu Zeit auftreten nach SIMUL8 als "Quellen" abgebildet. Die Abbildung der Passagiere zwischen Miskolc und Kazincbarcika geschieht ähnlich. Die zusteigenden Passagiere erreichen die Haltestellen Nr. 1; 12; 14; 19; 23 nach der im Abschnitt 7.3.2 dargestellten Gliederung, entsprechend der Anlage 7-1-12.

Die zusteigenden Passagiere können an den Haltestellen 7; 12; 14; 19; 27 aussteigen.

Statische und dynamische Objekte und ihre Parameter

Die Software SIMUL8 benutzt für die Simulation Objekte mit dynamischem und statischem Typ. Die Hauptrolle der statischen Objekte ist die Erzeugung und Parametrierung der dynamischen Objekte während der Simulation bzw. die Modifikation dieser Parameter. Die dynamischen Objekte existieren nur ab dem Zeitpunkt, in dem sie erstellt werden. Die dynamischen Objekte strömen zwischen den statischen Objekten und vermitteln Informationen.

Statische Simulationsparameter

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Objekte gelten während des Aufbaus des Modells als statische Objekte. Das bedeutet, dass die Knoten, Haltestellen und Objekte, die die Sammelfahrten repräsentieren, Objekte sind, die sich während der Simulation nicht verändern. Diese Objekte beeinflussen den Betrieb des Modells durch Parametrierungsmöglichkeiten von SIMUL8.

Grundsätzlich bilden vier statische Objekttypen das Simulationsmodell.

Diese sind:

- ein Lageplan,
- die Haltestellen,
- die Passagierquellen der Sammelfahrten und
- die Passagierquellen der Fahrten zwischen den beiden Städten.

Die letzten zwei Objekttypen weisen Ähnlichkeiten auf mit dem Unterschied, dass das Ziel der Fahrgäste der Sammelfahrten nur ein Verbindungspunkt sein kann, dagegen können die Fahrgäste der Hauptverkehrslinie zwischen den beiden Städten die Fahrten auch in den dafür bestimmten Haltestellen verlassen. Es geht jetzt weiter mit der Simulationsabbildung dieser Objekttypen.

Der Lageplan ist maßstabgerecht, was die korrekte Behandlung der Entfernungen garantiert. Der Lageplan hat aber im Laufe der Simulationsuntersuchungen keine weitere Rolle.

Die Rolle der Haltestellen und Knoten ist die Speicherung der auf eine Fahrt wartenden Fahrgäste und die Speicherung der an der Haltestelle ankommenden Fahrgäste. Die Speicherung bedeutetet einerseits die Erfassung der an ihrem Ziel angekommenen Fahrgäste, andererseits - was für die Simulationsuntersuchungen sehr wichtig ist - die Erfassung der Wartezeiten aller Fahrgäste. Abbildung 7-6 zeigt als Beispiel die Haltestelle Nr. 14 (E) im Betrieb als eine Momentaufnahme im Ablauf der Simulation.

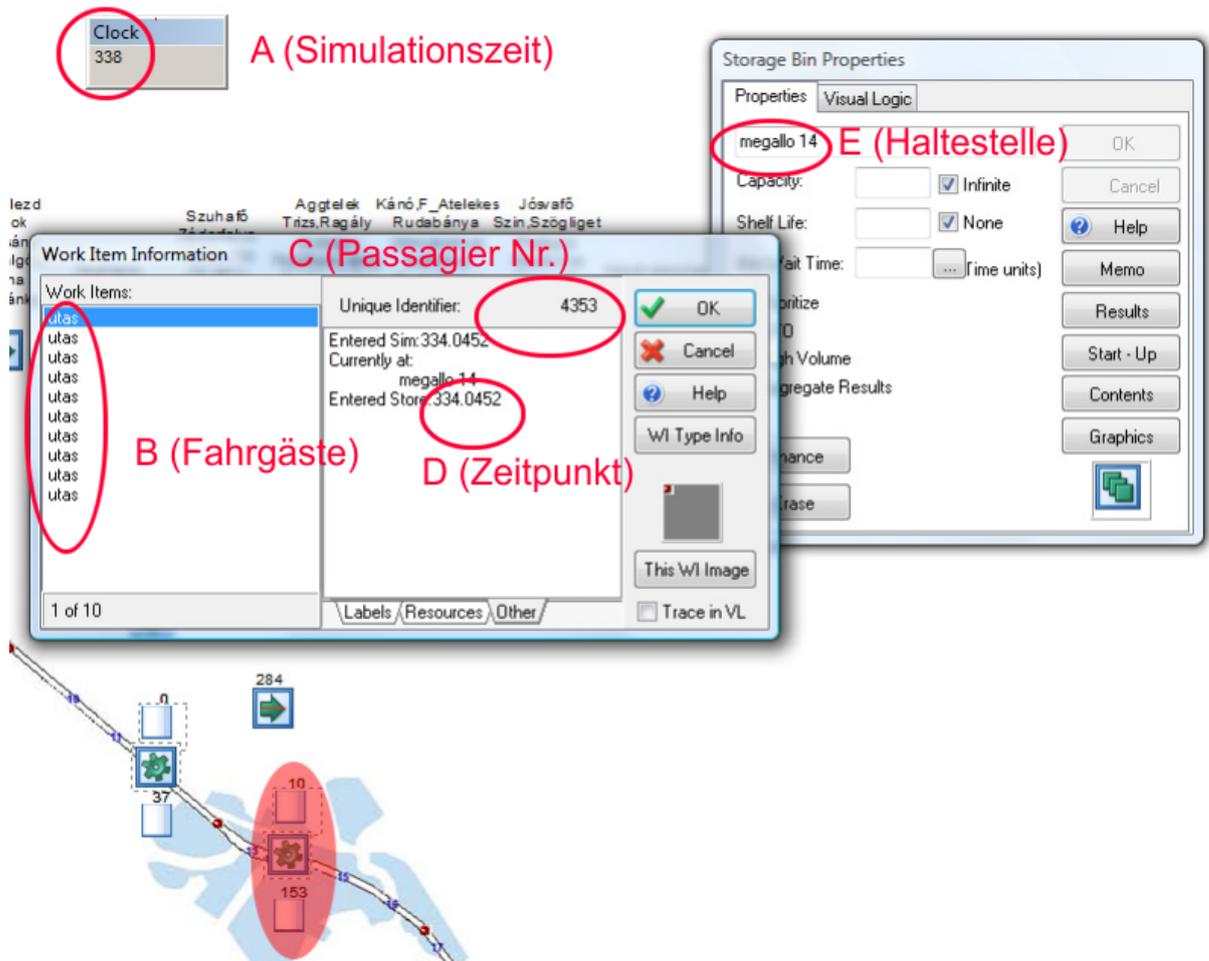


Abbildung 7-6: Rolle des Objekts „Haltestelle“ in der Simulation

Die Aufnahme wurde in der 338. Minute der Simulationszeit (A) gemacht: Zu diesem Zeitpunkt warten 10 Fahrgäste (B) auf die Ankunft der nächsten Fahrt, 153 Fahrgäste sind an ihrem Ziel angekommen. Die Daten der 10 wartenden Fahrgästen (B) sind im "Work Item Information"-Fenster ablesbar, wie zum Beispiel, dass der Passagier Nr. 4353 (C) zum 334.0452. Zeitpunkt (D) an der Haltestelle angekommen ist. Die Ankunftszeit wird bei jedem Fahrgast registriert. Der Speicher berechnet und speichert die Differenz der Ankunftszeiten und Simulationszeiten nach Abfahrt der Fahrgäste, also registriert der Speicher die Wartezeiten.

Nach Informationen in der Anlage 7-1-12 sind an dieser Haltestelle während der 338 Minuten 406 Fahrgäste vorgekommen, während die maximale Anzahl der gleichzeitig anwesenden Fahrgäste an der Haltestelle 62 Personen waren.

Über die Wartezeiten in einer Haltestelle können sehr viele Informationen gewonnen werden, wenn dieser Objekttyp benutzt wird. Die minimalen und maximalen Wartezei-

ten lassen sich detailliert auswerten bzw. nach Eingabe eines beliebig deklarierten Zeitlimits kann die Verteilung der Wartezeiten innerhalb des Limits untersucht werden.

Die Ergebnisse der Statistiken dieser Objekttypen sind sehr wichtig: sie helfen den Betrieb des Netzes zu beurteilen und diese Ergebnisse werden als Grunddaten für den Optimierungsprozess benutzt. Weitere wichtige Objekttypen des Modells sind die Fahrgastquellen. Die oben genannten Gründe erklären, dass es zielwürdig ist, Fahrgastquellen der Sammelfahrten und Fahrgastquellen des Verkehrs zwischen den beiden Städten zu unterscheiden.

Ein Beispiel für eine Fahrgastquelle der Sammelfahrten ist die Linie 4040 Kazincbarcika-Edelény-Múcsony (beschrieben im Abschnitt 7.3.2), die im Modell Anschluss an den Knoten Nr. 7 hat.

In der Anlage 7-1-13 repräsentiert die rote Markierung eine Sammelfahrt als Passagierquelle mit Informationen über den Fahrplan und Anzahl der Passagiere während der Fahrt, die für die Modellierung ausgewählt wurde. Solche Tabellen gibt es im Simulationsmodell für alle Sammelfahrten. Die vertikale Spalte "A" dieser Tabelle enthält die Simulationszeitpunkte der Ankunft der Fahrt bei den Verbindungspunkten. Die Ankunftszeiten stammen aus dem Fahrplan der Fahrt. Die vertikale Spalte "B" enthält die Anzahl der Fahrgäste, die an der Haltestelle zu dem gegebenen Zeitpunkt ankommen. Diese Daten stammen von Fahrgastzählungsdaten der Borsod Volán AG. Die Daten in der Spalte "B" sind die zu erwartenden Werte, die sich mit Veränderung des Parameters der Anlage 7-1-14 an die verschiedenen Fahrgastzählungsdaten anpassen lassen.

Das Diagramm bezieht sich auf die Daten in der 2. Reihe der Tabelle in der Anlage 7-1-13. Die Höhe der Säulen des Diagramms zeigt in Prozent die Eintrittshäufigkeit des dazu gehörenden Wertes. Die Genauigkeit des Diagramms kann erhöht werden, indem die Fahrgastzählungen an verschiedenen Tagen durchgeführt werden. In dem Fall, der in Abbildung zu sehen ist, kommt es in 28 % der Fahrgastzählungen vor, dass das auf den Knoten in der 340. Simulationsminute angefahrene Fahrzeug 35 Fahrgäste mitbringt. Beim Aufbau des Modells kann es vorkommen, dass im Interesse der Parametrierung dieser Genauigkeit für die erwünschte Realitätsnähe des Modells mehr Daten benötigt werden als aus den Fahrgastzählungsdaten zur Verfügung stehen. Für die fehlenden Daten wurde eine praxisnahe Verteilung entsprechend der Anlage 7-1-14 vorausgesetzt.

Wie im Abschnitt 7.3.3 beschrieben, sind die Fahrgäste der Agglomeration neben den o.g. Parametern auch durch ihr Reiseziel gekennzeichnet. Deshalb ist die Möglichkeit der Einstellung von Reisezielen der Fahrgäste notwendig. Aus der Anlage 7-1-15 ist abzulesen, dass das Ziel von 89 % der Fahrgäste der Knoten und von 11% der Fahrgäste eine der beiden Städte (Miskolc) und somit der Endpunkt der Relation ist. Die Ziele so genau anzugeben, ist nur anhand von Fahrgastzählungen möglich. In diesem detaillierten Fall ist die Erklärung der Anlage 7-1-15 folgendermaßen: 31 Fahrgäste von 35, die in die Haltestelle antreffen, fahren nicht weiter (sie warten nicht auf die nächste Fahrt), 4 Fahrgäste warten auf die nächste Fahrt, mit der sie die Reise zum Endpunkt der Relation fortsetzen.

Die Modellierung der zwischen den beiden Städten fahrenden Fahrgäste unterscheidet sich von der Modellierung der Sammelfahrgäste, da sich die Fahrpläne der Fahrten zwischen den beiden Städten und der Sammelfahrten auch unterscheiden. Der grundsätzliche Unterschied besteht darin, dass die Sammelfahrten nach fixierten, in der Simulation sich nicht ändernden Fahrplänen fahren, dagegen ist die Aufgabe für die Fahrten auf der Hauptverkehrslinie die Anzahl der zwischen den beiden Städten verkehrenden Fahrten zu bestimmen, was auch bedeutet, dass sich ihr Fahrplan während der Simulation ändert. Für die Bestimmung der Anzahl und Reiseziele der Fahrgäste von dieser Relation werden die Fahrgastzählungsdaten der Tabelle 7-2 benutzt.

Die Verteilung der nach Tageszeiten zerlegten Fahrgastzahlen auf die verfügbaren Fahrzeuge ist die Aufgabe der Simulationssoftware; die Werte sind natürlich abhängig davon, wie viele Fahrzeuge auf der gegebenen Relation verkehren.

Die Bestimmung der Anzahl der Fahrgäste, die auf der Relation zwischen den beiden Städten verkehren, ist mit Hilfe von Anlage 7-1-16 einfacher zu verstehen. Die Tabelle dieser Anlage stammt aus der Tabelle 7-2. Die Ankunftszeiten der Fahrgäste an den Haltestellen wurden aufgrund der nach Tageszeiten sortierten Fahrgastzahlen berechnet, bei der die Verteilung als gleichmäßig angenommen wurde. Also, wenn in einer Haltestelle pro Stunde 10 Passagiere ankommen und die Ankunftszeiten eine gleichmäßige Verteilung aufweisen, kann berechnet werden, dass die Passagiere durchschnittlich in jeder 6. Minute an der Haltestelle ankommen. Dieser Gedankengang ist anwendbar, wenn die Fahrten nach einem mit fixierter Taktzeit betriebenen Taktfahrplan verkehren, weil in diesem Fall die Ankunftszeiten der Fahrgäste nicht nach einer *Poisson-Verteilung* bestimmt wird, sondern es zu vermuten ist, dass sie in dem von der Taktzeit bestimmten Intervall gleichmäßig verteilt sind.

Es ist in der Anlage 7-1-16 zu sehen, dass für die 4 Tageszeiten des Fensters „*Time Dependent Distribution*“ die Berechnung der Zeitintervalle zwischen den Ankünften der Passagiere an den Haltestellen mit Hilfe anderer Elementen der Tabelle erfolgt.

Dementsprechend registriert das Modell immer einen Fahrgast im Speicher nach Ablauf der Zeiten in der Tabelle. Wie in der Abbildung 7-6 zu sehen ist, symbolisiert dieser Speicher die Haltestellen. Die Fahrgäste warten ebenso auf die Fahrten, wie die Fahrgäste aus der Agglomeration und fahren mit dem gleichen Fahrzeug bis zu ihren Reisezielen.

Die Ziele der Passagiere dieser Relation werden aufgrund der Fahrgastzählungen ähnlich dem Mechanismus der Sammelfahrten bestimmt. Der Unterschied ist, dass die Fahrgäste alle Haltestellen der Relation als Ziel betrachten können. Anlage 7-1-17 zeigt, welche Haltestellen die, in der (in der Anlage 7-1-16 rot markierten) 1. Haltestelle zusteigenden, Passagiere als Ziele ansehen. Es ist zu sehen, welche von den 5 potentiellen Halteorten die hier zusteigenden Fahrgäste bevorzugen. Eine nützliche Information für den Betreiber der Fahrt ist, dass 18 % der im 1. Abfahrtspunkt zugestiegenen Passagiere in der Haltestelle Nr. 7 aussteigen. Da sich die beiden Haltestellen auf dem Stadtgebiet von Kazincbarcika befinden, wird deutlich, dass ein großer Anteil der Passagiere diese Fahrt als Lokaldienst nutzt. Wichtige Informationen aus der Abbildung sind noch, dass mehr als die Hälfte der am Ausgangspunkt zugestiegenen Fahrgäste bis zur Endstation fährt.

Das Modell nutzt denselben Gedankengang für die Bestimmung der Fahrgastzahlen an den einzelnen Haltestellen für die gegebene Zeitperiode und für die Reiseziele der zusteigenden Passagiere mit Hilfe der Datenbank der Fahrgastzählungen der Borsod Volán AG.

Nach der „Erzeugung“ der Objekte "Fahrgäste" der Fahrten im Modell ist es notwendig, sich mit der Parametrierung der Fahrzeuge und der aus diesen Fahrzeugen aufgebauten Flotte zu beschäftigen, da diese Fahrzeuge als Ressourcen des Modells gelten.

Simulationsparameter der die Fahrzeugmenge behandelnden Objekte

Die Anlage 7-1-18 oben links zeigt die graphische Darstellung der Fahrzeugflotte. Die Flotte als Ressource hat die Aufgabe in der Simulation, die Fahrzeuge den konkreten Fahrten zuzuordnen, wenn die Zuordnung während der Simulation im durch die Taktzeitparameter bestimmten Zeitpunkt aktuell wird. SIMUL8 wählt ein Fahrzeug aus der Flotte für die aktuelle Aufgabe aus. Die einzelnen Fahrzeugtypen werden nach ihrer Länge in den Simulationsuntersuchungen definiert, wie es im Abschnitt 7.3.2 detailliert ist, da die Länge eine charakteristische Eigenschaft der Fahrzeuge ist. Die Anzahl der

Fahrzeuge innerhalb eines Typs ist für jede Untersuchung natürlich veränderbar. Die Anzahl der Fahrzeuge der aktuellen Flotte ist auf in der Anlage 7-1-18 oben, über dem Icon der Fahrzeugtypen zu sehen. Die Parameter der Fahrzeugtypen wurden entsprechend Tabelle 7-2 mit Hilfe der Fenster für Parametrierung der Ressource in SIMUL8 eingestellt. Während der Simulationsuntersuchungen wird die Zusammensetzung der Flotte durch Veränderung der Anzahl der einzelnen Fahrzeugtypen modifiziert.

Simulationsparameter der dynamischen Objekte

Es gibt zwei Typen von dynamischen Objekten im Modell: Typ „Passagier“ und Typ „Bus“.

Die Objekttypen "Passagier" werden durch entsprechende statische Objekte (siehe Abschnitt 7.3.3) während des Laufes einer Simulation ins System einbezogen.

Nur nachdem diese Objekte sie ausgestoßen, quasi ins Leben gerufen haben, werden die Objekttypen "Passagier / Passagiere" genannt. Das Verhalten der Passagiere während der Reise wird also durch die im Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Objekte bestimmt, die einzelnen Passagiere vermitteln lediglich die Information über ihr Reiseziel zwischen den Objekten des Netzes, wie es auch Anlage 7-1-19 zeigt. Dieses Funktionsprinzip macht es möglich, dass SIMUL8 immer die Passagiere vom Bus „abnimmt“, wenn ein Bus an einer gegebenen Haltestelle eintrifft, wo der Parameterwert "ce" („Ziel“) mit der gegebenen Haltestelle identisch ist.

Die Objekttypen „Bus“ werden auch während des Laufes der Simulation ins System einbezogen. Diese Objekte werden von dem statischen Ressourcenobjekt "Flotte" (Vgl. dazu Anlage 7-1-18) erzeugt. Die Busse werden für Personentransportaufgaben aus der Flotte ausgewählt. Nachdem das Modell einen Bus erzeugt, wird dieser Bus die Haltestellen nach der im Fahrplan gegebenen Reihenfolge befahren. Natürlich werden Passagiere an den Haltestellen zu- und aussteigen.

Anlage 7-1-20 zeigt, wie viele Arten von Informationen die Busse zwischen den Objekten vermitteln. Alle Busse haben ein eigenes Kennzeichen (= Identifikation), was für die Auslastungsauswertung notwendig ist. Wichtige Parameter der Busse sind die Kapazität und die Anzahl der Passagiere. Diese Parameter hängen natürlich zusammen. Die Kapazität entspricht dem Parameter zugelassenes Fassungsvermögen (Vgl. Tabelle 7-2, zweite Spalte). Die Anzahl der Passagiere entspricht der Anzahl der Passagiere, die zum gegebenen Simulationszeitpunkt mit dem Bus reisen. Da die Passagiere natürlich zu- und aussteigen, verändert sich der Parameter Anzahl der Passagiere. Die SIMUL8 lässt nur so viele Passagiere zusteigen, wie noch Platz haben können. Die in

der Abbildung dargestellten weiteren Parameter beinhalten die Anzahl der im Bus reisenden Passagiere, angeordnet nach ihren Reisezielen.

7.4 Simulationsuntersuchungen

7.4.1 Verifizierung des Modells

Im Abschnitt 7.3 sind die Objekte und die Funktionslogik des für die Simulation des ausgewählten Netzsegmentes gefertigten SIMUL8 Modells detailliert dargestellt. Die Parameter der Objekte des Modells wurden aufgrund der Daten der Borsod Volán AG, dem Betreiber des betroffenen Netzsegmentes, bestimmt. Das bedeutet, dass das Modell der aktuellen Funktion des Netzsegmentes entspricht.

Als erster Schritt der Simulationsuntersuchungen soll man sich davon überzeugen, dass das fertige Modell mit der Praxis und den Messergebnissen des Verkehrsunternehmens in Übereinstimmung steht. Dazu müssen die Aufgaben und Eigenschaften des Netzsegmentes des Modells mit den realen Aufgaben und Eigenschaften des realen Netzsegmentes vergleichbar sein. Wenn das Modell in diesem Vergleich die Erwartungen erfüllt, so lässt sich mit Recht annehmen, dass die Erfahrungen, die aus den durchgeführten Simulationsuntersuchungen gewonnen werden können, ein genügend hohes Konfidenzniveau aufweisen, um sie in späteren Entscheidungen zur Optimierung des Netzes nutzen zu können.

Für die Gegenüberstellung von Modell und Realität sind grundsätzlich zwei Parameter zu untersuchen:

- die Anzahl der Passagiere, die zwischen den einzelnen Haltestellen verkehren,
- der Fahrplan der Fahrten der Relation zwischen den beiden Städten.

Da die Anzahl der Passagiere im Modell - wie es im Abschnitt 7.3.3 beschrieben ist - einen stochastischen Charakter hat, wurde ein Modell mit unveränderten Parametern 50-mal experimentell wiederholt, um die Ergebnisse den Ergebnissen der Fahrgastzählungen gegenüberstellen zu können. Wenn die Daten verglichen werden, müssen auch die Zeitpunkte der Fahrgastzählungen beachtet werden, weil die Fahrgastzählungen von Wochenenden, Arbeitstagen und Feiertagen natürlich unterschiedliche Ergebnisse haben. Außerdem haben auch die saisonbedingten Wirkungen der Jahreszeiten Einfluss auf die Anzahl der Passagiere. In der Simulation umfasst der untersuchte Zeitraum nur einen Tag. Deshalb ist es wegen der saisonbedingten Wirkungen notwendig, mehrere Modelle für die verschiedenen Jahreszeiten fertig zu stellen. Diese Untersu-

chungen könnten also durch entsprechende Einstellungen der Fahrgastzählparameter verrichtet werden, aber es ist nicht das Ziel dieser Arbeit Analysen dieses Typs zu machen, deshalb werden diese im Folgenden nicht detailliert.

Die Daten der Anlage 7-1-21 sind die Ergebnisse einer Simulation, die mit einer Taktzeit von 20 Minuten nach dem Fahrplan eines Arbeitstages abgelaufen ist, aber ohne Sammelpassagiere, um in der Tabelle 7-4 verglichen werden zu können.

Tabelle 7-4: Vergleich von Fahrgastzählungsdaten und Simulationsdaten

Haltestelle	einsteigende Fahrgäste laut Fahrgastzählung	einsteigende Fahrgäste laut Simulation	Differenz	aussteigende Fahrgäste laut Fahrgastzählung	aussteigende Fahrgäste laut Simulation	Differenz
Kazincbarcika, aut. áll.	4110	4089	0,51%	0	0	0,00%
K. barcika, Szt. Flórián tér	0	0	0,00%	1010	1012	-0,20%
Berente, Bányagépjavitó üzem	160	159	0,63%	231	230	0,43%
S. péter, parasznyi elág.	1266	1262	0,32%	907	863	5,10%
SAJÓBONYI ELÁGAZÁS	52	52	0,00%	205	217	-5,53%
Miskolc, Stromfeld laktanya	410	409	0,24%	0	0	0,00%
Miskolc aut. áll	0	0	0,00%	3645	3649	-0,11%
Insgesamt	5998	5971	0,45%	5998	5971	0,45%

Wie in der Tabelle 7-4 zu sehen ist, sind die aus der Simulation gewonnenen Daten und die Daten des realen Segments im Grunde genommen als gleich zu betrachten. Unterschiede ergeben sich aus der Durchschnittswertbildung von 50 Simulationsabläufen und durch Rundungsfehler bei der Berechnung der Ankunftszeiten gemäß Abschnitt 7.3.3.

Eine, der Anlage 7-1-21 ähnliche Tabelle kann natürlich auch mit Berücksichtigung der Anzahl der Sammelpassagiere erzeugt werden.

Nach Vergleich der Daten sind Ergebnisse ähnlich der Tabelle 7-4 herausgekommen. Diese werden im Weiteren nicht detailliert. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse kann der durch die Sammelfahrten an den Umsteigepunkten vom Abschnitt 7.3.2 generierte Fahrgastverkehr bestimmt werden.

Werden die in der Tabelle 7-5 grau markierten Daten mit den Fahrgastzählungsdaten der Sammlung (siehe Anlage 7-2) verglichen, kann festgestellt werden, dass die Daten der Simulation wirklichkeitstreu sind.

Tabelle 7-5: Sammelverkehr, berechnet aufgrund der Simulationsdurchschnitte

Haltestelle	einsteigende Fahrgäste ohne Sammel-fahrten	einsteigende Fahrgäste mit Sammel-fahrten	Sammelfahrt-verkehr	aussteigen-de Fahrgäste ohne Sammel-fahrten	einsteigende Fahrgäste mit Sammel-fahrten	Sammelfahrt-verkehr
Kazincbarcika, aut. áll.	4089	4089	0	0	0	0
K. barcika, Szt. Flórián tér	0	1528	1528	1012	2246	1234
Berente, Bányagépjavitó üzem	159	191	32	230	237	7
S. péter, parasznyi elág.	1262	2234	972	863	1215	352
SAJÓBONYI ELÁGAZÁS	52	52	0	217	217	0
Miskolc, Stromfeld laktanya	409	409	0	0	0	0
Miskolc aut. áll	0	0	0	3649	4588	939
Insgesamt	5971	8503	2532	5971	8503	2532

Nicht nur die Passagierverkehrsdaten, sondern auch die Zeitparameter können mit der Realität verglichen werden. Dazu müssen die Parameter des Modells in Übereinstimmung mit den Parametern vom Abschnitt 7.1.1 definiert werden:

- Umsteigezeit: Zeit, die die Sammelfahrgäste in einem Knoten des Netzes verbringen, bis sie mit einem nach Taktfahrplan verkehrenden Zubringer weiterfahren können
- Wartezeiten: sind als die Summe von Umsteigezeiten und von der zwischen den beiden Städten fahrenden Passagieren in den Haltestellen des Segments verbrachten Zeit definierbar.
 - Die minimale Wartezeit ist der kleinste Wert der Wartezeiten in der Simulation.
 - Die durchschnittliche Wartezeit ist der durchschnittliche Wert der Wartezeiten in den Relationen des Netzsegments.
 - Die maximale Wartezeit ist der größte Wert der Wartezeiten in der Simulation.
- Reisezeiten: sind als Summen von Wartezeiten und Fahrtzeiten zwischen den Haltestellen des Netzsegments definierbar.

Das Simulationsmodell registriert diese Zeitdaten kontinuierlich, dann speichert es die Untersuchungsergebnisse in Datenbanken. Nach dem Ablauf der Untersuchungen

können die Daten aus den Datenbanken analysiert werden, um das Erkennen der Wirkungen der Parameteränderungen auf das System zu ermöglichen.

In den Anlagen 7-1-21 und 7-1-22 sind in den entsprechenden Zeilen die Leistungsziffern, der durch die Taktzeit bestimmten täglichen Anzahl, der Fahrten zu finden. In diesem Fall sind es 55 Fahrten pro Tag. Diese Angabe kann mit dem Fahrplan der Borsod Volán AG (Anlage 7-1-23) verglichen werden. Die Anzahl der tatsächlichen Fahrten im simulierten Zeitraum verändert sich täglich zwischen 55 und 60 Fahrten.

Hinsichtlich der Zeitparameter der Prozesse des Modells stimmen die Fahrtzeiten zwischen den Haltestellen mit den Angaben in der Anlage 7-1-23 überein. Der Takt ist während des Ablaufs des Modells mit Hilfe der relativen Positionen der, sich fortbewegenden Fahrzeuge verfolgbar und auch die Unterschiede der tageszeitabhängigen Eigenschaften entsprechen den Praxisangaben. Die vorgestellten Kontrollen wurden durch Simulationsuntersuchungen mit verschiedenen Anfangsparametern durchgeführt. Diese Untersuchungen sind selbstverständlich zu jeder Zeit durch die Anwendung des Modells reproduzierbar. So kann geprüft und belegt werden, dass die durchschnittlichen Ergebnisse der Simulationsabläufe mit der Wirklichkeit übereinstimmen und so das aufgestellte Modell für die Untersuchung eines realen Verkehrsnetzsegments geeignet ist.

7.4.2 Problem des Anpassens der Sammelfahrten

Das Problem der Analyse und Modellierung des Verkehrsnetzes ist durch den Vergleich der Tabellen in den Anlagen 7-1-21 und 7-1-22 gut vermittelbar. Die oberen Hälften der Tabellen enthalten die Werte von Fahrgastzählungen. Sie wurden in den vorigen Abschnitten bereits vorgestellt. In diesem Abschnitt werden die unteren Hälften der Tabellen, die die Leistungskennziffer (KPI) enthalten, erläutert. Im Interesse einer besseren Vergleichbarkeit zeigt die Abbildung 7-1-24 nur die unteren Hälften der Tabellen. Die Tabelle 1 der Anlage 7-1-24 enthält die Daten des Passagierverkehrs ohne die Sammelpassagiere und die Tabelle 2 der Anlage 7-1-24 enthält die Parameter, die gemeinsam für die Sammelpassagiere und für die Passagiere zwischen den beiden Städten gültig sind.

Die ersten zwei Zeilen der Tabellen zeigen im Vergleich, dass die Taktzeiten und die Anzahl der Fahrten pro Tag gleich sind. Unterschiede bestehen hinsichtlich der Anzahl der Fahrgäste bzw. der, von der Anzahl der Passagiere abhängigen, minimalen Einnahmen (werden in 7.4.3 detailliert). Die Zeitindikatoren unterscheiden sich aber deutlich, trotz dessen, dass die minimale Reisezeit in beiden Fällen gleich ist. In beiden

Simulationsreihen waren Passagiere zu finden, die erst zum Zeitpunkt der Abfahrt einer Fahrt an die Haltestelle eingetroffen sind. Es gibt aber bedeutende Unterschiede zwischen den durchschnittlichen und maximalen Wartezeiten. Es ist zu sehen, dass ohne den Sammelverkehr diese Wartezeiten 12-76 Minuten betragen, aber mit dem Sammelverkehr sind sie wesentlich länger: Sie betragen zwischen 21 und 310 Minuten. Die Streuung der Werte wurde analysiert, die Ergebnisse sind in der Anlage 7-1-25 enthalten.

Durchschnittswerte im ersten Fall (ohne Sammelfahrten) sind:

- 99 % der Messwerte liegen zwischen 11,13 und 13,69 Minuten.

Der gleiche Bereich im zweiten Fall (Sammelfahrten inbegriffen) beträgt:

- 99 % der Messwerte liegen zwischen 12,39 und 27,45 Minuten.

Das bedeutet, dass die Passagiere wegen der falsch angepassten Sammelfahrten durchschnittlich 9 Minuten mehr auf die Zubringer warten müssen. Der maximale Wert der Wartezeit ist in dem ersten Fall 76 Minuten, aber in dem zweiten Fall kann er sogar 309 Minuten betragen.

Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass mit einer fehlerhaften Anpassung der Sammelfahrten die durchschnittliche Wartezeit um 9 Minuten länger werden, aber die maximale Wartezeit sogar um 233 Minuten höher werden kann!

Die Ursache für die Größe des Wertes der maximalen Wartezeit ist, dass das Modell bei der Auswahl der Ressourcen für die jeweilige Aufgabe das größte Fahrzeug aus der im gegebenen Zeitpunkt gegebenen Flotte auswählt (siehe: 7.3.3.) Da die Anzahl der Passagiere sich in verschiedenen Tageszeiten deutlich verändert, kann es nach einer verkehrsreicheren Periode vorkommen, dass die Fahrzeuge mit größerer Kapazität noch nicht zurückgekehrt sind, deshalb gibt es für die aktuelle Aufgabe nur Fahrzeuge mit kleinerer Kapazität. Das kann verursachen, dass die Passagiere, die in den Haltestellen warten, keinen Platz im Fahrzeug bekommen würden und für eine nächste Fahrt warten müssten. In der Praxis kommt dieses Problem kaum vor, da die Raumkapazität der Fahrzeuge sich viel flexibler behandeln lässt. Es ist zu betonen, dass der Maximalwert der Wartezeit nur einen sehr kleinen Anteil der Passagiere betrifft und es für die Behebung der Probleme mehrere Möglichkeiten gibt:

- Ein besserer Auswahlalgorithmus der Fahrzeuge. Das ist gleichzeitig auch eine Weiterentwicklungsmöglichkeit des aktuellen Simulationsmodells.

- Erhöhung der Anzahl der Fahrzeuge mit größerer Kapazität oder Verdoppelung der Fahrzeuge einer Fahrt (Aushilfefahrten). Diese Lösung stößt in der Praxis an finanzielle Grenzen.
- Wahl einer Taktzeit für die Simulationsuntersuchungen, die sich aus der Zielfunktion der Minimierung der maximalen Wartezeiten ergibt.

7.4.3 Wirkung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte auf die maximalen Reise- und Wartezeiten

Das Problem der Anpassung der Sammelfahrten wurde im vorigen Abschnitt ausführlich dargestellt. Das Simulationsmodell ermöglicht die Konfigurierung der Fahrzeugflotte entsprechend Abschnitt 7.3.3. Eine der Lösungsmöglichkeiten des oben genannten Problems ist die Erhöhung der Anzahl der Fahrzeuge mit größerer Kapazität. Das kann nur eine Lösung der Probleme sein, falls vor der Einführung des neuen Taktfahrplans die Möglichkeit besteht, die Zusammensetzung einer zum Fahrplan zugeordneten Fahrzeugflotte zu modifizieren.

Anlage 7-1-26 zeigt das Diagramm der Auslastung der Fahrzeuge aufgrund der Simulationsuntersuchungen (Sammelfahrten inbegriffen). Es ist zu sehen, dass das als erstes ausgewählte Fahrzeug die größte Kapazität hat. Wenn alle Fahrzeuge mit der gleichen Größe ausgewählt worden sind, wählt die Software das nächst Größere usw. Werden die Fahrzeuge der Flotte auf diese Weise ausgewählt, so ergibt sich eine maximale Wartezeit von ca. 309 Minuten. Wird die Anzahl der größten Fahrzeuge in der Flotte drastisch erhöht, ist das Ergebnis entsprechend der Anlage 7-1-27.

Es ist zu sehen, dass in diesem Fall für alle Aufgaben nur die größten Fahrzeuge ausgewählt worden sind. In diesem Fall sind die Angaben der maximalen Wartezeiten in der Tabelle zusammengefasst: (Anlage 7-1-28)

Aus der Tabelle kann man feststellen, dass die maximale Wartezeit sich von 309 auf 212 Minuten vermindert hat. Es ist auch zu sehen, dass diese Modifikation eine günstige Wirkung auf die durchschnittlichen Wartezeiten und dadurch auch auf die Reisezeiten ausübt. Im Ergebnis wird die Wartezeit erfolgreich verringert, aber die Modifikation hat zugleich eine Auswirkung auf die Betriebskosten der Fahrzeuge (siehe Anlage 7-1-26 und Anlage 7-1-27 oben rechts) und auf die daraus resultierenden Gesamtbetriebskosten (siehe Tabelle 7-2). Die täglichen Betriebskosten betragen im ersten Fall 1,7 Millionen Forint. In diesem Fall sind sie auf 2,4 Millionen Ft. gestiegen. Für die Sammelfahrpläne stellt der Kostenfaktor eine Grenze für die Verkürzung der Wartezeiten dar. Hinsichtlich der Betriebskosten ist eine steigende Empfindlichkeit unter den Verkehrsunternehmen des öffentlichen Personenverkehrs zu spüren, da sehr viele

Fahrten nur mit Verlusten betrieben werden können. Aus den ausgewiesenen Betriebskosten der untersuchten Fahrten wäre es möglich, Schlussfolgerungen für die notwendigen kostenproportionalen Fahrpreise zu machen. Aus den Anlagen 7-1-24 und 7-1-27 (vorletzte Zeile) ist ableitbar, dass die realisierte Verminderung der Wartezeit einen Anstieg der Fahrpreise zur Folge hätte.

Eine derartige Erhöhung der Gebühren (um 70 %) ist aus politischen, gesellschaftlichen und verkehrspolitischen Gründen, hauptsächlich in Ländern, wo die Bevölkerung in größerem Maße auf den öffentlichen Personenverkehr angewiesen ist, unmöglich. Deshalb müssen in der Praxis die Wartezeiten auf einem annehmbaren Niveau gehalten werden. In den nächsten Abschnitten werden die Möglichkeiten für die Verminderung der Reisezeiten und Wartezeiten durch Modifizierung der Taktzeit detailliert.

7.4.4 Bestimmung der minimalen Taktzeit für ein vorgegebenes Kostenniveau bei Minimierung der Wartezeiten

Eine mögliche Lösung der Aufgabe ist die Bestimmung einer Taktzeit, die sich besser an den Fahrplan der Sammelfahrten anpasst, was eine günstige Wirkung auf die Wartezeiten und dadurch auf die Reisezeiten hat. Wie es in den vorhergehenden Abschnitten zu sehen war, hat die Veränderung der einzelnen Parameter nicht immer die gleiche Wirkung auf die Zeitparameter. Im vorigen Abschnitt wurde die Menge der Ressourcen angehoben, was die durchschnittliche Reisezeit um 7%, aber die maximale Reisezeit um 21% vermindert hat. Der Grund dafür ist, dass die Durchschnitte für einen großen Anteil der Passagiere gelten, während das Maximum nur einen kleinen Prozentanteil der Passagiere betrifft. Werden die Zeitparameter im Eingangsmodell verändert, beeinflussen die Veränderungen die letzten Parameter stärker. Wenn also die Verminderungsmöglichkeiten der Reisezeiten und Wartezeiten untersucht werden, ist es zielführend, die Wirkungen der Parameteränderungen sowohl auf die Durchschnittszeiten wie auch auf die Maximalzeiten zu interpretieren.

Zusammenhänge von Taktzeit und Wartezeit

Im Folgenden wird detailliert, welche Wirkung die Taktzeit, als einer der wichtigsten Parameter sowie ihre Veränderung auf die Funktion des Modells ausübt. Die Taktzeit ist der Zeitraum zwischen den Abfahrten zweier Fahrten und als solcher hat sie grundsätzlich Wirkung auf die Wartezeiten der Passagiere an den Haltestellen. Kennen die Passagiere den Takt, dann können sie die Wartezeiten selbst verringern, wenn sie erst kurz vor der Abfahrt an der Haltestelle eintreffen. Das gilt natürlich nur für Passagiere, die die Taktfahrten direkt in Anspruch nehmen können.

Die Sammelpassagiere, die diese Fahrten nur durch Umsteigen in Anspruch nehmen, können ihr Eintreffen in den gegebenen Haltestellen nicht auf diese Weise beeinflussen. Die Sammelfahrten haben nicht nur die Aufgabe als Zubringer zu funktionieren, deshalb können ihre Fahrpläne nicht nur der Minimierung der Wartezeiten untergeordnet werden. Die Ansprüche auf möglichst geringe Wartezeiten für alle Passagiere, d.h. das gesamte Reisepublikum, kann ein Verkehrsunternehmen möglichst gut befriedigen, wenn es die Taktzeiten übereinstimmend mit den Zielen dieser Arbeit bestimmt.

Wirkung der Taktzeit auf die Betriebskosten

Da die Taktzeit auch die Anzahl der Fahrten in der gegebenen Relation bestimmt, hat sie natürlich Auswirkungen auf die Betriebskosten im entsprechenden Zeitraum.

Die Anlage 7-1-29 zeigt die Wirkungen der zwei Grenzwerte auf die Kennwerte des Systems während der Untersuchungen. Die Grenzwerte wurden so bestimmt, dass die Wartezeiten sich nicht vergrößern und zugleich aber die Kosten des täglichen Betriebs 3 Millionen Ft. nicht überschreiten dürfen. Das Fahrbedürfnis ist in den Untersuchungen unabhängig von der Anzahl der Fahrten. Deshalb sind die Fahrgastzahlen in der Tabelle die Ergebnisse der im Abschnitt 7.4.1 detaillierten Durchschnittsberechnung. Das heißt, dass die Anzahl der Fahrgäste in dem untersuchten Zeitraum, abgesehen von stochastischen Wirkungen, gleich ist. In diesen zwei Fällen sind die Anzahl der täglichen Fahrten und so auch die Betriebskosten sehr unterschiedlich.

Wenn die Fahrzeugeinsatzplanung mit kleineren Taktzeiten gemacht wird, ist die erreichbare durchschnittliche Wartezeit etwa 30 % kleiner, dagegen steigen aber die Kosten auf 167 %. Ein ähnlicher Vergleich wurde im Abschnitt 7.4.3 dargestellt, wo die Wirkungen der Modifizierung der Flotte auf die Reisezeiten und Betriebskosten untersucht wurden. Wenn die Ergebnisse verglichen werden, kann man sehen, dass durch die Verkleinerung der Taktzeit die Wartezeit wirkungsvoller zu minimieren ist als durch eine Veränderung der Flotte. Dieser Fakt ist eine der wichtigsten Aussagen dieser Simulation.

Wenn die Hauptpriorität der Optimierung die kostengünstige Verringerung der Wartezeit ist, dann ist von den Möglichkeiten, die im Abschnitt 7.4.2 dargestellt wurden, am besten eine adäquate Taktzeit zu wählen.

Ergebnisse der Optimierung entsprechend der definierten Zielfunktion

Die Simulationsergebnisse der Simulationsuntersuchungen (Vgl. dazu Abschnitt 7.4.4) zeigen, dass die Veränderungen der Eingangsparameter die maximalen und durch-

schnittlichen Wartezeiten in unterschiedlicher Stärke verändern. Dieser Fakt wird auch von den Untersuchungsergebnissen der Anlage 7-1-29 bestätigt. Die Bestimmung der Taktzeit in einem Intervall zwischen 11 und 20 Minuten hat Auswirkungen auf die durchschnittlichen und auf die maximalen Wartezeiten.

Für diese Untersuchung wurde das *OptQuest Modul* von SIMUL8 benutzt. Die Arbeitsweise des Moduls ist so, dass der Eingangsparameter (in diesem Fall die Taktzeit) zwischen den im Fenster „*Decision Variable Selection*“ eingestellten Grenzwerten solange verändert wird, bis der Wert der, im Fenster „*Forecast Selection*“ definierten, als Zielfunktion dienenden Systemeigenschaft ihren minimalen Wert erreicht. In unserem Fall sind diese Systemeigenschaften die durchschnittliche und die maximale Wartezeit. Die Anlage 7-1-30 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungsreihe für die durchschnittliche Wartezeit. Der Wert der Wartezeit wird minimal, wenn die Taktzeit den Mindestwert der Grenzwerte von 11 Minuten erreicht. Das ist kein überraschendes Ergebnis, deshalb soll die Aufmerksamkeit auf die Ergebnisse der Empfindlichkeitsprüfung im Fenster „*Sensitivity Analysis*“ gelenkt werden.

Hierbei ist zu sehen, dass die Streuung der Taktzeitwerte (2,87) viel kleiner als die Streuung der Durchschnittszeitwerte (12,56) ist. Das bedeutet wiederum, dass eine kleine Veränderung der Taktzeit eine viel größere Veränderung der Durchschnittswerte der Wartezeiten verursacht. Hinsichtlich der Betriebskosten lohnt es sich, mit Hilfe der Untersuchungen eine Situation zu finden, bei der die durchschnittlichen Wartezeiten zwar ihren Minimalwert nicht erreichen, aber in der Nähe des Minimums einen günstigen Wert mit kleineren Betriebskosten aufweist.

Die Minimalwerte der Wartezeiten werden also von kurzperiodischen Taktzeiten bestimmt. Als ein anderes, wichtiges Qualitätsmerkmal eines ÖPV-Systems sind die maximalen Wartezeiten zu erwähnen. Wie die Fahrzeugeinsatzplanung für eine Optimierung dieses Merkmals geschehen sollte, kann aus den Ergebnissen der Untersuchungsreihe aus der Anlage 7-1-31 abgeleitet werden.

Die Anlage 7-1-31 zeigt die Ergebnisse einer Untersuchungsreihe, bei der die Eingangsparameter mit denen der vorherigen Untersuchungsreihe identisch sind, aber die Aufgabe auf die Minimierung der maximalen Wartezeit zurückgeführt wurde.

Dementsprechend nimmt die Zielfunktion ihren Mindestwert bei einer Taktzeit von 18 Minuten ein. Bei diesem Kriterium sind die Betriebskosten wesentlich günstiger. Deshalb ist es Ziel führend, die Tabelle für eine Taktzeit von 11 Minuten mit einer Tabelle für eine Taktzeit von 18 Minuten im Detail zu vergleichen. Aufgrund des Vergleichs sind die Grundlagen für die kostengünstige Taktzeitbestimmung zu konzipieren.

Die Tabellen in der Anlage 7-1-32 zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen. Als Zusammenfassung der Ergebnisse können wir feststellen, dass die Anwendung einer Taktzeit von 11 Minuten einen Verkehr mit täglich 99 Fahrten und Betriebskosten in der Höhe von 2,87 Millionen Ft. generiert, wobei die Passagiere durchschnittlich 6,39 Minuten in den Haltestellen warten müssen. Eine Taktzeit von 18 Minuten erzeugt täglich 61 Fahrten, die dem Verkehrsunternehmen 1,89 Millionen Ft. kosten, mit einer durchschnittlichen Wartezeit der Fahrgäste von 7,7 Minuten an den Haltestellen. Der Unterschied zwischen den beiden geprüften Alternativen ist durchschnittlich 1,3 Minuten hinsichtlich der Wartezeit bzw. 1 Millionen Ft. hinsichtlich der Betriebskosten. Das würde eine durchschnittliche kostenproportionale Tarifierhöhung von etwa 115 Ft. begründen!

Wenn die Bestellorganisation der ÖPV- Dienstleistungen bereit wäre, die entstehende Erhöhung der Betriebskosten zu kompensieren, so würde die Einführung einer Taktzeit von 11 Minuten zur Verbesserung der Qualität im ÖPV beitragen. Wenn die Betriebswirtschaftlichkeit als Priorität behandelt wird, entscheidet ein öffentliches Verkehrsunternehmen nach dem Vergleich der Tabellen entsprechend den Anlagen 7-1-32 und 7-1-29 sich für die Einführung einer Taktzeit von 18 Minuten.

Im Vergleich zur heutigen Situation entstehen zwar ca.173.000 Ft. mehr Betriebskosten, aber die durchschnittliche Wartezeit wird deutlich von 21,3 Minuten auf 7,7 Minuten gesenkt. Durch dieses verbesserte Qualitätsmerkmal wächst die Attraktivität des ÖPV und durch die potentiell steigende Nachfrage kann mit einem Anwachsen der Fahrgästeszahl und einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit gerechnet werden.

7.5 Schlussfolgerungen für das Simulationsmodell

Diese Simulation war für eine Untersuchung eines öffentlichen Verkehrsnetzes geeignet, da die stochastischen Parameter und Eigenschaften des Netzes mit dieser Simulationsmethode gut behandelbar sind. Mit Hilfe dieser Simulationsmethode können die Zusammenhänge der Funktionen des Verkehrsnetzes auch in solchen Situationen analysiert werden, in welchen die Analysen in der Praxis nur mit sehr großem finanziellem Aufwand durchgeführt werden könnten. Wird diese Methode für die Untersuchungen verwendet, können Funktionsmechanismen des Netzes erkannt werden, die von den Änderungen von sogar schwach miteinander in Korrelation stehenden Parametern verursacht werden.

Um die Ziele der Simulation zu erreichen, wurde das Simulationsmodell des ausgewählten Verkehrsnetzsegmentes aufgestellt, die Objekte des Netzes definiert, die be-

stimmenden Parameter der Objekte und die charakteristischen Eigenschaften des Netzes beschrieben. Aufgrund der aus der Praxis stammenden Angaben wurde die Richtigkeit der Funktion des Modells verifiziert. Mit Hilfe des aufgebauten Modells wurden Untersuchungen durchgeführt, die die im Ereignisraum des Modells abgelaufenen Prozesse mit vorgegebenen Zielfunktionen verglichen haben, um die geeigneten Eingangsparameter richtig auswählen zu können. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Wirkungen der Netzparameter (Typen: Menge, Zeit, Kosten) analysiert und aus den Wirkungen die Konsequenzen gezogen.

Es wurde eine Methode für die Minimierung der durchschnittlichen und der maximalen Wartezeiten in einem Verkehrsnetz ausgearbeitet. Diese Methode beinhaltet die Analyse der Betriebskosten des Netzes. Damit ist sie für die Suche und das Auffinden von kostengünstigen Betriebsbedingungen geeignet. Mit Hilfe der ausgearbeiteten Methode wurde ein entsprechend abgegrenztes Segment eines öffentlichen Straßenverkehrsnetzes analysiert. Aufgrund der Analyse wurden die Problemquellen des Netzes bestimmt. Als Ergebnis der Simulationsuntersuchungen wurden Vorschläge für die Eliminierung dieser Problemquellen und für die Verbesserung der mit diesen Problemquellen im Zusammenhang stehenden Netzparameter ausgearbeitet. Die Vorschläge wurden nach ihrer Wirtschaftlichkeit beurteilt und eine kostengünstige Möglichkeit für die Verbesserung der Zielgrößen gezeigt. Alle Parameter, Untersuchungen und Ergebnisse in dieser Simulation können jederzeit reproduziert werden und können wegen der parametrischen Beschreibung auch für die Untersuchung anderer ähnlichen Netze angewendet werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das im Rahmen dieser Arbeit ausgearbeitete mathematische Modell hat sich zur Analyse und Optimierung von Straßenverkehrssystemen als geeignet erwiesen. Die mathematisch-logistischen Parameter und Funktionen wurden in einem konkreten Simulationsbeispiel für die Lösung einer Optimierungsaufgabe verwendet. Die Ergebnisse der Simulation bestätigen die Richtigkeit des mathematischen Modells, belegen die praktische Anwendbarkeit des Modells und zeigen die Effektivität dieser neuartigen Methode.

Im öffentlichen Verkehr unternimmt man seit langer Zeit Anstrengungen, eine bessere Vernetzung innerhalb der Verkehrssysteme zu erzielen, in erster Linie durch eine genauere Fahrplanabstimmung innerhalb des Netzes, um so die Warte- und Umsteigezeiten zu verkürzen. Zusätzlich setzt man moderne Telematiksysteme ein, die auch auf aktuelle Verspätungen reagieren und den Anschluss im eigenen System sicherstellen können.

Die Optimierung darf sich aber nicht nur auf die jeweils eigenen Systeme der Anbieter beschränken, sondern auch bessere Verknüpfungen mit anderen Verkehrsträgern sollen erreicht werden. [IFMO02]

Die staatlichen Institutionen, Komitee und Kommunen, zeigen ein immer größeres Interesse an mehr und effizienterer Vernetzung, wofür aber eine kundenfreundliche Gestaltung der Übergänge eine wesentliche Voraussetzung darstellt.

Politiker und Fachpolitiker fördern die Vernetzung, um den Verkehr in Ballungsräumen zu verbessern. [IFMO02]

Die herkömmlichen speziellen Modelle (wie z.B. VISSIM, VISUM) sind nicht dafür geeignet, Aufgaben dieser Komplexität zu behandeln. Reine Verkehrssimulationen bringen politische Spannungsfelder zu z.B. der Höhe der Mobilitätskosten nicht zum Vorschein und beantworten auch nicht die kontroverse Frage nach dem optimalen Verkehrsträger.

Die systematische, interdisziplinäre Aufbereitung und Bewertung von Daten und Fakten in diesem verkehrslogistischen Modell ermöglicht eine Ausarbeitung von komplex beurteilbaren Varianten für Prognosen und Expertenurteilen. Die für die Optimierung des Verkehrsnetzes ausgewählten Zielfunktionen können in einem regelmäßigen Dialog mit den für den Verkehr verantwortlichen Entscheidungsträgern aus Politik, Wirtschaft und Verbänden diskutiert werden.

Auf Basis der logistischen Betrachtungsweise wird es möglich, den Entscheidungsträgern transparent zu machen, wie verkehrspolitische Entscheidungen für die Verbesserung der Eigenschaften des Verkehrsnetzes mit anderen Faktoren, wie z.B.: Mobilitäts- und Investitionskosten zusammenhängen, welche eventuelle Kompromisse gemacht werden müssen.

Mit Hilfe dieser Simulation lässt sich die Qualität der Entscheidungen im Voraus besser abschätzen, kontraproduktive Entscheidungen lassen sich verhindern und Ressourcen zur Verbesserung der Verkehrssituation des untersuchten Verkehrsraums (z.B.: Komitat in Ungarn) können effektiver eingesetzt werden. Die Modellierung der sogenannten „Was wäre wenn“- Situationen zeigt die Wechselwirkung verkehrstechnischer und verkehrsökonomischer Faktoren.

Ein wichtiger Grundgedanke in der logistischen Betrachtung ist, dass die Optimierung des logistischen Netzwerkes auf keinen Fall identisch mit der Optimierung der Ressourcen der einzelnen logistischen Dienstleister im gegebenen Raum ist, sondern vielmehr die systemorientierte Auswahl der notwendigen Ressourcen für die optimale Funktion des Netzwerkes betroffen ist. Daraus folgt auch die mögliche Weiterentwicklung des Modells, indem alle Objekte des öffentlichen Verkehrs abgebildet werden und so das Modell zur Ausbildung von ko-modalen und intermodalen Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Verkehrsträgern und -dienstleistern beiträgt. In dieser Auffassung ist nicht der Fakt an sich relevant, dass Züge die Personenverkehrsfahrzeuge der Eisenbahn sind, sondern, dass diese Fahrzeuge auf einem gegebenen Teil eines logistischen Verkehrsnetzes mit gegebener Kapazität, Betriebsgeschwindigkeit und spezifischen Betriebskosten fahren können. Die optimale Arbeitsteilung wird also durch die geeigneten Zielfunktionen und nicht durch partielle Interessen bestimmt.

Infolge der rapiden Entwicklung der verkehrstelematischen Systeme kann die Herstellung der notwendigen Daten unmittelbar aus den realen Prozessen „real time“ erfolgen. So können „real time“ Optimierungen in vorab definierten Verkehrsnetzen und optimierte Eingriffe in den logistischen Prozessen durchgeführt werden.

Eine wissenschaftliche Zusammenarbeit der UOtto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Universität Miskolc kann durch die Nutzung der Forschungsergebnisse des Galileo Testfeldes Sachsen-Anhalt zur Weiterentwicklung des Modells wesentlich beitragen und die logistischen Anwendungsgebiete des europäischen Navigationssystems in öffentlichen Verkehrsnetzen fördern.

Da die Bearbeitung und Lösung der Probleme und Aufgaben in der Logistik in der Praxis durch „eine ständig wechselnde Konstellation der Bedingungen bei hoher Komplexität und oft enormen Zeitdruck“ gekennzeichnet ist, wächst die Bedeutung der Richtigkeit der getroffenen Entscheidungen in Logistiknetzwerken. Um die Entscheidungsqua-

lität in den komplexen Entscheidungsprozessen wesentlich zu erhöhen und den Logistikern eine entsprechende Arbeitsumgebung zur Verfügung stellen zu können, wurde in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Logistik-Lehrstühle der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, der Universität Miskolc und der Universität „Marta Abreu“ in Santa Clara von drei Autoren das Konzept einer internetbasierten, multilingualen Methodenbank ausgearbeitet. Eine weitere Nutzung der Datenbank auf dem Gebiet der Verkehrslogistik wird möglich, indem die Methoden der Analyse und Optimierung von öffentlichen Verkehrsnetzen in die Methodenbank eingetragen werden. Durch die Nutzung des ausgearbeiteten Methodenwissens können weitere Softwarewerkzeuge für eine Anwendung im öffentlichen Verkehrsbereich entwickelt werden. Dies kann auch eine weitere Möglichkeiten für die Logistikausbildung von Verkehrsexperten bedeuten, aber auch gemeinsame Forschungsprojekte zwischen deutschen und ungarischen Verkehrs- und Logistikunternehmen, sowie Universitäten im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit. Die gemeinsame, methodische Konzeption fördert auch die Einführung und Anwendung gemeinsamer Normen und Technologien bei der Lösung von logistischen Problemen in der Praxis. Weiterhin kann der Wortschatz der multilingualen Methodenbank mit den Ausdrücken und Fachwörtern der Verkehrslogistik und des öffentlichen Verkehrs ergänzt werden.

In der Weiterentwicklung des öffentlichen Verkehrs in Ungarn bekommen die Aspekte der Kosteneffektivität, die Aufhebung der Parallelitäten der öffentlichen Verkehrsdienstleistungen und eine bessere Kooperation und Integration zwischen den öffentlichen Dienstleistern die Hauptrolle. Die deutschen, wissenschaftlichen Einrichtungen und Forschungsinstitutionen verfügen über eine bedeutende Wissensbasis der Regionalisierung und Integration von öffentlichen Verkehrsdienstleistungen, der Harmonisierung von Erwartungen und Lösungsmöglichkeiten unter Einbeziehung aller wesentlichen Teilnehmer, wie z. B. Verkehrsverbände. Mit Hilfe dieser Kenntnisse kann das allgemeine mathematische Modell und die daraus abgeleitete Simulationsumgebung eines öffentlichen Verkehrsnetzes methodisch so weiterentwickelt werden, dass die entstehenden logistischen Methoden wesentlich zur Lösung der Probleme der strukturellen Veränderungen des ungarischen, öffentlichen Verkehrs in den nächsten Jahren beitragen werden.

Literaturverzeichnis

- [Ada92] ADAMSKI, A.: Probabilistic Models of Passengers Service Processes at bus stop. *Transpn. Res. - B*, 26B (1992), 4 pp. 253 – 259
- [AgBSVI99] FRANKE, K.; RIEGELHUTH, G.; SCHULT, R., STUMPP, K.; WEBER, M.: *Telematik – Trends und Chancen*, Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e. V., Hamburg, 1999.
- [AgIVP02] Arbeitsgruppe „Integrierte Verkehrspolitik“: *Integrierte Verkehrspolitik – Herausforderung, Verantwortung und Handlungsfelder*; Redaktion: SCI Verkehr GmbH, Berlin, 2002.
- [Ahu83] AHUJA, R.; MAGNANTI, T.; ORLIN, J. (1983): *Network Flows: theory, Algorithms and Applications*. A Series of books in the mathematical sciences. Prentice Hall, New Jersey.
- [Asm08] ÁSMUNDSDÓTTÍR, R.: *Dynamic OD matrix estimation using floating car data*, 2008, Delft University of Technology
- [Ass80] ASSAD, A. A.: *Models for Rail Transportation*, *Transportation Research (Part A)* 14. p. 205-220. 1980.
- [Bae99] BAECKER, D.: *Organisation als System*, Frankfurt a. M.: Suhrkamp, 1999
- [Bar09] BARFUS, K.: *Entwicklung eines Vorgehensmodells zur modellgestützten strategischen Planung des logistischen Netzes einer verteilten Produktion*, Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2009.
- [Bau92] BAUMGARTEN, H.: *Trends in der Logistik in den 90er Jahren – Basis für Unternehmensstrategien*, Kurzfassung einer Veröffentlichung, 1992
- [Bel83] BELL, M.G.H.: *The estimation of an origin destination matrix from traffic counts*. *Transportation Science*. 1983. 17 (2), 198-217
- [BeZs10] BERKI, Z.: *Korszerű tervezési módszertanok*, Konferenzvortrag, 2010, Aggtelek, Ungarn
- [Blei05] BLEISCH, A.: *Die Erreichbarkeit von Regionen, Ein Benchmarking-Modell*, Dissertation, Universität Basel.
- [Bor02] BORNDÖRFER, R., LÖBEL, A. und WEIDER, S.: *Integrierte Umlauf- und Dienstplanung im Nahverkehr*, Technical Report, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin, 2002.
- [Bor04] BORNDÖRFER, R., GRÖTSCHEL, M., and PFETSCH, M. (2004). *Models for line planning in public transport*. Technical Report, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin.

-
- [Bor08] BORNDÖRFER, R.; LIEBCHEN, C. (2008): When Periodic Timetables are suboptimal. In S. Nickel (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2007, Springer, Heidelberg. Zugleich ZIB-Report 07-29, Berlin.
- [Bre89] BRENNINGER-GOETHE, M., JORNSTEN, K., LUNDGREN, J.: Estimation of origin-destination matrices from traffic counts using multiobjective programming formulations. *Transportation Research*, 1989, 23 B (4), 257-269.
- [Brt08] BRETZKE, W.: *Logistische Netzwerke*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Buch98] BUCHHOLZ, J.; CLAUSEN, U.; VASTAG, A.: *Handbuch der Verkehrslogistik*, 1998. Technology and Engineering.
- [Bus97] BUSSIECK, M. R.; ZIMMERMANN, U. (1997). Schlussbericht: Optimale Linienführung und Routenplanung in Verkehrssystemen. Technical Report, Technische Universität Braunschweig.
- [Bus98] BUSSIECK, M. R.: *Optimal Lines in Public Rail Transport*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1998.
- [BVL08] Trends und Strategien in der Logistik 2008 – Aktuelle Bestandaufnahme der Logistik und Zukunftsperspektiven 2015, Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., www.bvl.de.
- [Car95] CARRARESI, P., GIRARDI, L., and NONATO, M. (1995). Network models, lagrangean relaxation and subgradient bundle approach in crew scheduling problems. In Daduna, J., Branco, I., ao, P., and Pinto, J., editors, *Computer-aided Transit Scheduling*, pages 188–212. Springer, Berlin.
- [Cla98] CLAESSENS, M., VAN DIJK, N. und ZWANEVELD, P. (1998). Cost optimal allocation of rail passenger lines. *European Journal of Operational Research* 110(3). S. 474-489.
- [Dad97] DADUNA, J. and VÖLKER, M. (1997). Fahrzeugumlaufbildung im ÖPNV mit unscharfen Abfahrtszeiten. *Der Nahverkehr*, 11:39–43.
- [Dal90] DALY, A. J., ORTÚZAR, J. de D. : Forecasting and data aggregation: theory and practice. *Traffic Engineering and Control*, 1990, 31. (12) 632-643.
- [Dau85] DAUSCHA, W., MODROW, H.D. und NEUMANN, A. (1985). On Cyclic Sequence Types for Constructing Cyclic Schedules. *Zeitschrift für Operations Research* 29, S. 1-30.
- [Dör89] DÖRNER, D.: *Die Logik des Misslingens*, Rowohlt-Taschenbuch. S. 20, 1989.
-

- [Dud07] Duden - Deutsches Universalwörterbuch, 6., überarbeitete Auflage. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: Dudenverlag 2007. © Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim.
- [ERTR09] ERTRAC-Hungary: Jövőkép 2030, (in ungarischer Sprache), 2009
- [EU-REK99] EUREK Europäisches Raumentwicklungskonzept - Auf dem Wege zu einer räumlich ausgewogenen und nachhaltigen Entwicklung der EU, Angenommen beim Informellen Rat der für Raumordnung zuständigen Minister in Potsdam, Mai 1999.
- [EU-WB01] KOM(2001) 370 Weißbuch der Europäischen Kommission vom 12. September 2001: „Die Europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft“.
- [EU-WB06] KOM(2006) 314, MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DEN RAT UND AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT: Für ein mobiles Europa – Nachhaltige Mobilität für unseren Kontinent Halbzeitbilanz zum Verkehrsweißbuch der Europäischen Kommission von 2001., {SEC(2006) 768}.
- [Fah81] FAHRMEIR, L.; KAUFMANN, H. ; OST, F. : Stochastische Prozesse. Carl Hanser Verlag, München Wien 1981, S. 91–92.
- [Fis99] FISCHETTI, M., LODI, A., and TOTH, P. (1999). A branch-and-cut algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem. Technical Report, DEIS - Università di Bologna.
- [Fle03] FLEISCHER, Tamás: Hálózatok, hálózati szintek és a hálózat által kiszolgált szintek megkülönböztetése – módszertani áttekintés egy új elemzési szempont érvényre juttatásához.
- [Fre97] Freling, R. (1997). Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam.
- [Gen03] GENC, Z.: Ein neuer Ansatz zur Fahrplanoptimierung im ÖPNV: Maximierung von zeitlichen Sicherheitsabständen. Diss., Köln, 2003.
- [Gesch90] GESCHKA, H., HAMMER, R. Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung, in: Hahn, D./Taylor, B. (Hrsg.): Strategische Unternehmensplanung, Strategische Unternehmensführung, Stand und Entwicklungstendenzen, 5., 1990.
- [Gig99] GIGERENZER, G.: Simple Heuristics that make us smart, New York, 1999.

-
- [Gli04] GLISTAU, E.; COELLO MACHADO, N. I. ; ILLÉS, B.: Konzept und Nutzung der multilingualen Methodenbank MLOG für die Logistikausbildung, MicroCAD Konferenz 16-17. 03. 2006. Miskolc, ISBN 963-661-700-7Ö Seite 39-47.
- [Gred92] GREDLER, M.: Designing and evaluating games and simulations. A process Approach, London, 1992. p. 14.
- [Grö97] GRÖTSCHHEL, M., LÖBEL, A. und VÖLKER, M. (1997). Optimierung des Fahrzeugumlaufs im öffentlichen Nahverkehr. In Hoffmann, K.H. et al. (Hrsg.), *Mathematik – Schlüsseltechnologie für die Zukunft*. Springer, Heidelberg.
- [Hag00] HAGEMEIER, C.: Branch & Price Verfahren für das Duty Scheduling Problem, Technical Report, Universität zu Köln, Diplomarbeit.
- [Hop82] HOPFIELD, J. J.: Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 79 no. 8 pp.
- [HU-EV08] Einheitliche Verkehrsentwicklungsstrategie der Republik Ungarn für die Jahre 2008-2020, Ministerium für Wirtschaft und Verkehr, Budapest, 2008.
- [HU-GB08] Das Grüne Buch der einheitlichen Verkehrsentwicklungsstrategie der Republik Ungarn für die Jahre 2008-2020, Ministerium für Wirtschaft und Verkehr, Budapest, 2008.
- [HU-WB08] Das Weißbuch der einheitlichen Verkehrsentwicklungsstrategie der Republik Ungarn für die Jahre 2008-2020, Ministerium für Wirtschaft und Verkehr, Budapest, 2008.
- [IFMO02] Zukunft der Mobilität, Szenarien für das Jahr 2020, Szenarioprojekt in der Betreuung des Instituts für Mobilitätsforschung (IFMO); Berlin, 2002.
- [IFMO05] Zukunft der Mobilität, Szenarien für das Jahr 2025, Szenarioprojekt in der Betreuung des Instituts für Mobilitätsforschung (IFMO); Berlin, 2005.
- [IFMO06] Entwicklungspfade ausgewählter Innovationen aus „Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2025“, Innovations-Roadmaps, Berlin, 2006.
- [IIGI07] ILLÉS, B.; GLISTAU, E.; COELLO MACHADO, N. I.: *Logistik und Qualitätsmanagement*, Miskolc, 2007.
- [Kli05] KLIEWER, N.: Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr, Dissertation, Universität Paderborn, 2005.
- [Kir,Rud97] KIRCHHEIM, A., RUDNICKI, A.: Die Darstellung des Fahrgästekflusses im Nahverkehr als ein stochastischer Prozess.
-

-
- [Kol,Fun] KOLONKO, M., ENGELHARDT-FUNKE, O.: Mathematische Optimierung in der Praxis, 2002, Institut für Mathematik, Clausthal.
- [Lie02] LIEBCHEN, C.; PEETERS, L. (2002). Some practical aspects of periodic timetabling. In Chamoni, P. et al. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2001, Springer, Heidelberg.
- [Lie06] LIEBCHEN, C.: (2006). Periodic Timetable Optimization in Public Transport. dissertation.de – Verlag im Internet, Berlin.
- [Lie07] LIEBCHEN, C.: Fahrplanoptimierung bei der Berliner U-Bahn
- [Lie08] LIEBCHEN, C.: Linien-, Fahrplan-, Umlauf- und Dienstplanoptimierung: Wie weit können diese bereits integriert werden? Technische Universität Berlin, Institut für Mathematik.
- [Löb96] LÖBEL, A.; STRUBBE, U. (1996). Wagenumlaufoptimierung - Methodischer Ansatz und praktische Anwendung. In Heureka '96: Optimierung in Verkehr und Transport, 341–355. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- [Mak00] MAKULA, L.; TAKÁCS, M.: Az EMME/2 közlekedési hálózattervező programcsomag egy gyakorlati alkalmazása.
- [Mel02] MELLOULI, T. ; KLIEWER, N. (2002). Umlaufplanung im öffentlichen Verkehr mit mehreren Depots und Fahrzeugtypen: Neue Lösungsmodelle und praktische Aspekte. In Heureka'02: Optimierung in Verkehr und Transport. FGSV Verlag, Köln.
- [Mic,Schö] MICHAELIS, M.; SCHÖBEL, A.:(2007). Integrating Line Planning, Timetabling, and Vehicle Scheduling: A customer-oriented approach. ARRIVAL Technical Report 0096, Dezember 2007, Göttingen.
- [MMBV10] Anwendung des GALILEO Navigationssystems in der Verkehrslogistik; Studie, Miskolc, 2010: Miskolci Egyetem; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU) und Borsod Volán Zrt.
- [MtEUK09] Mitteilung der Europäischen Kommission: Eine nachhaltige Zukunft für den Verkehr: Wege zu einem integrierten, technologieorientierten nutzerfreundlichen System, Brüssel, 2009.
- [Nac98] NACHTIGALL, K. (1998). Periodic Network Optimization and Fixed Interval Timetables. Habilitationsschrift. Universität Hildesheim
- [Nch04] Nachhaltigkeitsrat (2004). Ziele zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland - Schwerpunktthemen. Dialogpapier des Nachhaltigkeitsrates. http://www.nachhaltigkeitsrat.de/n_strategie/dialogpapier.
- [Nem88] NEMHAUSER, G.; WOLSEY, L.: Integer and Combinatorial Optimization. Wiley Interscience, 1988, ISBN 0-471-35943-2.
-

-
- [Nie08] NIEPEL, S: Ganztagesfahrplanoptimierung im ÖPNV mit naturanalogen Methoden, Diplomarbeit Köln, 2008.
- [Oss00] OSSIMITZ, G.: Einführung in die Systemwissenschaften, Begleitskriptum zur Vorlesung, Universität Klagenfurt, 2000.
- [Pol04] Advanced Decision Support Tools for Transportation and Logistics, International Workshop, Polloco Project, Poznan, 2004.
- [Rob75] ROBILLARD, P.: Estimating the O-D matrix from observed link volumes, Transportation Research, 1975, 9 (2/3) 123-128.
- [Rod98] RODRIGUE, J.P. et al. Transport geography Web Site. Bishop's University, Dep. Of Geography.
- [Rud77] RUDNICKI, A.: Potoki pasażero'w w miejskiej komunikacji zbiorowej jako procesy stochastyczne. Czasopismo Techniczne 81 (1977) 5 , pp. 16 – 21.
- [Rud92] RUDNICKI, A.; Probabilistyczne mierniki oceny punctualnos'ci obslugi pasażero'w w komunikacji zbiorowej; Polska Akademia Nauk - Oddzial w Krakowie; Komisja Budownictwa - Problemy inzynierii ladowej 1992, pp. 135 – 146.
- [Sar10] SÁRKÖZI, G.: Modelle und Simulation, Konferenzvortrag, 2010, Aggtelek, Ungarn.
- [Sch10] SCHENK, M.; RICHTER, K.; JUMAR, U.; HERRMANN, A.: Galileo-Testfeld Sachsen-Anhalt - Anwendungsschwerpunkte Verkehr und Logistik. In: Intelligent wachsen . - Hamburg : DVV Media Group, Dt. Verkehrs-Verl., ISBN 978-3-87154-430-9, S. 567-600, 2010 Kongress: Deutscher Logistik-Kongress; 27 (Berlin) : 2010.10.2
- [Sch09a] SCHENK, M.; TOLUJEW, J.; REGGELIN, T.: Comparison of three methods of implementation of mesoscopic flow models; In: Logistics and supply chain management. - Göttingen : Cuvillier, ISBN 978-3-86727-909-3, S. 36-44, 2009.
- [Sch09b] SCHENK, M.: Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme - 6. Fachtagung zur Virtual Reality, 12. IFF-Wissenschaftstage, 16. - 18. Juni 2009, Magdeburg – Tagungsband. In: Magdeburg: IFF, ISBN 978-3-8396-0023-8, 2009 Kongress: IFF-Wissenschaftstage; 12 (Magdeburg): 2009.06.16-18 Fachtagung zur Virtual Reality; 6 (Magdeburg) : 2009.06.16-18.
- [Ser89] SERAFINI, P. und UKOVICH, W. (1989). A mathematical model for periodic scheduling problems. SIAM Journal on Discrete Mathematics 2(4). S. 550-581.
-

-
- [Sha75] SHANNON, Robert E.: Systems Simulation: The Art and Science, Englewood, 1975. p. 7.
- [Shu84] SHUBIK, Martin: Games for Society, Business and War. Towards a theory of games, Cambridge, 1984. p. 12.
- [Sil00] SILVA, G., GUALDA, N., and KWAN, R. (2000). Bus scheduling based on an arc generation - network flow approach. In Proceedings of CASPT- 2000, 8th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, Berlin.
- [Smi05] SCHMIDT, D. (2005). Linien- und Taktfahrplanung – ein integrierter Optimierungsansatz. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin.
- [SnVDA09] Stellungnahme des Verbandes für Automobilindustrie (VDA) zur Mitteilung der EU Kommission: „Eine nachhaltige Zukunft für den Verkehr“; 2009.
- [Spi90] SPIESS, Heinz: A gradient approach for the O-D Matrix adjustment problem, 1990, EMME/2 Support Center.
- [Ste05] STEIERWALD, Gerd; KUNNE, Hans D.; VOGT, Walter: Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele, 2005, Political Science.
- [Tit03] TITTMANN, Peter: Graphentheorie. Eine anwendungsorientierte Einführung, Leipzig, 2003.
- [Van94] VANDERBEI, Robert J. IANNONE, James: An EM Approach to OD Matrix Estimation, Program in Statistics & Operations Research, Princeton University, Princeton, NJ 08544, March 29, 1994 Technical Report SOR-94-04.
- [VDI10] VDI-Richtlinien, Leitfaden für Materialflussuntersuchungen, VDI 2689 Entwurf, Düsseldorf, 2010.
- [Vil06] VILLUMSEN, J.C. (2006). Construction of Timetables Based on Periodic Event Scheduling. Masterarbeit, Technische Universität Dänemark, Kopenhagen.
- [Vor56] VOORHEES, Alan M., 1956, "A General Theory of Traffic Movement," 1955 Proceedings, Institute of Traffic Engineers, New Haven, Connecticut.
- [Völ03] VÖLKER, M. (2003). Ein multikriterieller Algorithmus zur automatisierten Busliniennetzplanung. Vortrag auf dem OR Workshop Optimierung im öffentlichen Nahverkehr, Berlin.
- [Wil81] WILLUMSEN, L. G.: Simplified transport demand models based on traffic counts, Transportation Research 1981, 10 (3) 257-278.
-

- [Wint09] WINTERHOFF, Marc; KAHNER, Carsten; ULRICH, Christopher; SAYLER, Philipp; WENZEL, Eike: Future of Mobility 2020 – The automotive industry in upheaval; Arthur D. Little, 2009.
- [www01] VISSIM. Webaufruf [<http://www.ptv-newcastle.co.uk/>]. 20.05.2011.
- [www02] Geoinformatik-Service. Webaufruf [<http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/>]. 20.05.2011.

Anlagenverzeichnis

Anlagen zum Kapitel 5

Anlage 5-1	Algorithmus zur Simulationsuntersuchung der Zeitfaktoren	124
Anlage 5-2	Algorithmus zur Simulationsuntersuchung der Wirtschaftlichkeit	128

Anlagen zum Kapitel 7

Anlage 7-1	Anlagen zu SIMUL8	133
Anlage 7-1-1	Generieren von Pseudo-Zufallszahlen	133
Anlage 7-1-2	Herstellung von experimentellen "Drehbüchern"	133
Anlage 7-1-3	Bedienung von SIMUL8	134
Anlage 7-1-4	Region Nordungarn	135
Anlage 7-1-5	Komitat Borsod-Abaúj-Zemplén, Haupttätigkeitsgebiet der Borsod Volán Zrt	135
Anlage 7-1-6	Straßenstrecken des Simulationsmodells	136
Anlage 7-1-7	Sammelfahrten sortiert nach Linienführung	137
Anlage 7-1-8	Gebiet des Netzsegmentes, das in die Simulationsuntersuchungen einbezogen wird	138
Anlage 7-1-9	SIMUL-8 Simulationsmodell für die Lösung der Aufgabe	139
Anlage 7-1-10	Objekte, die die Agglomerationsfahrten und deren Verbindungspunkte an die Taktfahrten repräsentieren	140
Anlage 7-1-11	Zusteigeorte der Taktfahrt	141
Anlage 7-1-12	Statistiken des Objekts „Haltestelle“	142
Anlage 7-1-13	Fahrplanparameter einer Sammelfahrt	143
Anlage 7-1-14	Einstellungsmöglichkeiten des Parameters für die Änderung von Fahrgastzahlen	144
Anlage 7-1-15	Parametrierungsmöglichkeit für das Unterscheiden der Fahrgäste nach ihren Reisezielen	144
Anlage 7-1-16	Modellierung des Fahrgastverkehrs zwischen den Endpunkten der Relation	145
Anlage 7-1-17	Diagramm für die Angabe der Reiseziele der Fahrgäste, die zwischen den beiden Städten reisen	146
Anlage 7-1-18	Angabe der Parameter der Fahrzeuge und die von ihnen zusammengestellte Flotte	147

Anlage 7-1-19	Sich kontinuierlich ändernde Parameter der Passagiere im Ablauf der Simulation	148
Anlage 7-1-20	Sich kontinuierlich ändernde Parameter des Fahrzeugs („Bus“), das eine konkrete Fahrt verkörpert	148
Anlage 7-1-21	Durchschnittliche Ergebnisse von 50 Simulationsabläufen	149
Anlage 7-1-22	Durchschnittliche Ergebnisse von 50 Simulationsabläufen (mit Berücksichtigung der Daten von Sammelpassagieren)	149
Anlage 7-1-23	Fahrplan einer Fahrt der Borsod Volán AG	150
Anlage 7-1-24	Illustration der Anschlussprobleme der Sammelfahrten	149
Anlage 7-1-25	Streuung der Wartezeiten	151
Anlage 7-1-26	Auslastungsdiagramm der Fahrzeuge in der Simulation (1)	152
Anlage 7-1-27	Auslastungsdiagramm der Fahrzeuge in der Simulation (2)	153
Anlage 7-1-28	Wirkung der Modifikation der Flotte auf die Wartezeiten	154
Anlage 7-1-29	Wirkung der Taktzeit auf die Kosten	155
Anlage 7-1-30	Optimierung bzgl. der Verringerung der durchschnittlichen Reisezeiten	156
Anlage 7-1-31	Optimierung bzgl. der Verringerung der maximalen Reisezeiten	157
Anlage 7-1-32	Tabellen für die Auswahl von kostengünstigen Taktzeiten	158
Anlage 7-2	Detaillierte Daten der Fahrgastzählungen	159
Anlage 7-2-1	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 03.45-08.00 an den Haltestellen der untersuchten Relation	159
Anlage 7-2-2	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 08.00-12.00 an den Haltestellen der untersuchten Relation	160
Anlage 7-2-3	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 12.00-16.00 an den Haltestellen der untersuchten Relation	161
Anlage 7-2-4	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 16.00-22.15 an den Haltestellen der unter-	162

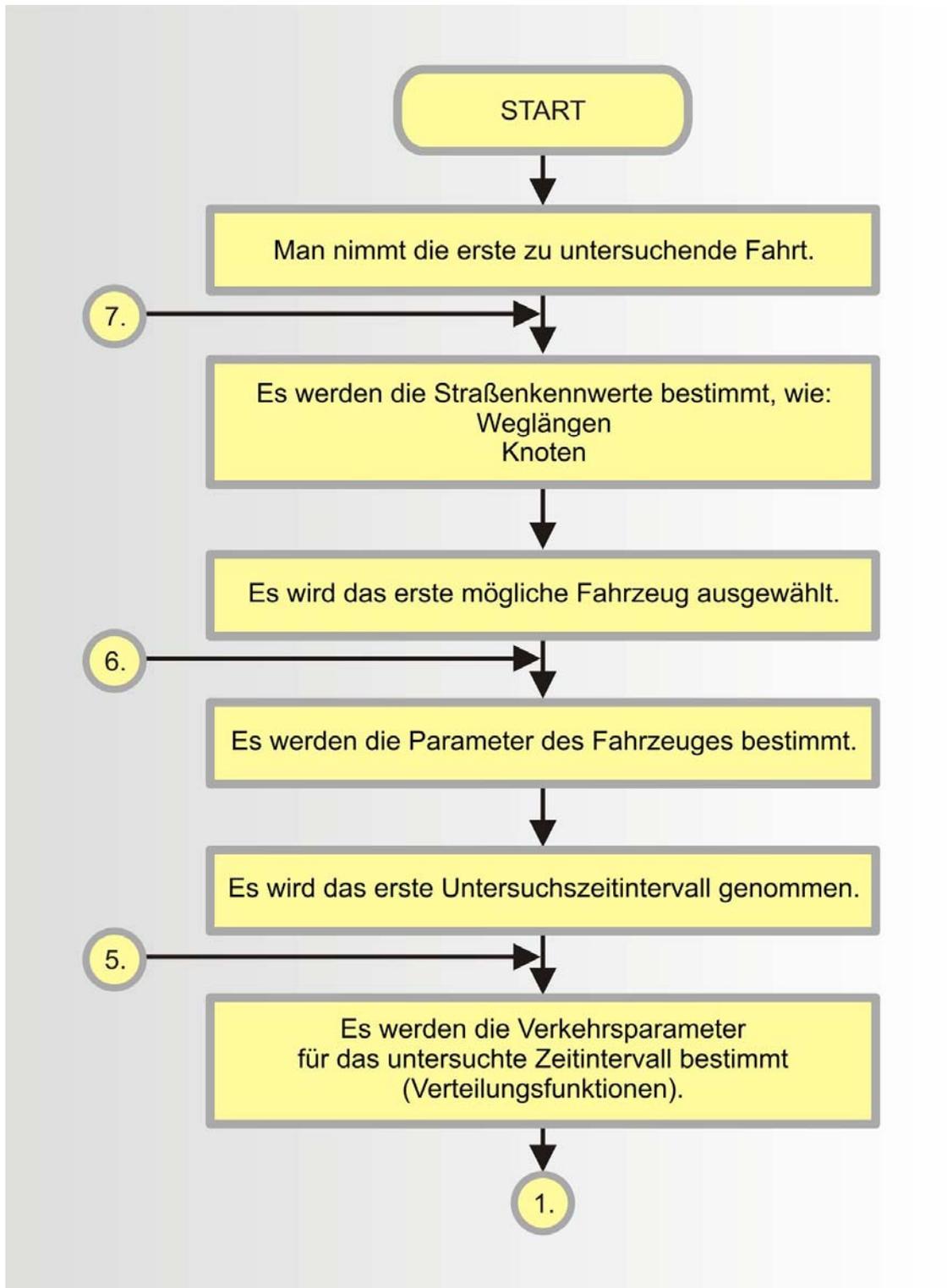
	suchten Relation	
Anlage 7-2-5	Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 03.45-08.00 an den Haltestellen der untersuchten Relation	163
Anlage 7-2-6	Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 08.00-12.00 an den Haltestellen der untersuchten Relation	164
Anlage 7-2-7	Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 12.00-16.00 an den Haltestellen der untersuchten Relation	165
Anlage 7-2-8	Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 16.00-22.15 an den Haltestellen der untersuchten Relation	166
Anlage 7-3	Tabellen der Fahrpläne und Fahrgastzahlen von den Sammelfahrten	167
Anlage 7-3-1	Daten der Fahrten im Knoten „Parasznyai elágazás“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	167
Anlage 7-3-2	Daten der Fahrten im Knoten „Parasznyai elágazás“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	168
Anlage 7-3-3	Daten der Fahrten im Knoten „Berente bányagépjavító“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	168
Anlage 7-3-4	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	169
Anlage 7-3-5	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	169
Anlage 7-3-6	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	170
Anlage 7-3-7	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	170
Anlage 7-3-8	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	171
Anlage 7-3-9	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	171
Anlage 7-3-10	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	172

	nie und Tageszeit	
Anlage 7-3-11	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	173
Anlage 7-3-12	Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit	173

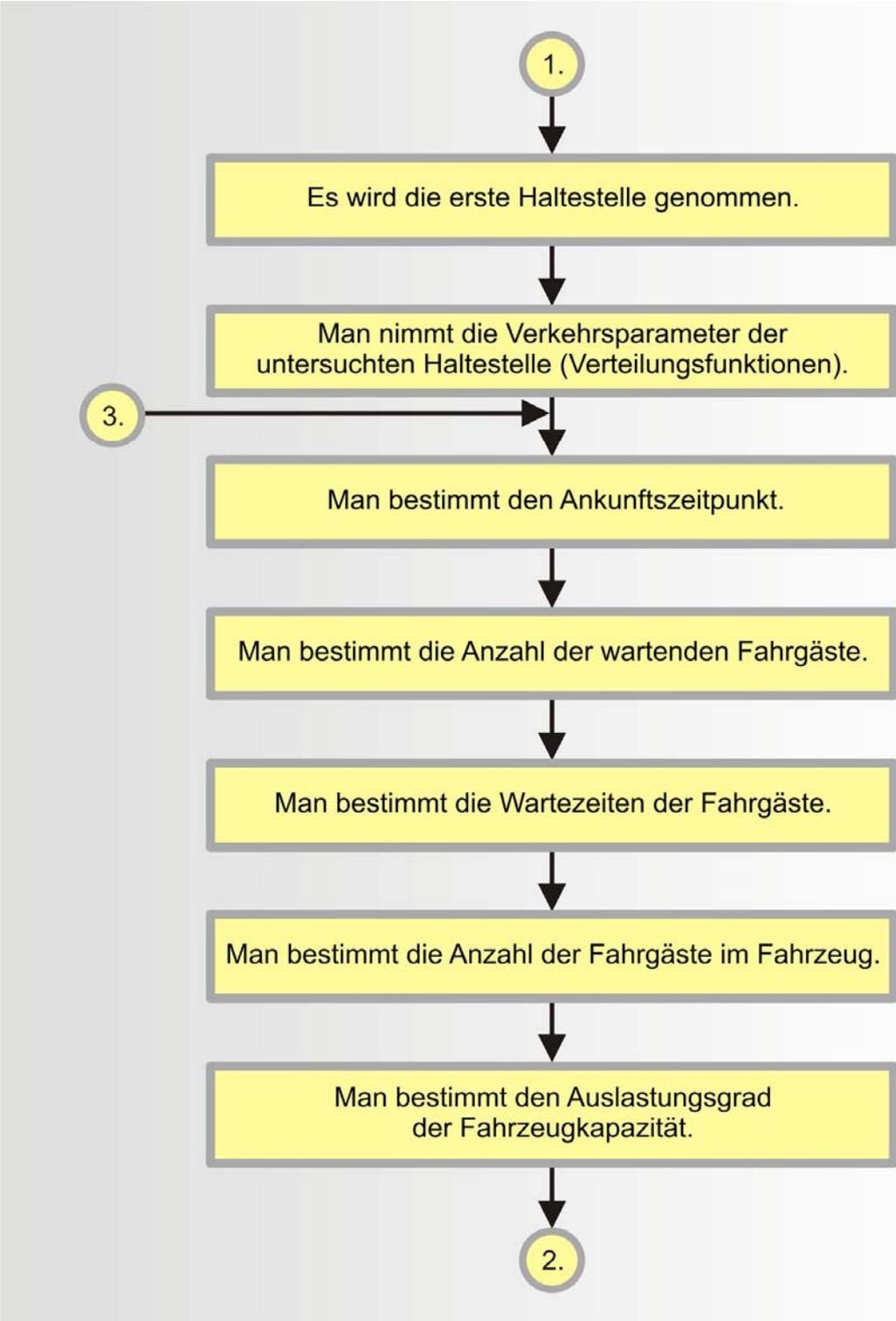
Anlagen

Anlage 5-1 Algorithmus zur Simulationsuntersuchung der Zeitfaktoren

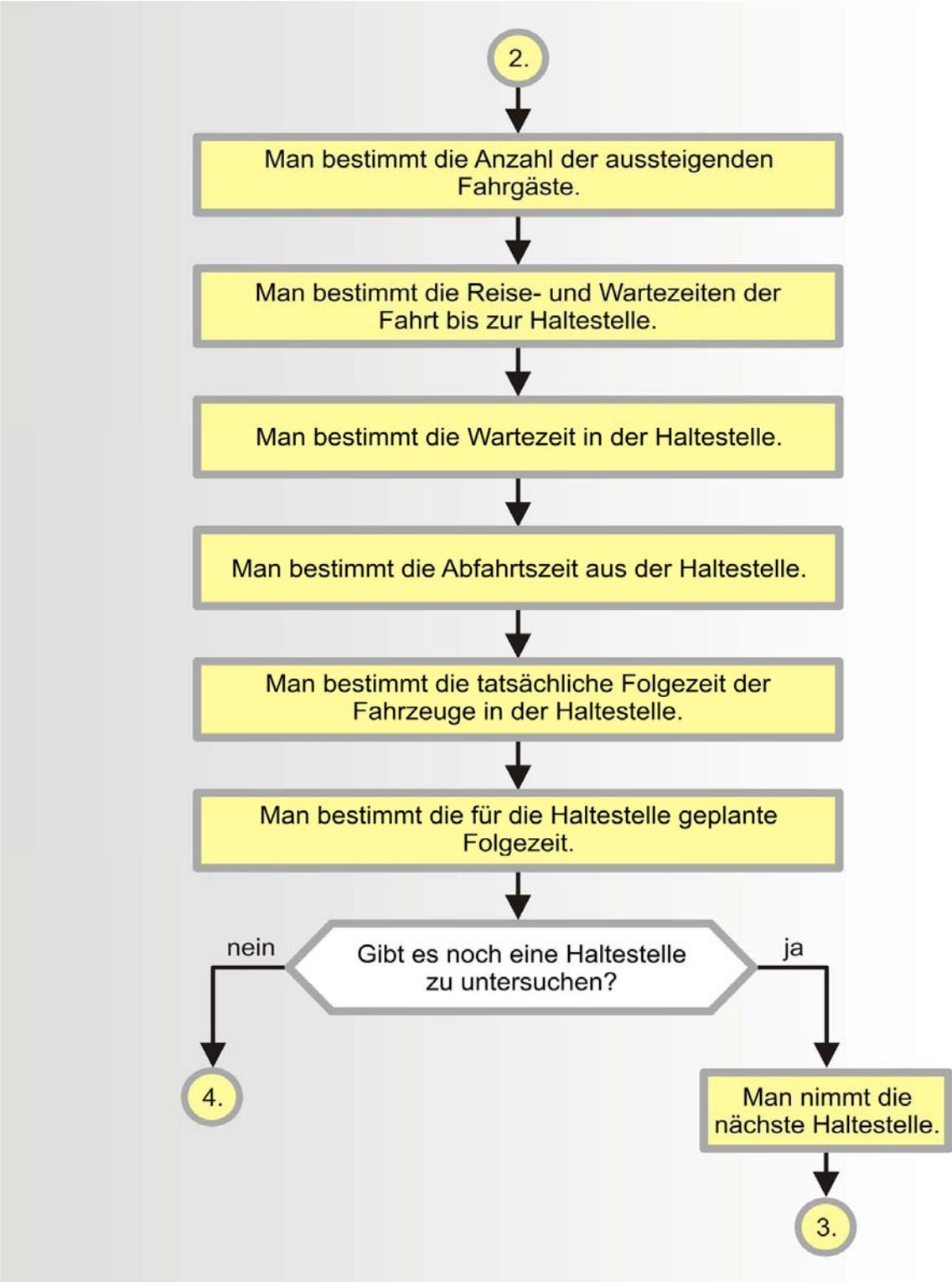
Anlage 5-1/a: Simulationsalgorithmus



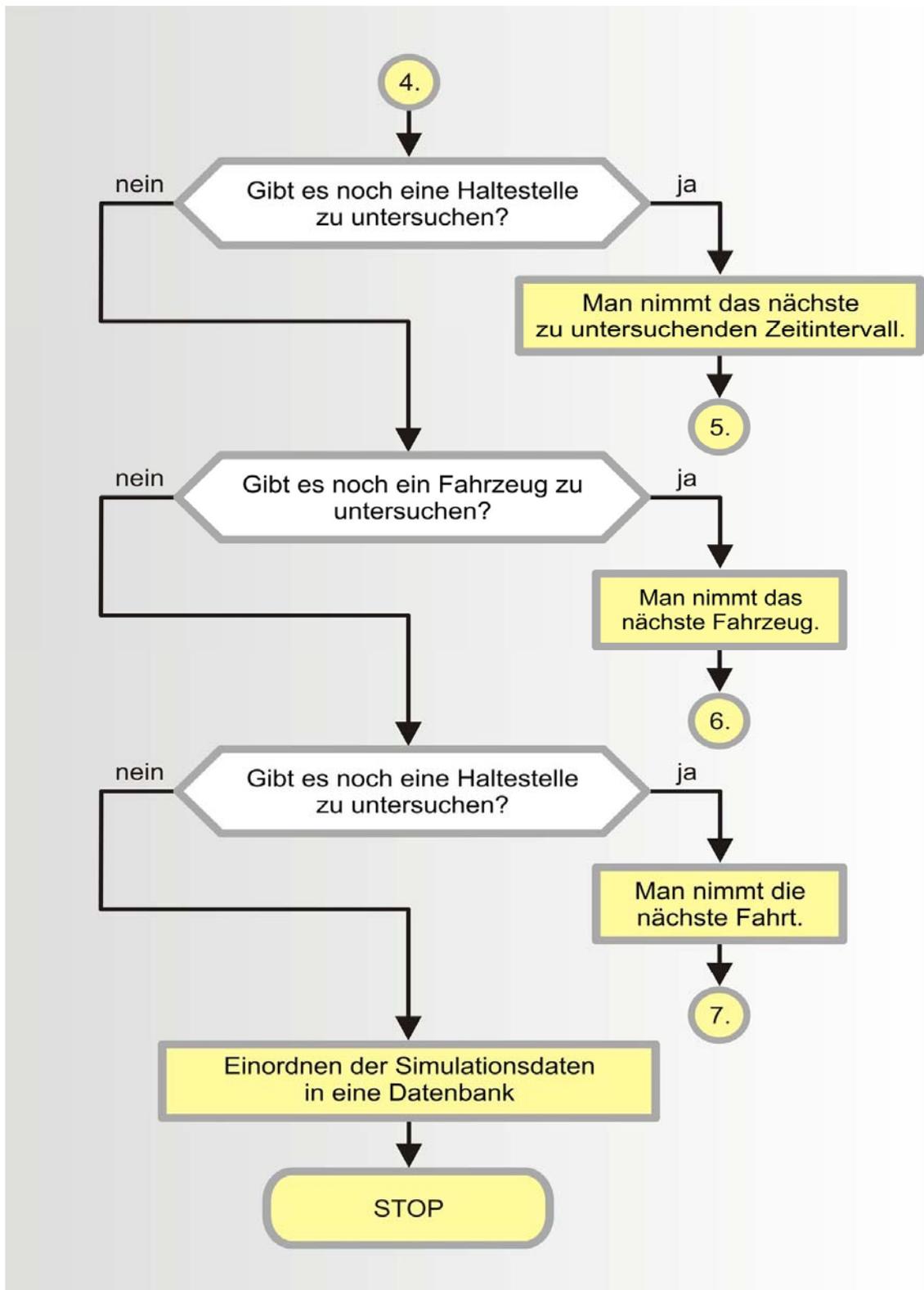
Anlage 5-1/b: Simulationsalgorithmus II



Anlage 5-1/c: Simulationsalgorithmus III

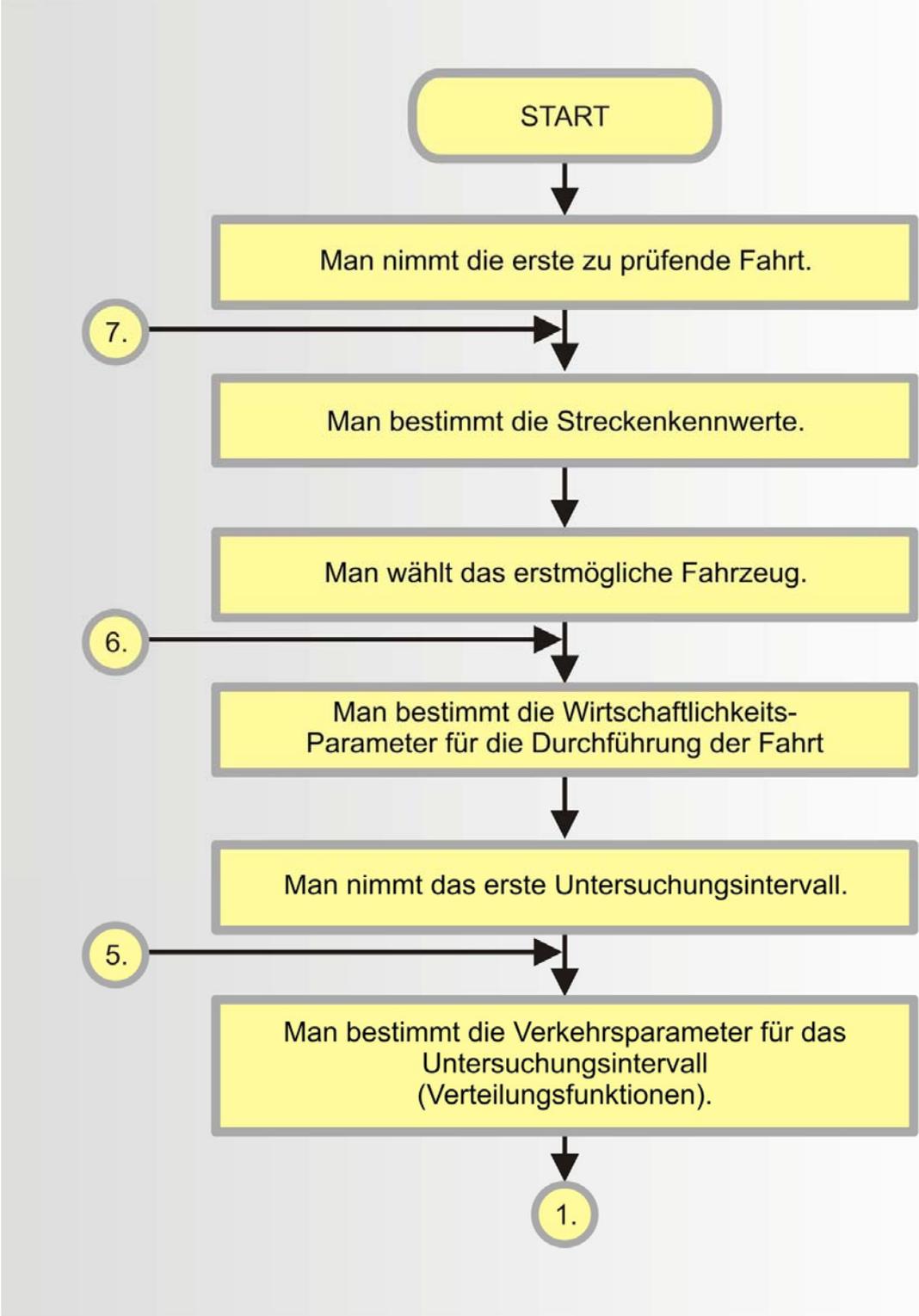


Anlage 5-1/d: Simulationsalgorithmus IV

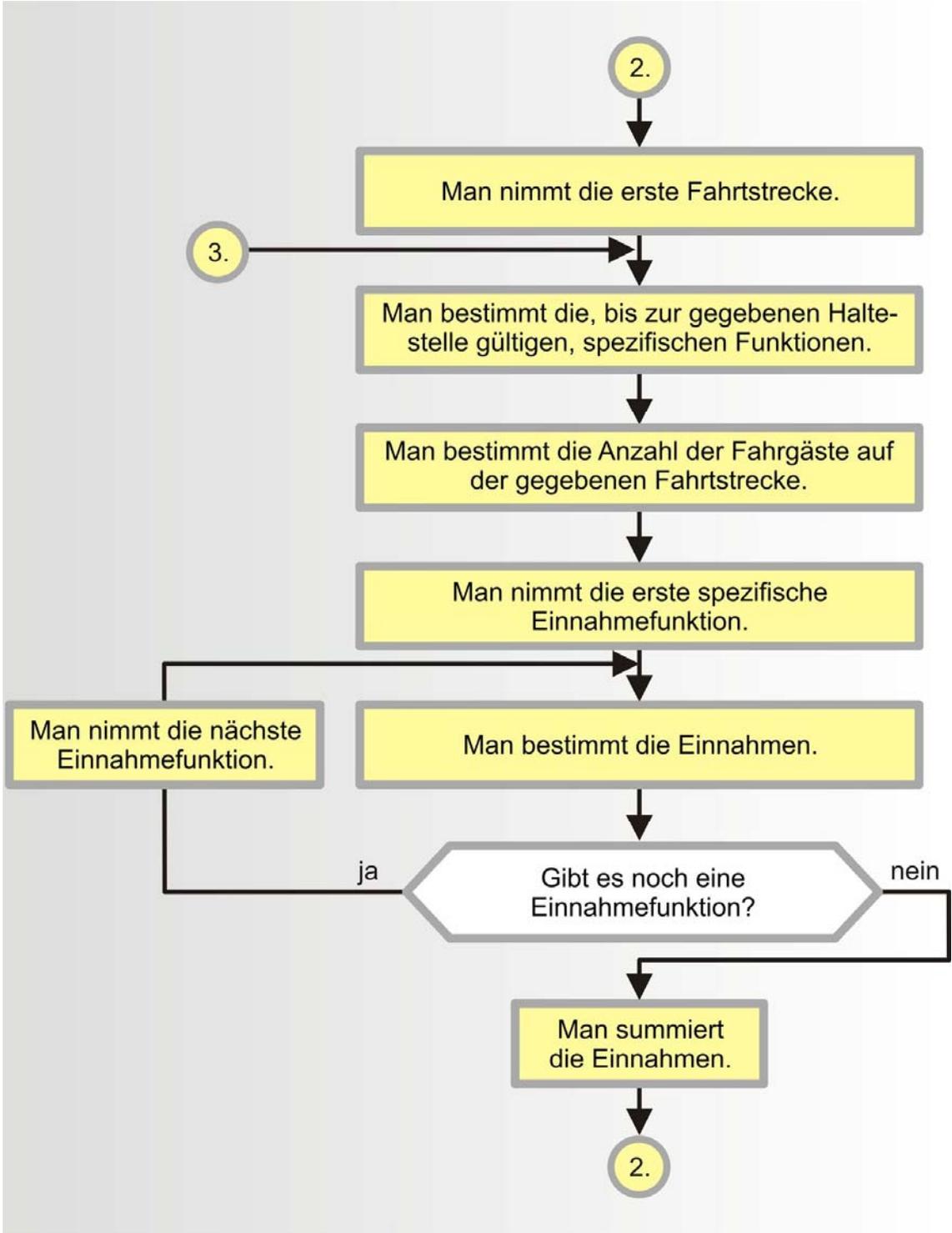


Anlage 5-2 Algorithmus zur Simulationsuntersuchung der Wirtschaftlichkeit

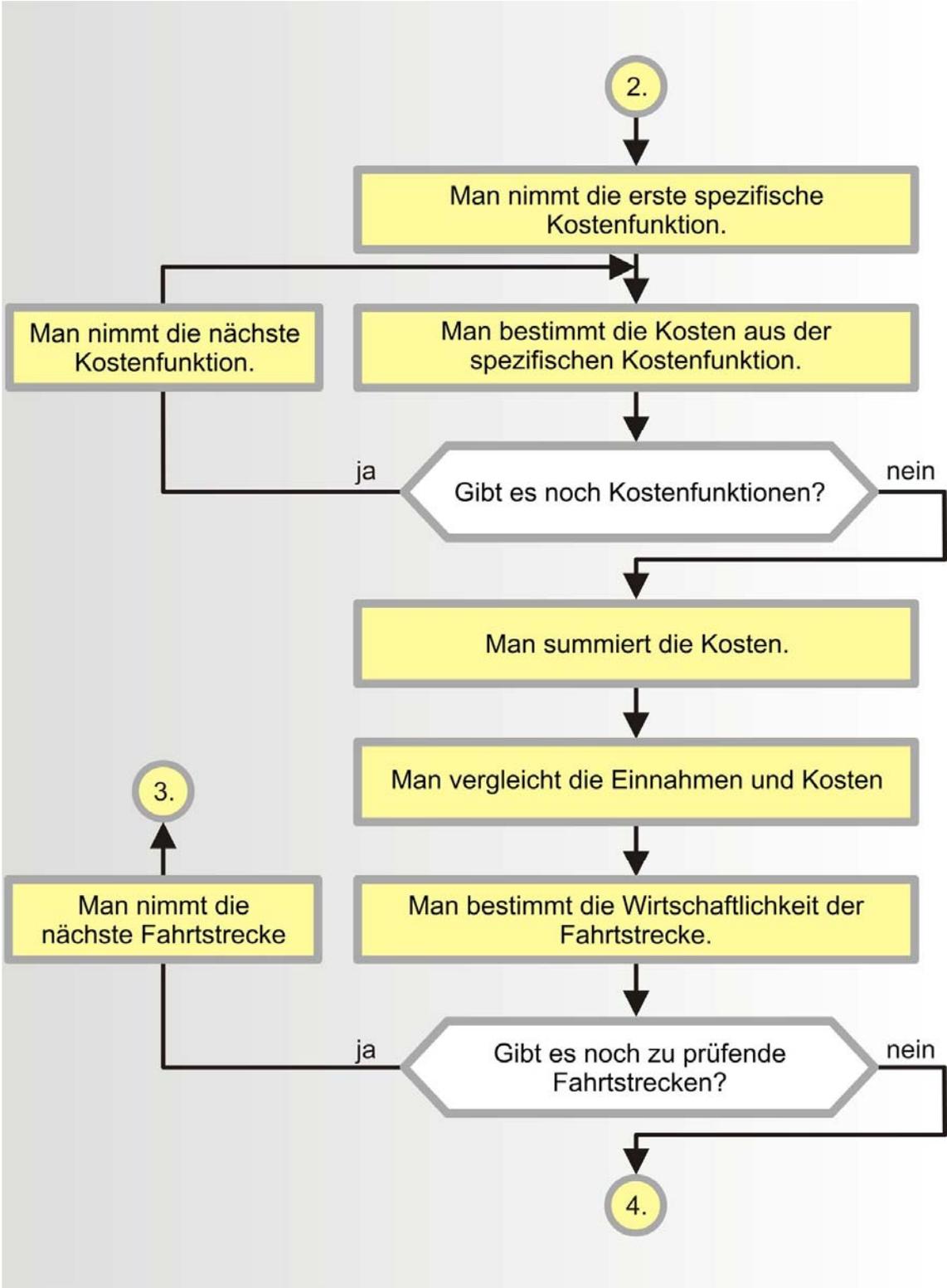
Anlage 5-2/a: Simulationsalgorithmus I



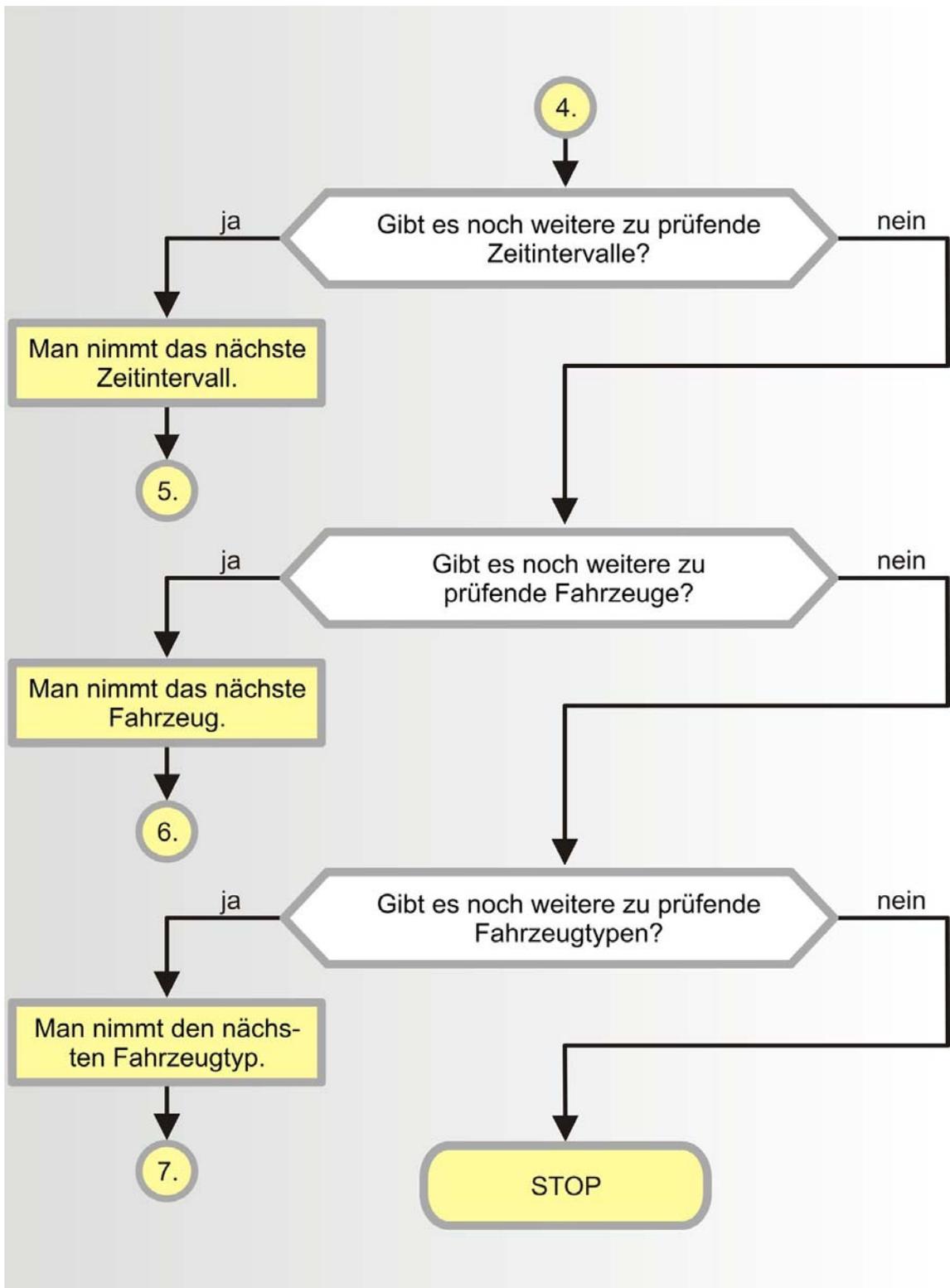
Anlage 5-2/b: Simulationsalgorithmus II



Anlage 5-2/c: Simulationsalgorithmus III

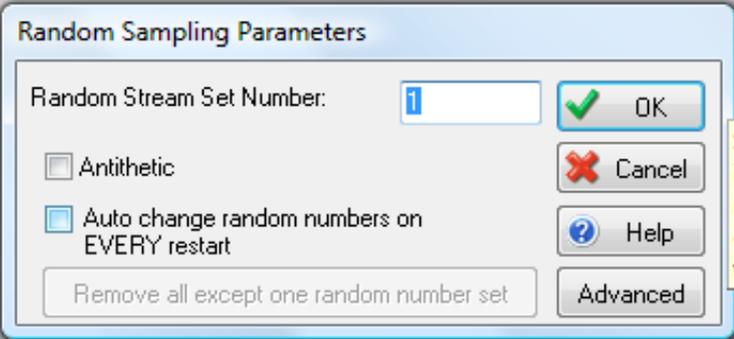


Anlage 5-2/d: Simulationsalgorithmus IV



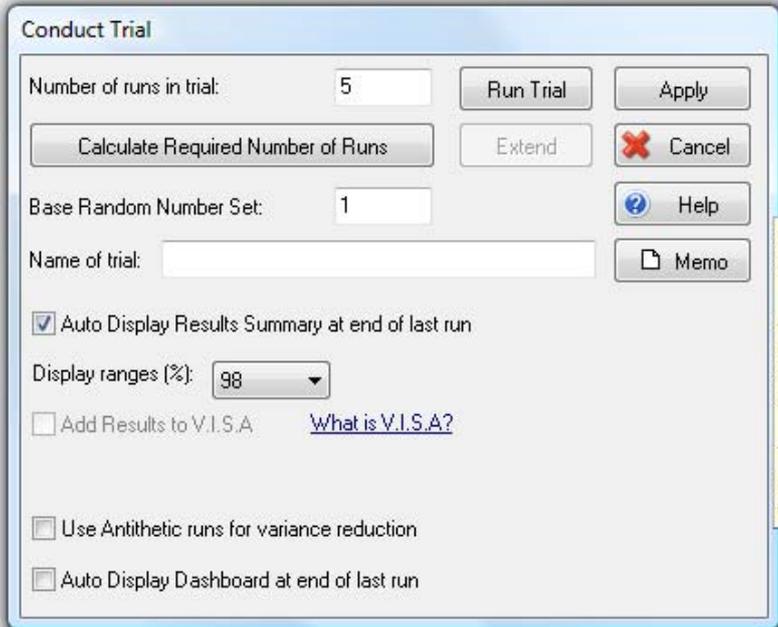
Anlage 7-1 Anlagen zu SIMUL8

Anlage 7-1-1: Generieren von Pseudo-Zufallszahlen



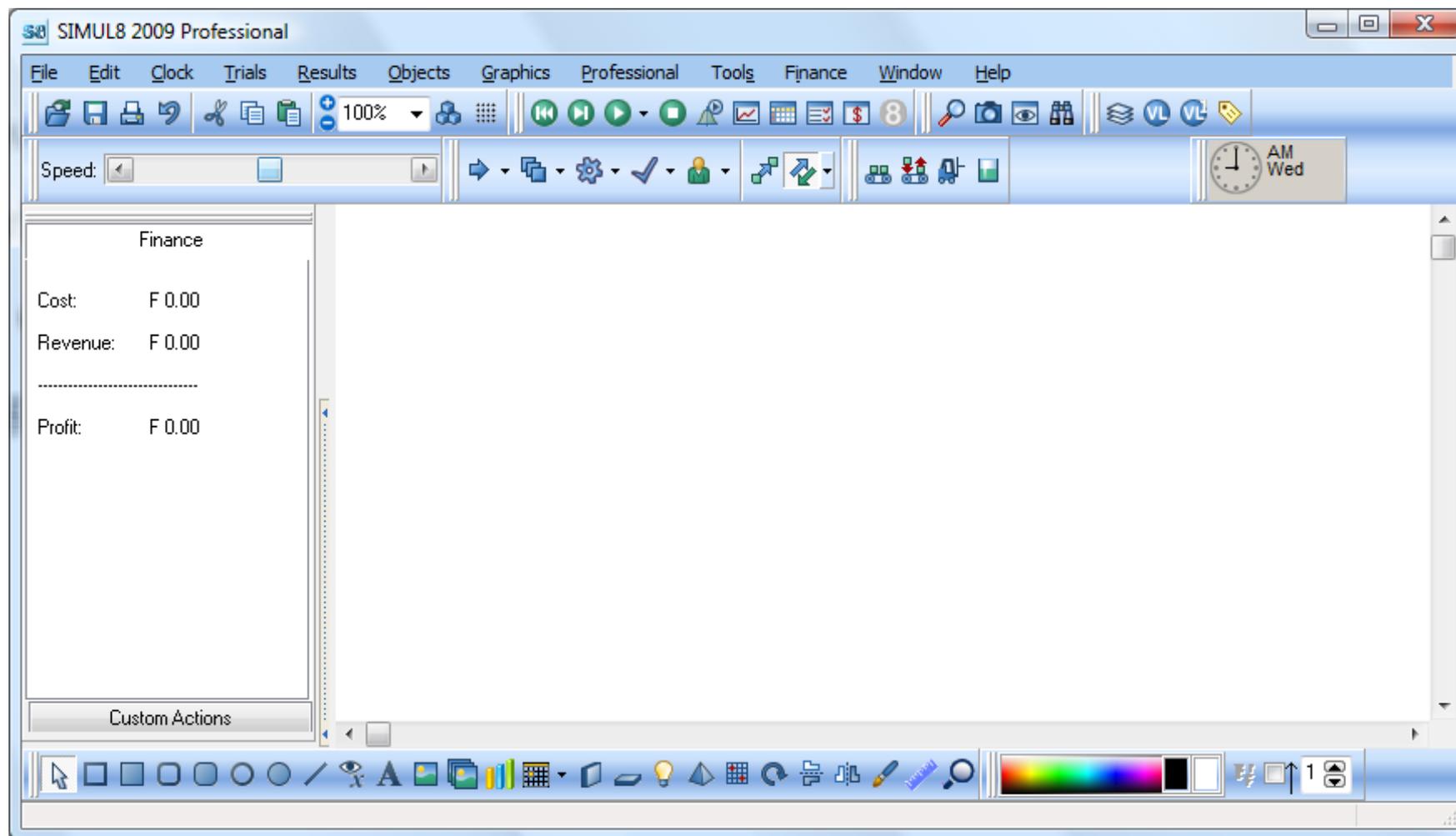
Saves you having to come into this dialog to change the random number set. (You can also use the DICE button for this).

Anlage 7-1-2: Herstellung von experimentellen "Drehbüchern"

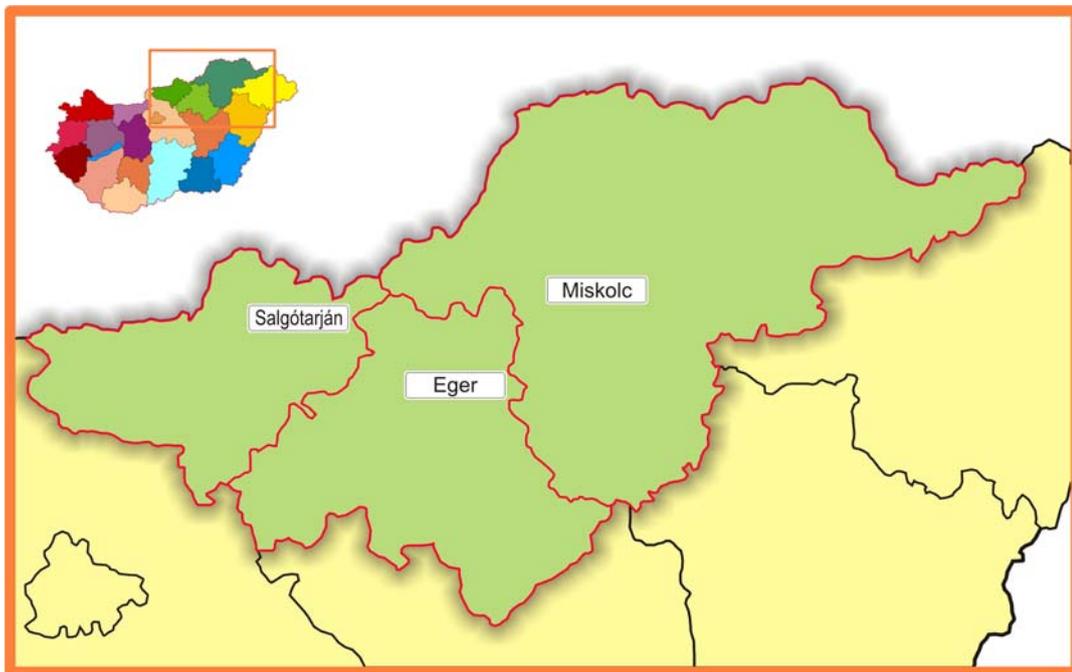


Controls details of how trials are conducted.
A Trial is a series of simulation runs (each run will be for the duration you set in "Results Collection Period").
The purpose of a trial is to discover how much variability there is between each run.

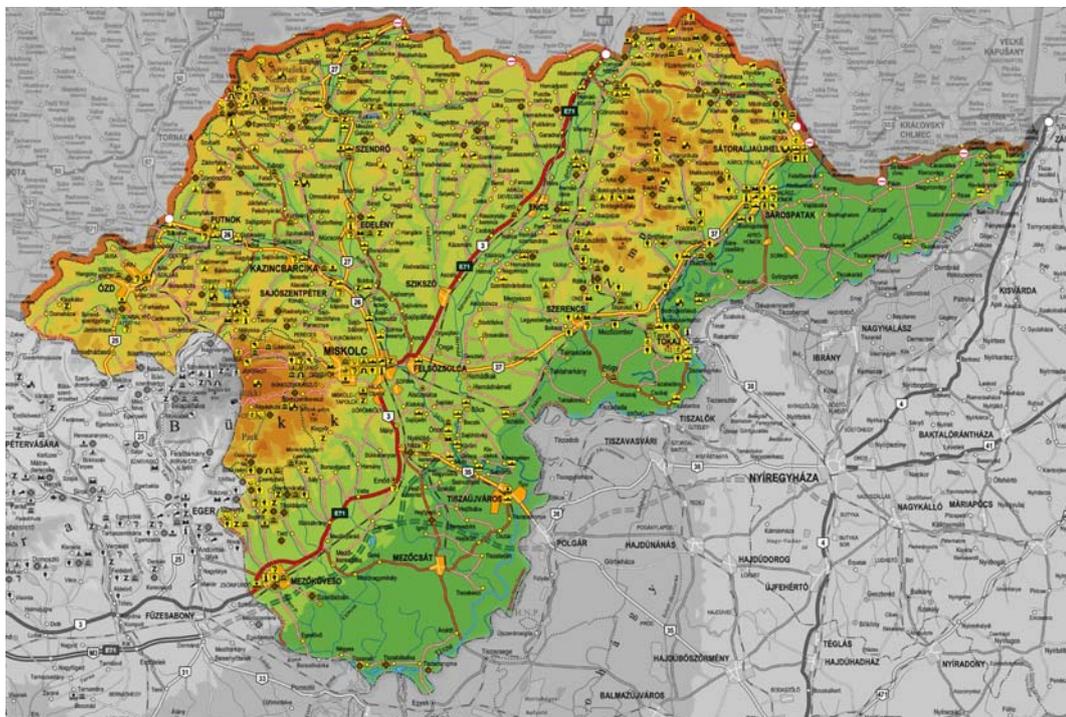
Anlage 7-1-3: Bedienung von SIMUL8



Anlage 7-1-4: Region Nordungarn



Anlage 7-1-5: Komitat Borsod-Abaúj-Zemplén, Haupttätigkeitsgebiet der Borsod Volán Zrt.



Anlage 7-1-6: Straßenstrecken des Simulationsmodells

- Strecke *Innenstadt Kazincbarcika (Kazincbarcika Haupthaltestelle - Kazincbarcika Szt. Flórián tér HS.)*
- Strecke zwischen *Kazincbarcika - Sajószentpéter (Kazincbarcika Szt. Flórián tér HS. - Berente, Bányagépjavító üzem)*
- Strecke *Innenstadt Sajószentpéter (Berente, Bányagépjavító üzem - Sajószentpéter, Kreuzung nach Parasznya)*
- Strecke zwischen *Sajószentpéter - Miskolc (S.péter Kr. Parasznya - Kr. Sajóbábony)*
- Strecke 2 zwischen *Sajószentpéter - Miskolc (Kr. Sajóbábony - Miskolc, Stromfeld laktanya)*
- Strecke *Innenstadt Miskolc (Miskolc, Stromfeld laktanya - Miskolc Haupthaltestelle)*

Anlage 7-1-7: Sammelfahrten sortiert nach Linienführung

Fahrten, die HS. Kazincbarcika Szent Flórián tér anfahren:

- (4040) *Kazincbarcika-Múcsony-Edelény*
- (4043) *Kazincbarcika/Berente-Edelény-Balajt-Abod*
- (4044) *Berente-Kazincbarcika-Edelény-Hangács*
- (4048) *Kazincbarcika-Berente*
- (4060) *Berente/Kazincbarcika-Dédestapolcsány-Mályinka-Nekézseny*
- (4062) *Berente-Kazincbarcika-Putnok-Sajóvelezd*
- (4063) *Berente-Kazincbarcika-Putnok*
- (4065) *Berente-Kazincbarcika-Sajóivánka-Sajógalgóc-Putnok*
- (4069) *Kazincbarcika-Szuhakálló-Sajókaza-Kazincbarcika*
- (4070) *Kazincbarcika-Berente-Kurtyán-Szuhafő*
- (4075) *Berente-Kazincbarcika-Felsőnyárád-Aggtelek-Jósvafő*
- (4076) *Kazincbarcika-Felsőnyárád-Aggtelek*
- (4080) *Kazincbarcika-Rudolftelep-Rudabánya-Kánó*
- (4081) *Berente-Kazincbarcika-Rudabánya-Jósvafő-Aggtelek, vá.[-Jósvafő]*
- (4083) *Berente/Kazincbarcika-Rudabánya-Szendrő-Rakaca*

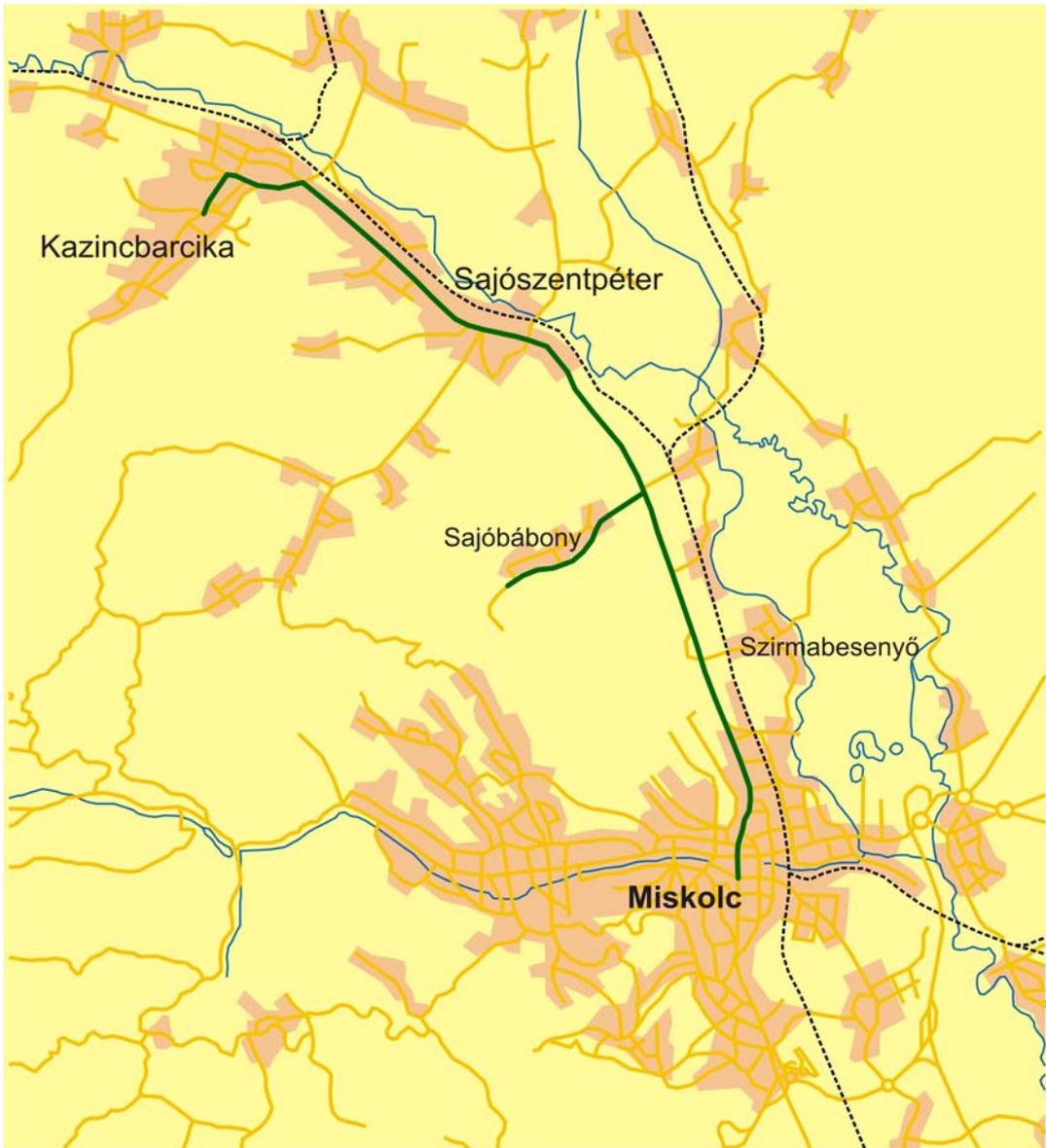
Fahrten, die HS *Bányagépjavitó* üzem anfahren:

- (4048) *Kazincbarcika-Berente*
- (4050) *Kazincbarcika-Berente-Sajószentpéter-Kondó-Varbó*
- (4052) *Berente-Kazincbarcika-Tardona*

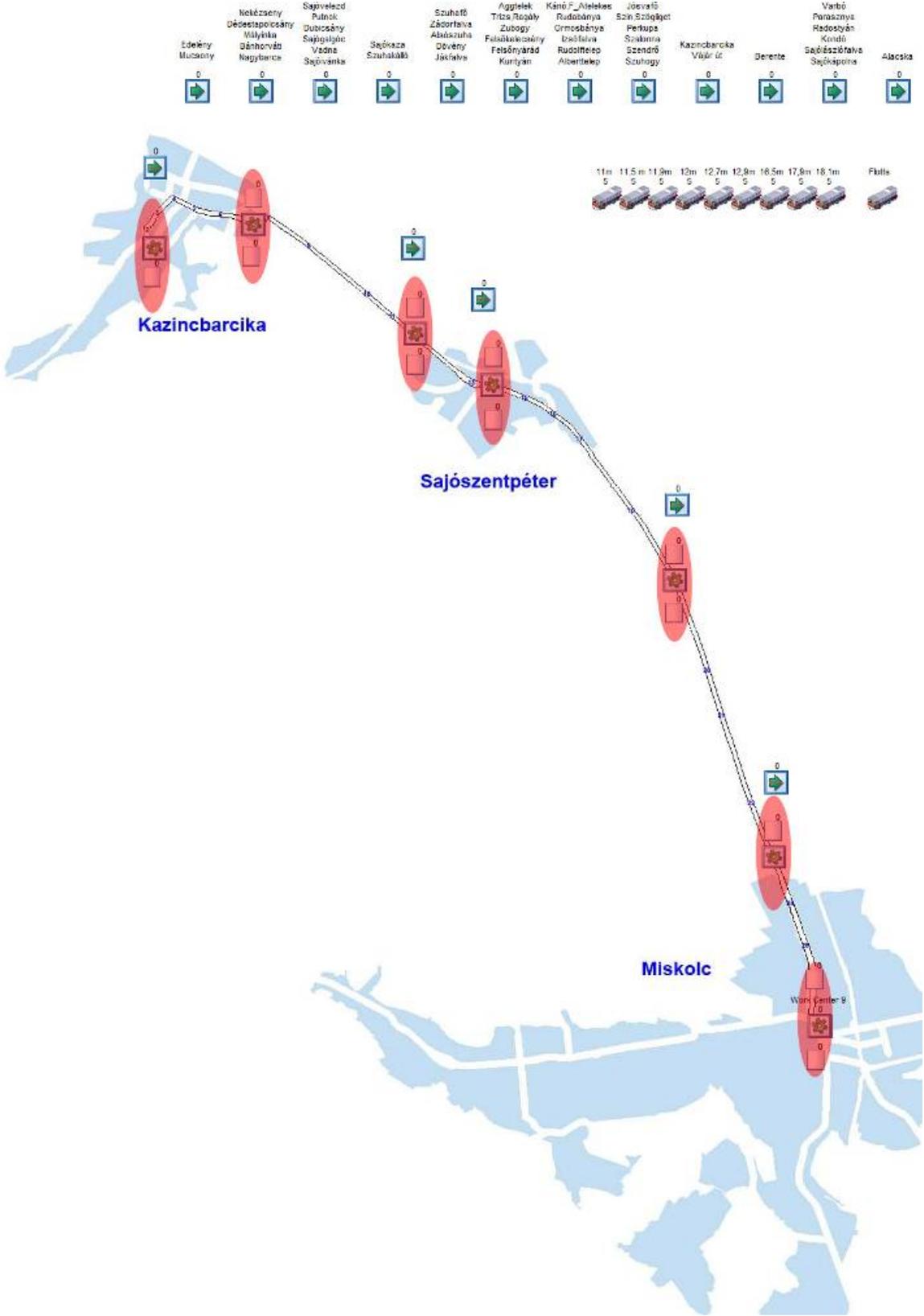
Fahrten, die HS *Parasznyai* elágazás anfahren:

- (3754) *Miskolc-Sajóbábony-Varbó*
- (3756) *Miskolc(Diósgyőr)-Varbó-Alacska-Kazincbarcika*
- (3761) *Miskolc-Sajószentpéter-Alacska*
- (4050) *Kazincbarcika-Berente-Sajószentpéter-Kondó-Varbó*
- (4051) *Kazincbarcika-Sajószentpéter-Alacska*

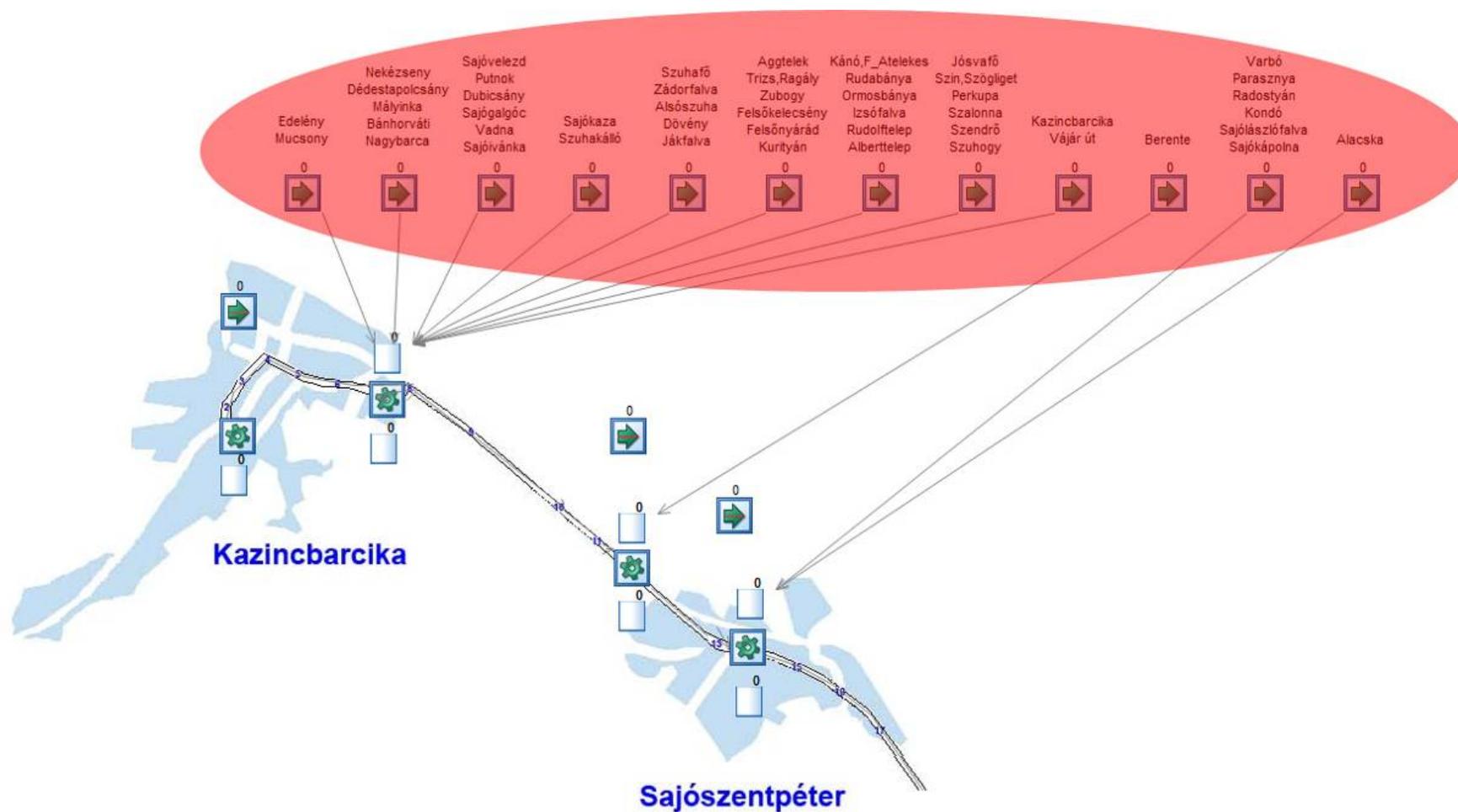
Anlage 7-1-8: Gebiet des Netzsegmentes, das in die Simulationsuntersuchungen einbezogen wird



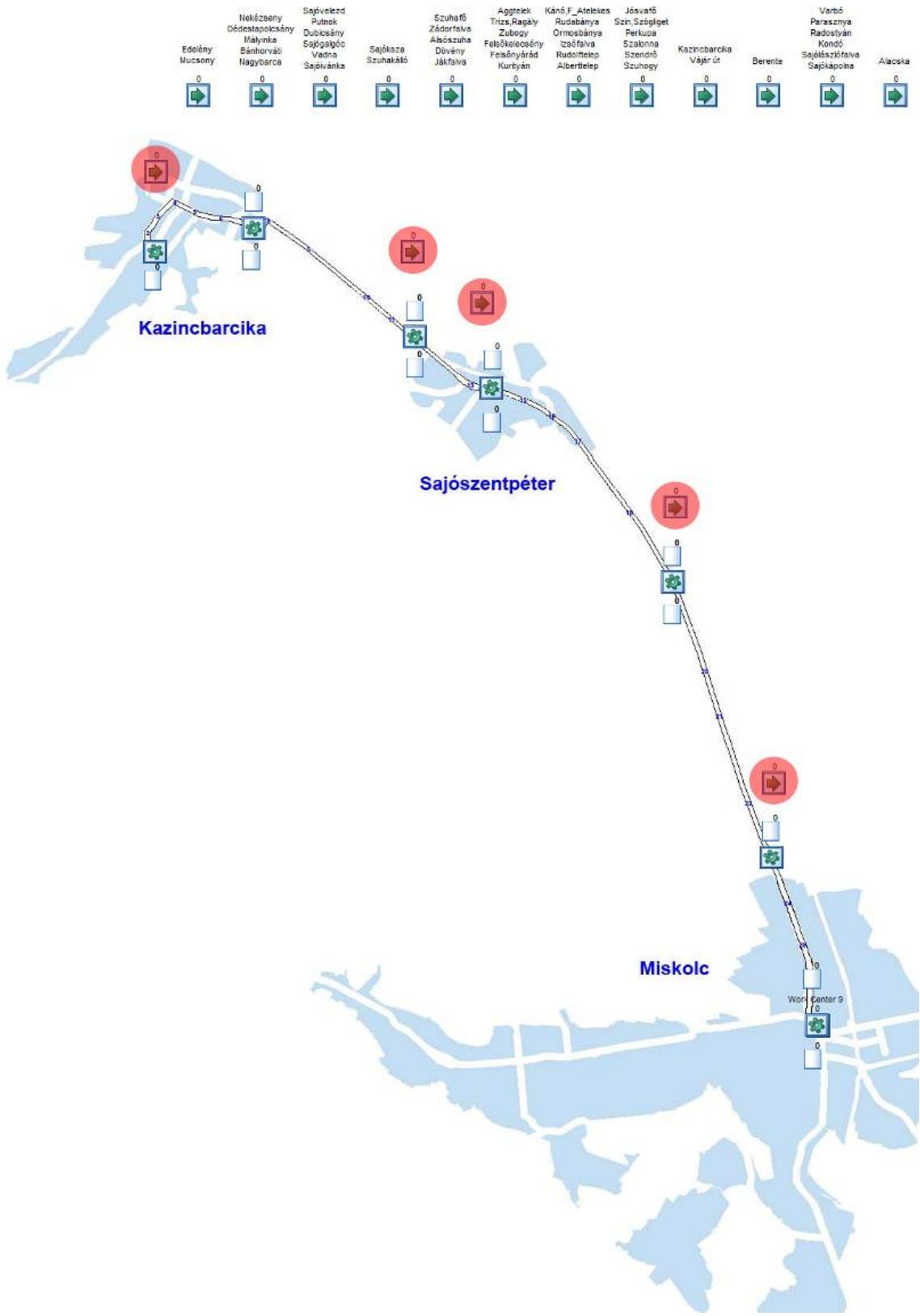
Anlage 7-1-9: SIMUL8 Simulationsmodell für die Lösung der Aufgabe



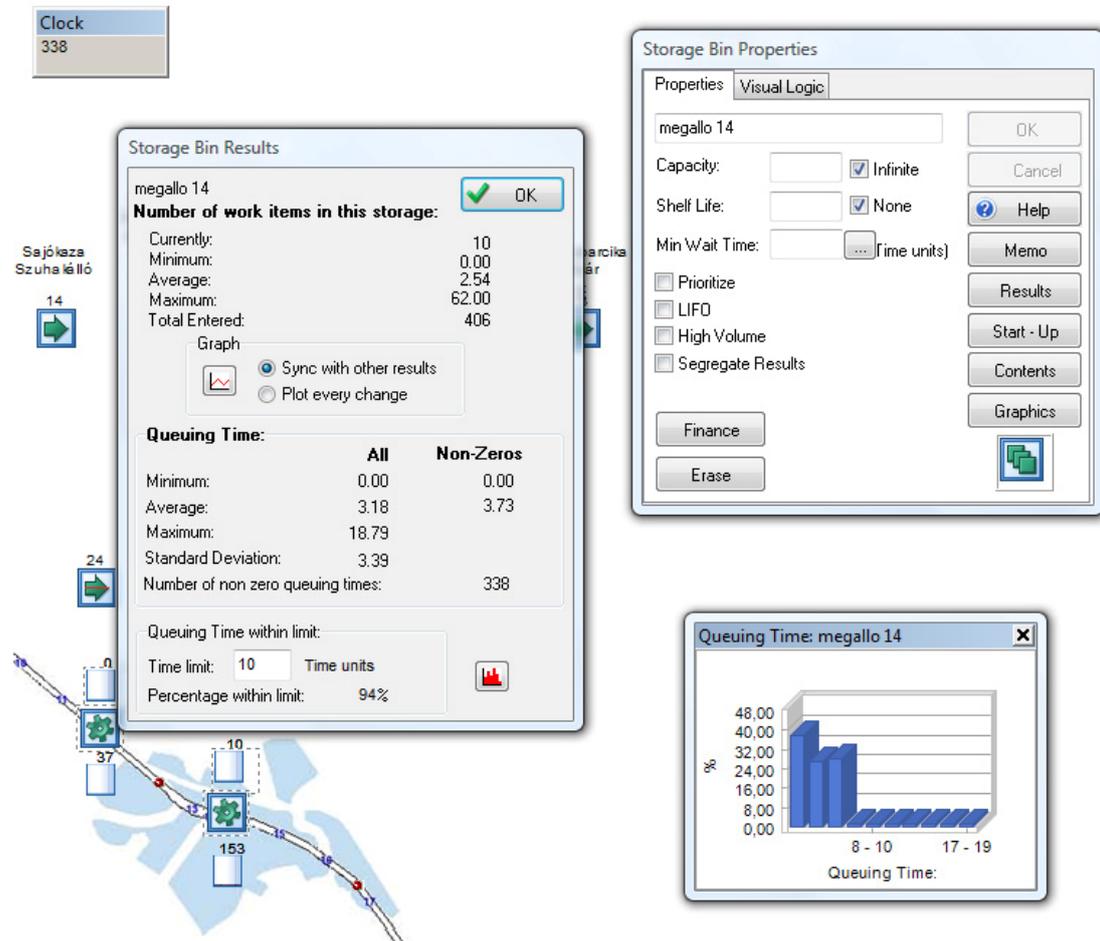
Anlage 7-1-10: Objekte, die die Agglomerationsfahrten und deren Verbindungspunkte an die Taktfahrten repräsentieren



Anlage 7-1-11: Zusteigeorte der Taktfahrt



Anlage 7-1-12: Statistiken des Objekts „Haltestelle“



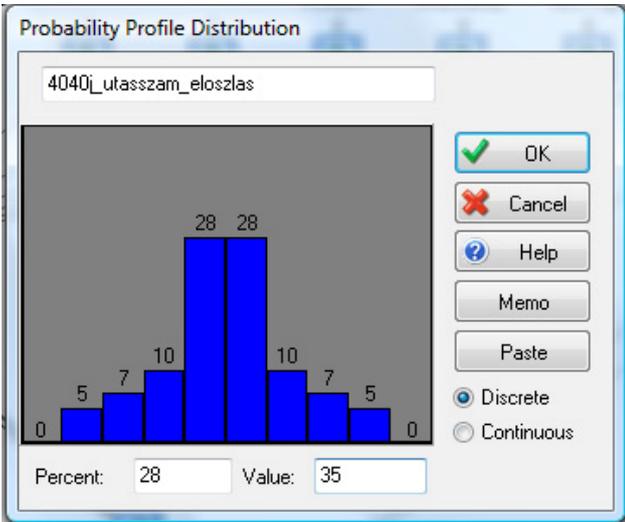
Anlage 7-1-13: Fahrplanparameter einer Sammelfahrt

The screenshot displays three overlapping windows from a simulation software interface:

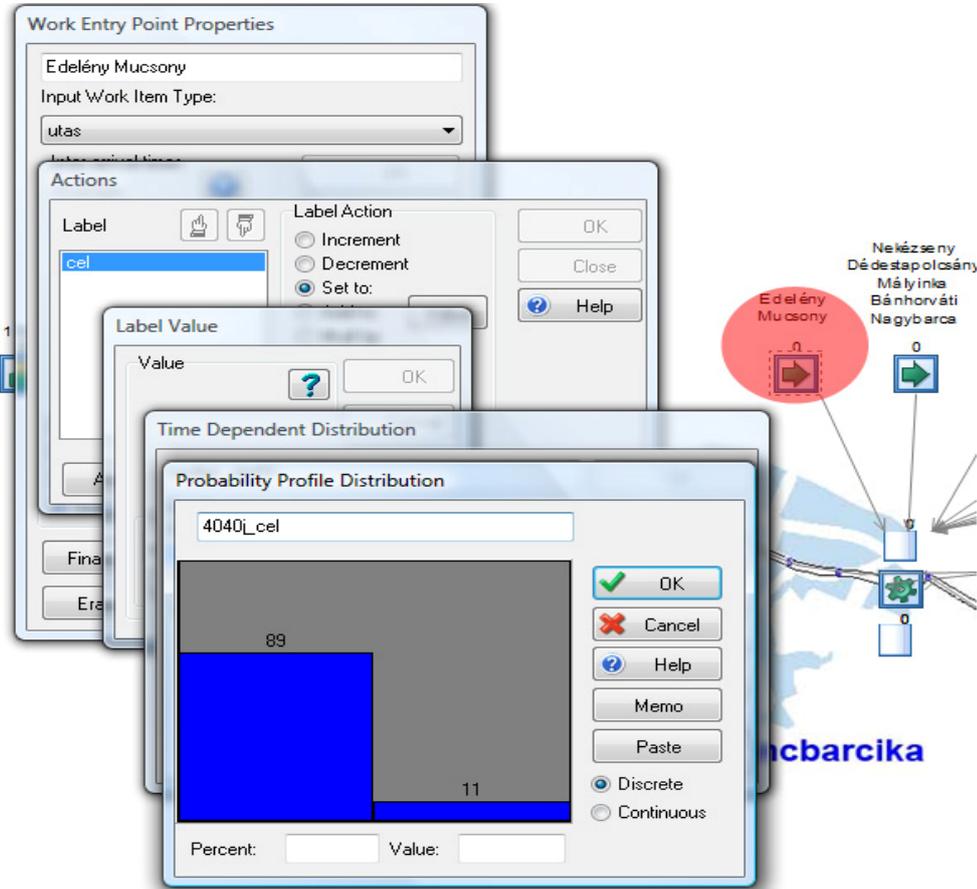
- Work Entry Point Properties:** A dialog box for 'Edelény Mucsony'. It includes fields for 'Input Work Item Type' (set to 'utas'), 'Inter-arrival times' (Average: 10), and 'Distribution' (Exponential). It also has checkboxes for 'First at start time', 'Unlimited arrivals', 'None', 'File', and 'Schedule Sheet'.
- Information Store:** A window showing a tree view with 'Global Data Item' and 'Spreadsheets / Arrays'. The '4040j' item is selected, leading to a 'Global Data Item' dialog box with options for 'Type' (Number, Text, Time, Spread Sheet, Multi-dimensional Array, Simulation Object).
- Sheet: 4040j:** A spreadsheet window showing a table with columns A, B, C, D, and E, and rows 1 through 21. The data in the table is as follows:

	A	B	C	D	E
1	280	2			
2	340	35			
3	345	31			
4	398	3			
5	418	42			
6	450	37			
7	523	16			
8	585	10			
9	640	6			
10	715	6			
11	768	8			
12	820	5			
13	825	10			
14	833	1			
15	905	2			
16	943	0			
17	1010	1			
18	1040	6			
19	1150	2			
20	1305	9			
21					

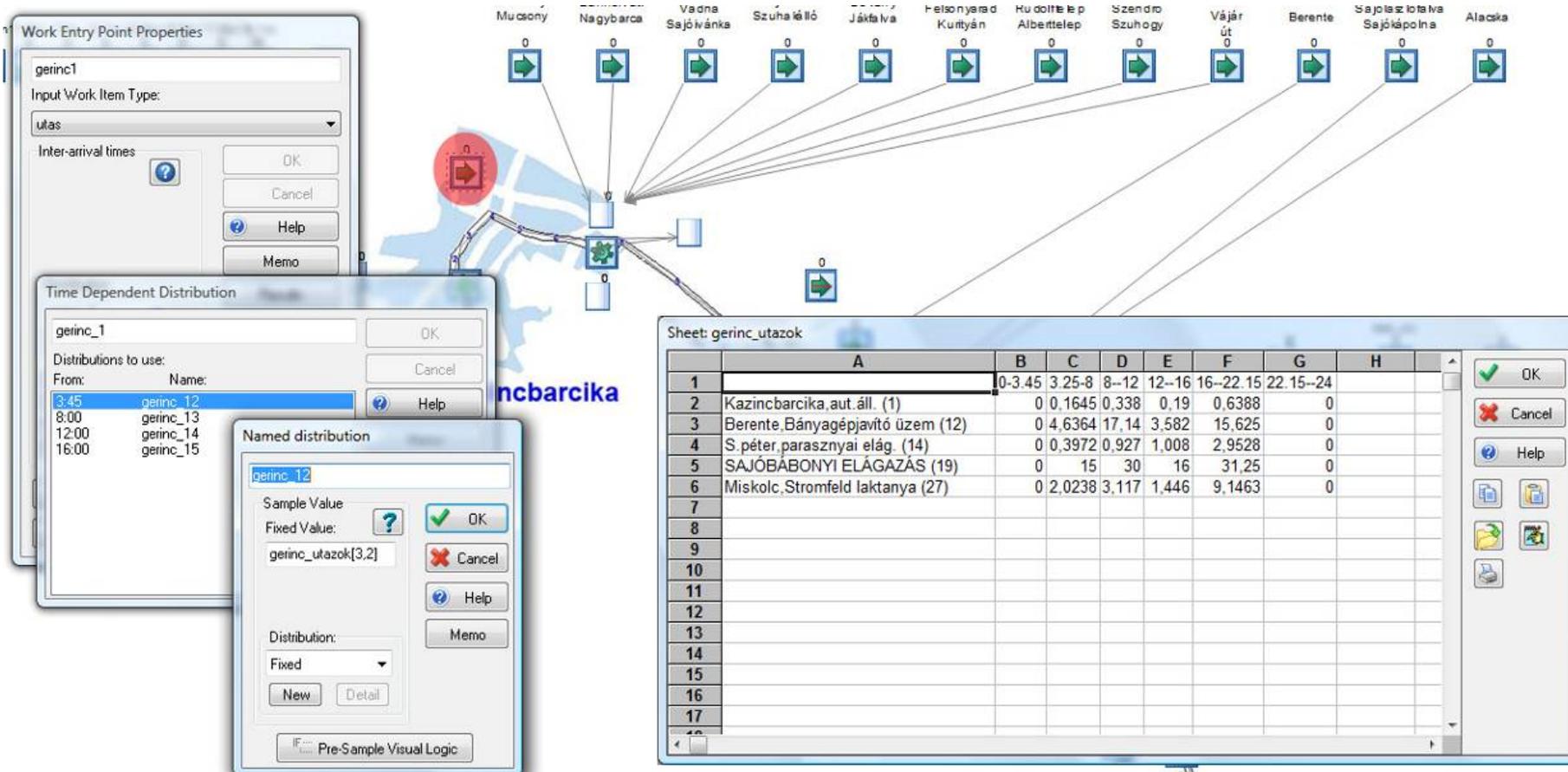
Anlage 7-1-14: Einstellungsmöglichkeiten des Parameters für die Änderung von Fahrgastzahlen



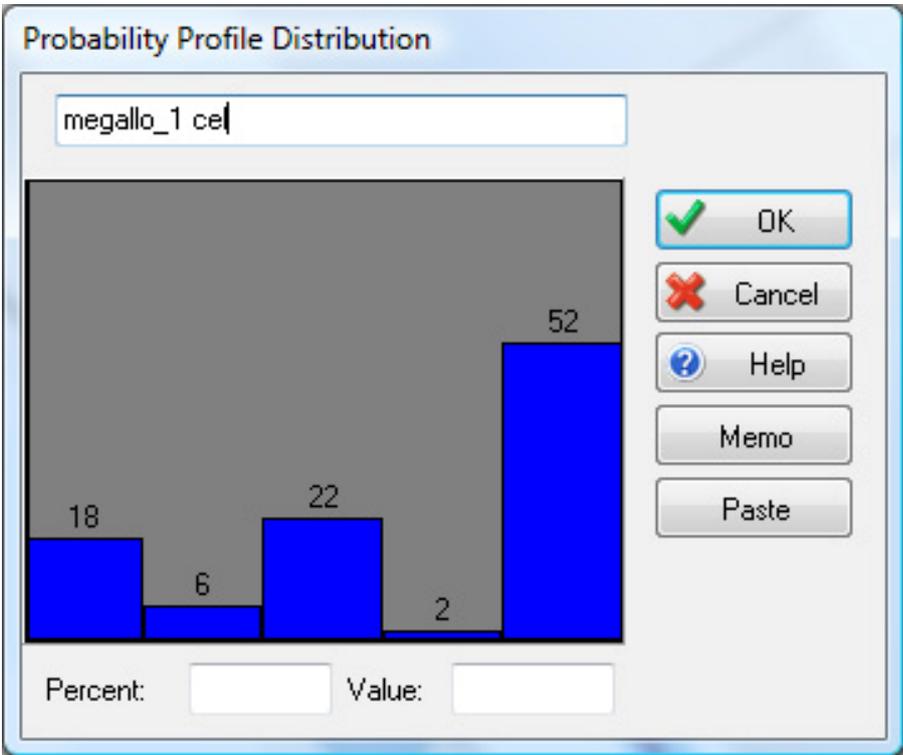
Anlage 7-1-15: Parametrierungsmöglichkeit für das Unterscheiden der Fahrgäste nach ihren Reisezielen



Anlage 7-1-16: Modellierung des Fahrgastverkehrs zwischen den Endpunkten der Relation



Anlage 7-1-17: Diagramm für die Angabe der Reiseziele der Fahrgäste, die zwischen den beiden Städten reisen



Anlage 7-1-18: Angabe der Parameter der Fahrzeuge und die von ihnen zusammengestellte Flotte

Fahrzeugflotte

11m 11,5 m 11,9m 12m 12,7m 12,9m 16,5m 17,9m 18,1m Flotta

Resource Properties

Properties: Visual Logic

18,1m Typ Anzahl der Fahrzeuge

Number of this type of resource available: 5

Shift Dependent Pool Resource Auto adjust replicate levels

Finance Erase

Resource Financial Information

Capital cost / resource unit: F

Cost per unit per minute: 243.9199€

Members of this Resource Pool

All available Resources Resources in this Pool

18,1m 17,9m 16,5m 12,9m 12,7m 12m

Timing Depends on resource Priority List Sequence Circulate

Aggtelek Tris Ragály Zubogy Felsőkelecsény Felsőnyárad Kurtyán Kánó, F. Atelekes Rudabánya Ormosbánya Izsófalva Rudolftelep Alberttelep Jósvaló Szin, Szöglet Parkupa Szabanna Szendrő Szuhogy Kazinóbarokk Vájár út Berente Varbó Parasnya Radostyán Kondó Sajószőlőfalva Sajókápolna

0 0 0 0 0 0

Flotta

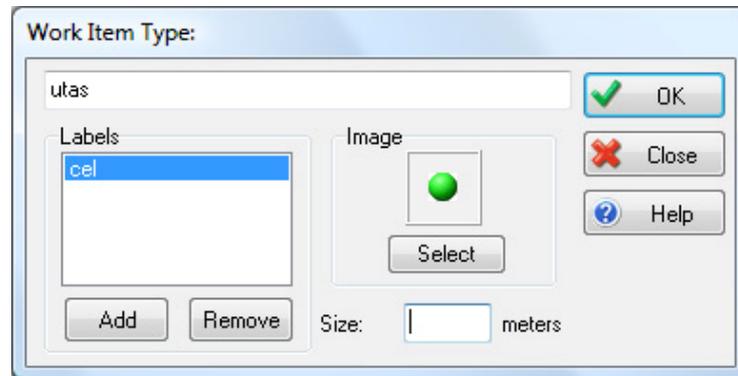
Number of this type of resource available: 10

Finance Erase

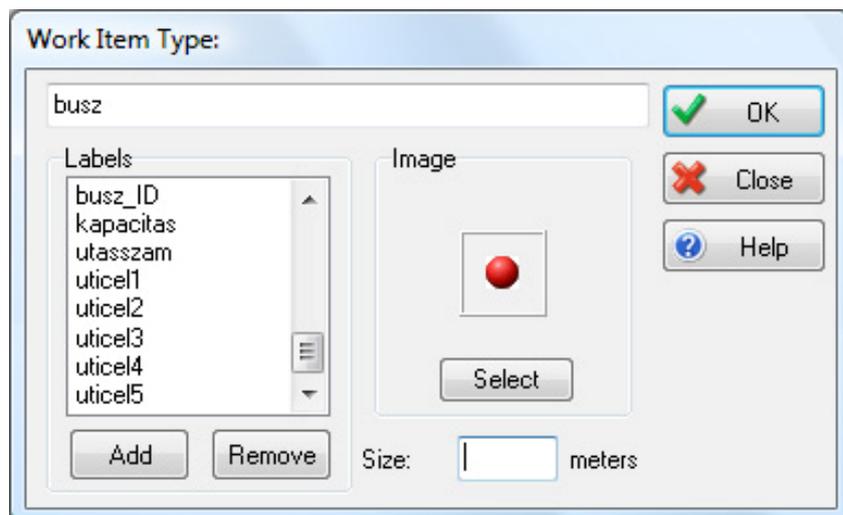
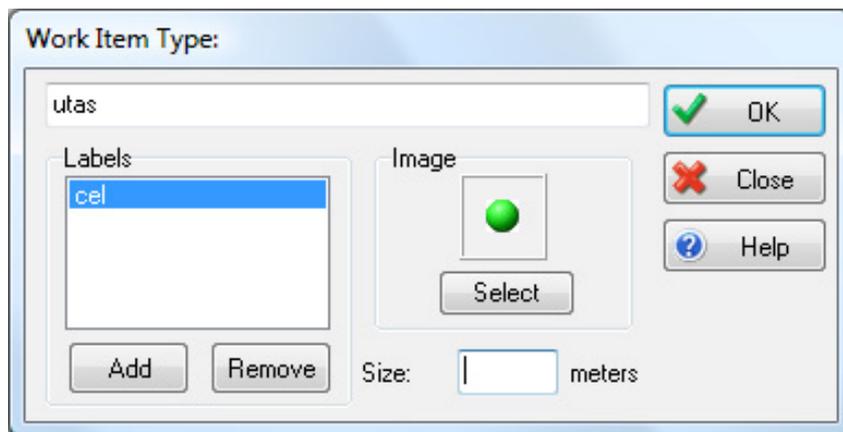
spezifische Betriebskosten des ausgewählten Fahrzeugtyps

Fahrzeuglängen

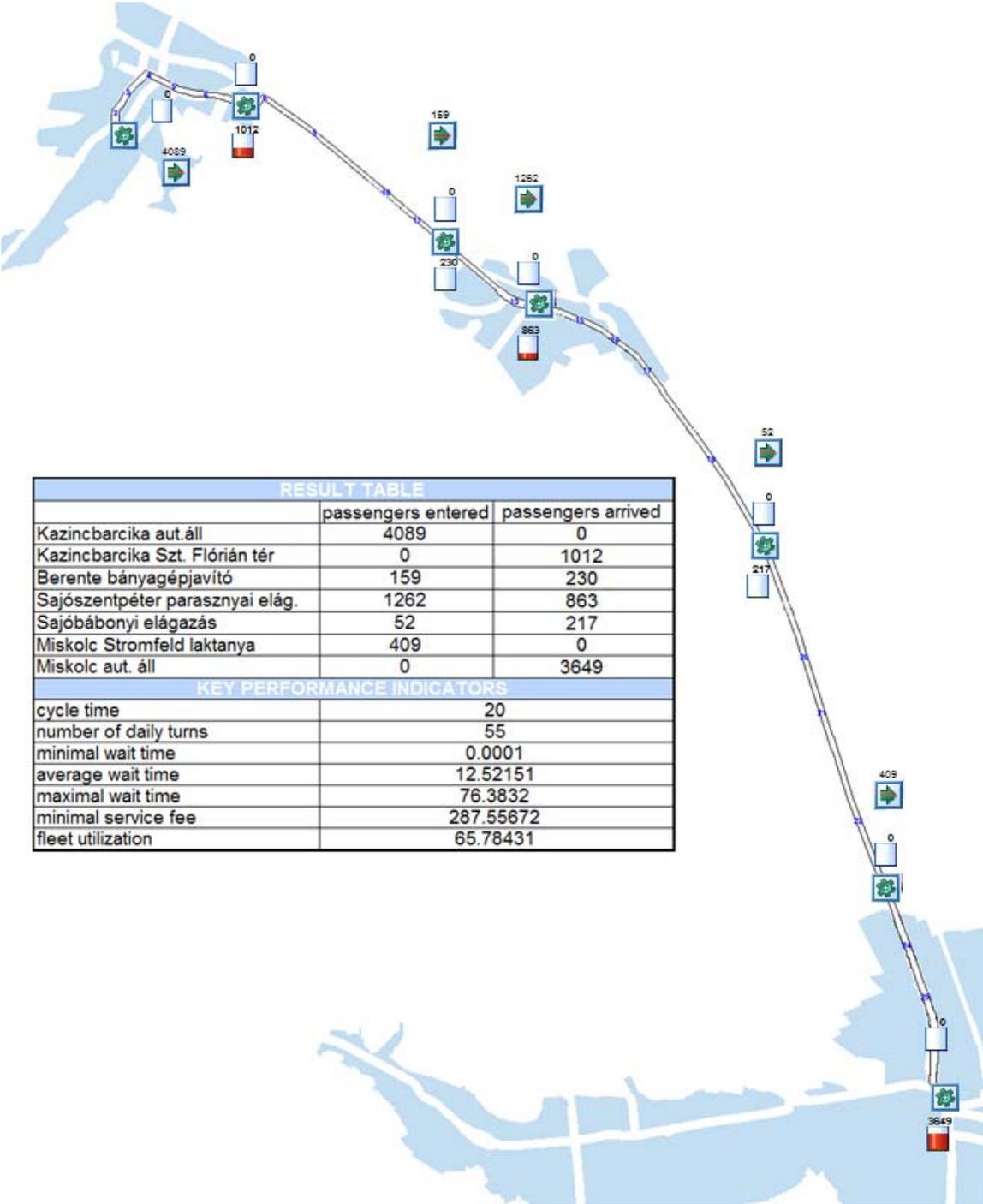
Anlage 7-1-19: Sich kontinuierlich ändernde Parameter der Passagiere im Ablauf der Simulation



Anlage 7-1-20: Sich kontinuierlich ändernder Parameter des Fahrzeugs („Bus“), was eine konkrete Fahrt verkörpert



Anlage 7-1-21: Durchschnittliche Ergebnisse von 50 Simulationsläufen



Anlage 7-1-22: Durchschnittliche Ergebnisse von 50 Simulationsabläufen
(mit Berücksichtigung der Daten von Sammelpassagieren)

RESULT TABLE		
	passengers entered	passengers arrived
Kazincbarcika aut.áll	4089	0
Kazincbarcika Szt. Flórián tér	1528	2246
Berente bányagépjavító	191	237
Sajószentpéter parasznyi elág.	2234	1215
Sajóbábonyi elágazás	52	217
Miskolc Stromfeld laktanya	409	0
Miskolc aut. áll	0	4588
KEY PERFORMANCE INDICATORS		
cycle time		20
number of daily turns		55
minimal wait time		0
average wait time		21,345754427849
maximal wait time		309,478
minimal service fee		201,928868634364
fleet utilization		65,7843137254902

Anlage 7-1-23: Fahrplan einer Fahrt der Borsod Volán AG

Sorszám	Megálló	Átlagos menetidő [perc]
1	Kazincbarcika, aut. áll.	0
2	K. barcika, Ifjúság t.	2
3	K. barcika, kórház	1
4	Kazincbarcika, vh.	1
5	Kazincbarcika, központi isk.	1
6	K. barcika, lemető	2
7	K. barcika, Szt. Flórián t. aut. vt.	2
8	K. barcika, VOLÁN tp.	1
9	K. barcika, BORSODCHEM IV. k.	2
10	Berente, PVC gyár b. út	2
11	Berente, Hőerőmű gy. felüljáró	1
12	Berente, Bányagépjavító üz em.	1
13	Sajószentpéter, Szabadság tp.	2
14	S. péter, parasznyi elág.	1
15	Sajószentpéter, posta	1
16	S. péter, edelényi elág.	2
17	Sajószentpéter, Kosuth u. 32.	2
18	Pilastanyai elág. [1]	2
19	SAJÓBÁBONYI ELÁGAZÁS	3
19	Sajóbábonyi megállók összesen	16
19	SAJÓBÁBONYI ELÁGAZÁS	0
20	Sajókeresztúri elág. [1]	3
21	Borsodi Erőelőkészítő Mű bej. u.	1
22	28. sz. fő u. Sz. besenyői elág.	3
23	Miskolc, Stromfeld laktanya	2
24	Miskolc, repülőtér bej. út	3
25	Miskolc, megyei kórház	2
26	Miskolc, Levente vezér u.	1
27	Miskolc, aut. áll.	3
	Összesen	63

Miskolcra:	3.45	<u>4.30</u>	M4.45	<u>M5.00</u>	5.00		
<u>M5.15</u>	5.20	O5.30	<u>M5.30</u>	M5.40	<u>5.45</u>	<u>M6.00</u>	
M6.00	Z6.00	M6.05	<u>i6.15</u>	M6.15	Z6.30	M6.30	
<u>M6.35</u>	M6.45	M6.55	<u>M7.00</u>	Z7.00	M7.15	<u>i7.30</u>	
	7.30	M7.45	8.00	<u>M8.15</u>	8.30	9.00	X9.30
	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	M12.15	M12.30
	12.30	<u>12.55</u>	13.00	<u>M13.00</u>	<u>M13.20</u>	i13.20	<u>+13.30</u>
	13.30	M13.45	<u>M14.00</u>	14.00	M14.15	14.30	<u>i14.50</u>
M14.50	15.00	M15.15	15.30	<u>M15.50</u>	+16.00	16.00	
M16.15	16.30	17.00	17.30	18.00	<u>+18.00</u>	Z18.30	
M18.35	19.00	M19.30	A20.00	20.30	21.00	21.30	
M21.45	22.15						

empirische Gesamtfahrtzeit
(Erfahrungswert von Borsod Volán)

Anlage 7-1-24: Illustration der Anschlussprobleme der Sammelfahrten

KEY PERFORMANCE INDICATORS	
cycle time	20
number of daily turns	55
minimal wait time	0.0001
average wait time	12.52151
maximal wait time	76.3832
minimal service fee	287.55672
fleet utilization	65.78431

1

Key PERFORMANCE INDICATORS	
cycle time	20
number of daily turns	55
minimal wait time	0
average wait time	21,345754427849
maximal wait time	309,478
minimal service fee	201,928868634364
fleet utilization	65,7843137254902

2

Anlage 7-1-25: Streuung der Wartezeiten

The screenshot shows the SIMUL8 Results Manager interface. The 'KPIs' tab is selected, displaying a table for 'stat_ex'. The table compares 'Minimum Time in System', 'Average Time in System', and 'Maximum Time in System' against 'Low 99% Range' and 'High 99% Range' values.

		Low 99% Range	High 99% Range
stat_ex	Minimum Time in System	0.00	0.00
	Average Time in System	11.13	13.69
	Maximum Time in System	46.65	102.62

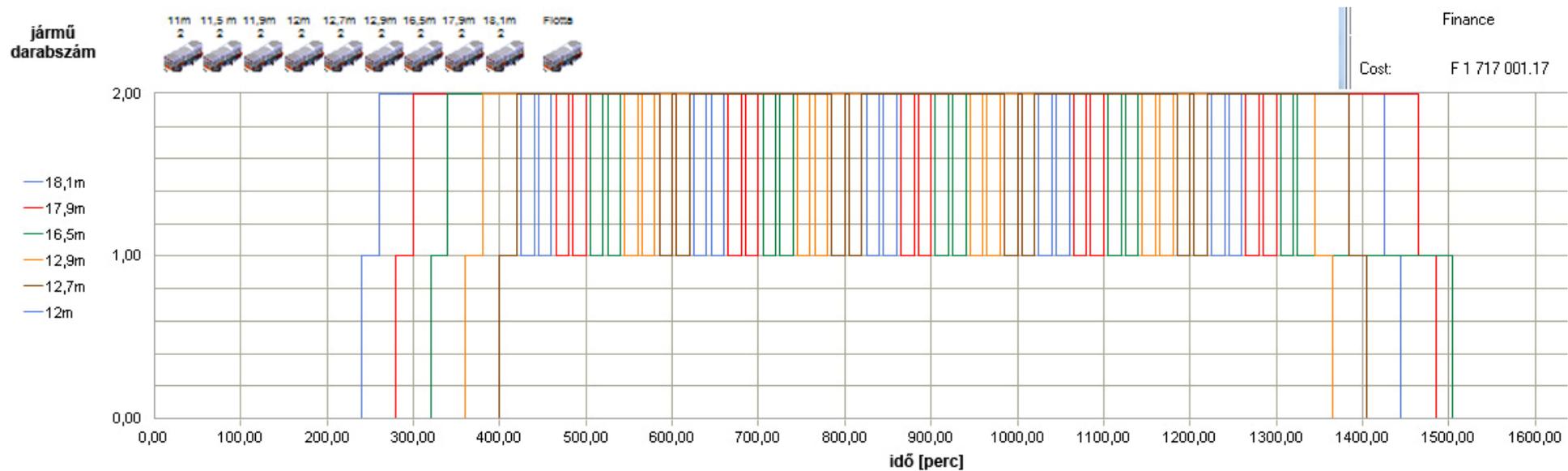
1

The screenshot shows the SIMUL8 Results Manager interface. The 'KPIs' tab is selected, displaying a table for 'stat_ex'. The table compares 'Minimum Time in System', 'Average Time in System', and 'Maximum Time in System' against 'Low 99% Range' and 'High 99% Range' values.

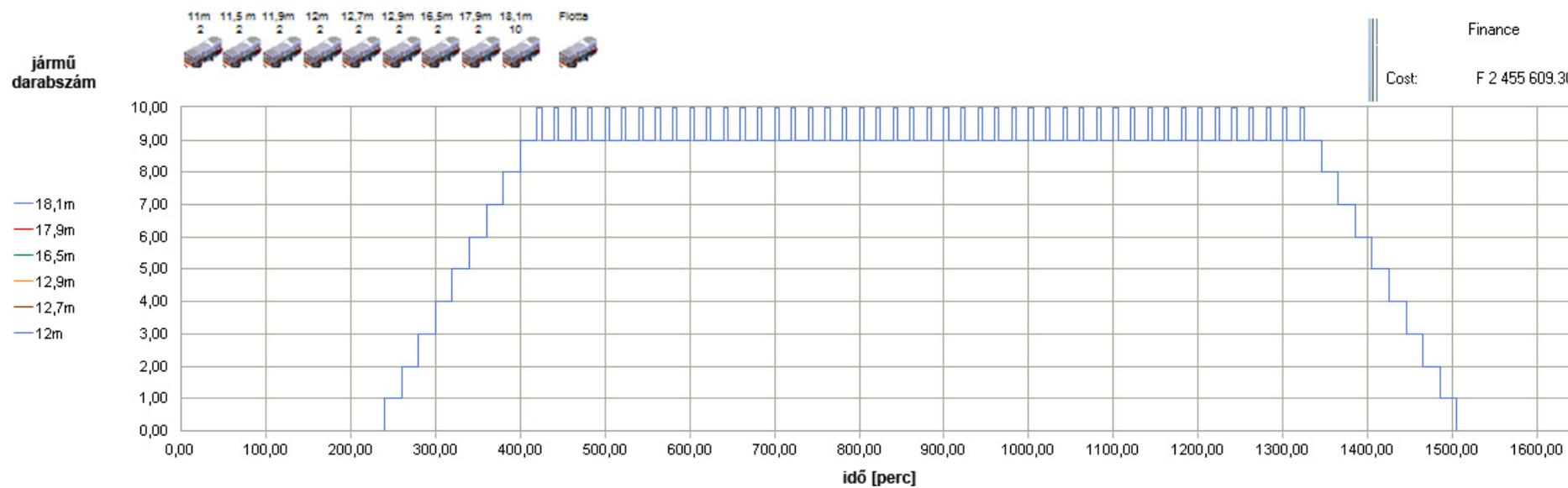
		Low 99% Range	High 99% Range
stat_ex	Minimum Time in System	0.00	0.00
	Average Time in System	12.39	27.45
	Maximum Time in System	172.57	401.31

2

Anlage 7-1-26: Auslastungsdiagramm der Fahrzeuge in der Simulation (1)



Anlage 7-1-27: Auslastungsdiagramm der Fahrzeuge in der Simulation (2)



Anlage 7-1-28: Wirkung der Modifikation der Flotte auf die Wartezeiten

RESULT TABLE		
	passengers entered	passengers arrived
Kazincbarcika aut. áll	4089	0
Kazincbarcika Szt. Flórián tér	1528	2246
Berente bányagépjavító	191	237
Sajószentpéter parasznyi elág.	2234	1215
Sajóbábonyi elágazás	52	217
Miskolc Stromfeld laktanya	409	0
Miskolc aut. áll	0	4588
KEY PERFORMANCE INDICATORS		
cycle time	20	
number of daily turns	55	
minimal wait time	0	
average wait time	12,0243384570152	
maximal wait time	211,7398	
minimal service fee	288,793284721848	
fleet utilization	45,5429864253394	

Anlage 7-1-29: Wirkung der Taktzeit auf die Kosten

UTEMES_MENETREND_REV4_0 SIMUL8 2009 Professional

File Edit Clock Trials Results Objects Graphics Professional Tools Finance Window Help

Speed: 66%

RESULT TABLE		
	passengers entered	passengers arrived
Kazincbarcika aut. áll	4089	0
Kazincbarcika Szt. Flórián tér	1511	2242
Berente bányagépjavító	191	237
Sajószentpéter parasznyi elág.	2234	1212
Sajóbábonyi elágazás	52	217
Miskolc Stromfeld laktanya	409	0
Miskolc aut. áll	0	4578

KEY PERFORMANCE INDICATORS	
cycle time	11
number of daily turns	99
minimal wait time	0
average wait time	6,39180612773981
maximal wait time	63,8116
minimal service fee	338,378775630207

Finance	
Cost:	F 2 871 482.29
Revenue:	F 0.00
.....	
Profit:	F -2 871 482.29

UTEMES_MENETREND_REV4_0 SIMUL8 2009 Professional

File Edit Clock Trials Results Objects Graphics Professional Tools Finance Window Help

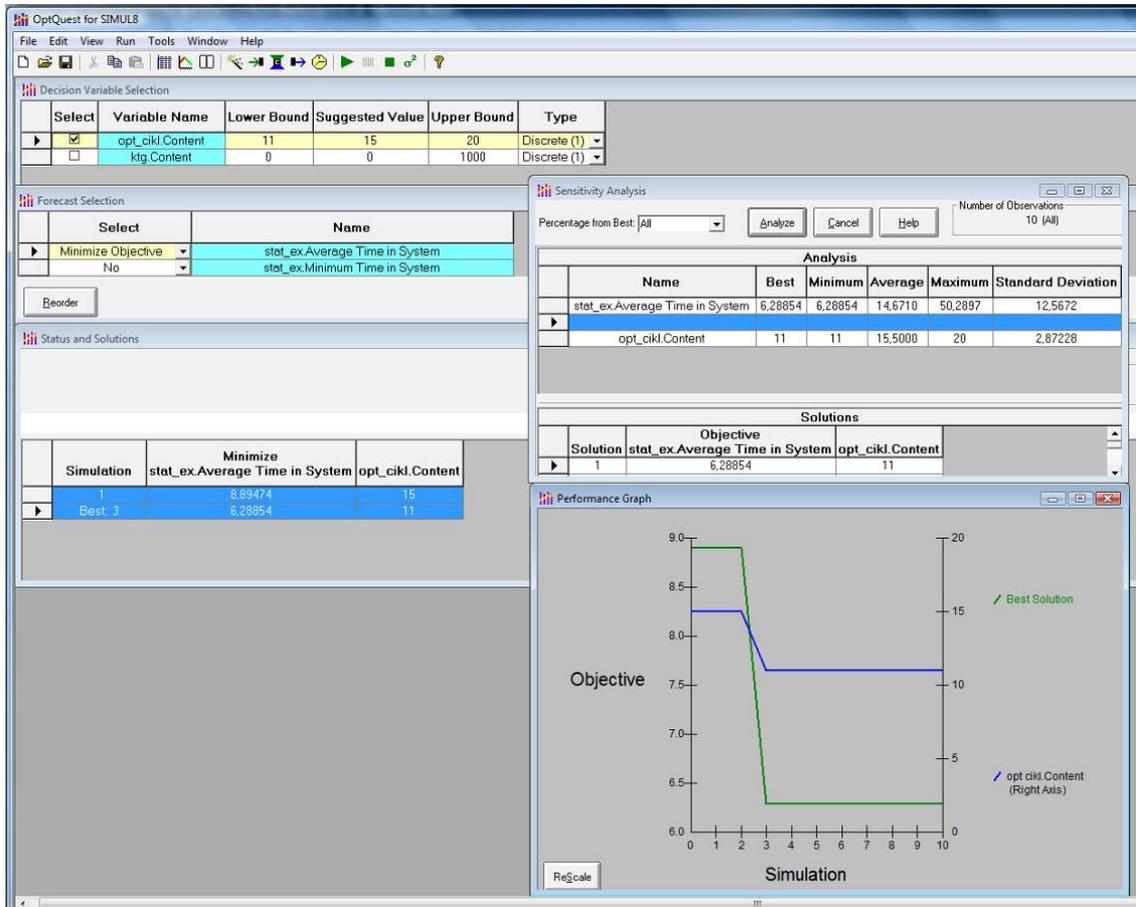
Speed: 66%

RESULT TABLE		
	passengers entered	passengers arrived
Kazincbarcika aut. áll	4089	0
Kazincbarcika Szt. Flórián tér	1528	2246
Berente bányagépjavító	191	237
Sajószentpéter parasznyi elág.	2234	1215
Sajóbábonyi elágazás	52	217
Miskolc Stromfeld laktanya	409	0
Miskolc aut. áll	0	4588

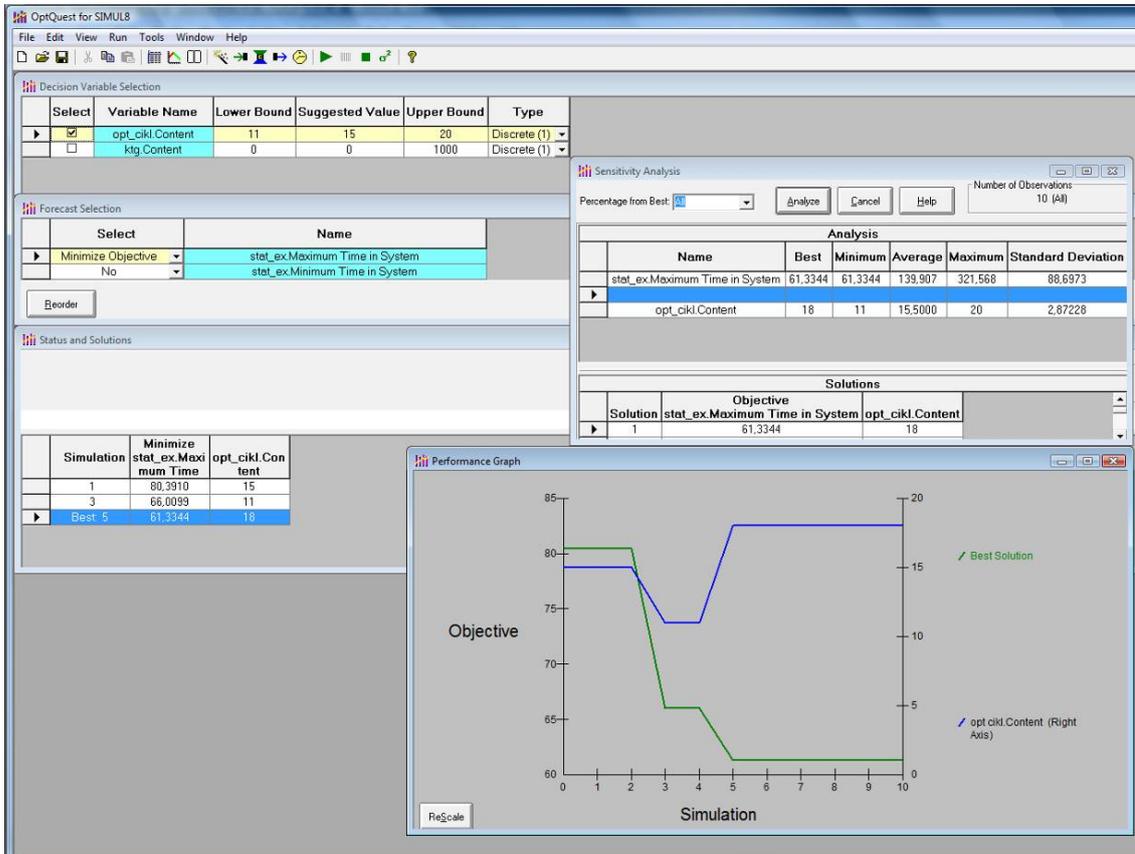
KEY PERFORMANCE INDICATORS	
cycle time	20
number of daily turns	55
minimal wait time	0
average wait time	21,345754427849
maximal wait time	309,478
minimal service fee	201,928868634364

Finance	
Cost:	F 1 717 001.17
Revenue:	F 0.00
.....	
Profit:	F -1 717 001.17

Anlage 7-1-30: Optimierung bzgl. der Verringerung der durchschnittlichen Reisezeiten



Anlage 7-1-31: Optimierung bzgl. der Verringerung der maximalen Reisezeiten



Anlage 7-1-32: Tabellen für die Auswahl von kostengünstigen Taktzeiten

UTEMES_MENETREND_REV4_0 SIMUL8 2009 Professional

File Edit Clock Trials Results Objects Graphics Professional Tools Finance Window Help

Speed: 66%

RESULT TABLE		
	passengers entered	passengers arrived
Kazincbarcika aut.áll	4089	0
Kazincbarcika Szt. Flórián tér	1511	2242
Berente bányagépjavító	191	237
Sajószentpéter parasznyi elág.	2234	1212
Sajóbábonyi elágazás	52	217
Miskolc Stromfeld laktanya	409	0
Miskolc aut. áll	0	4578
Key PERFORMANCE INDICATORS		
cycle time	11	
number of daily turns	99	
minimal wait time	0	
average wait time	6,39180612773981	
maximal wait time	63,8116	
minimal service fee	338,378775630207	

Finance

Cost: F 2 871 482.29

Revenue: F 0.00

Profit: F -2 871 482.29

UTEMES_MENETREND_REV4_0 SIMUL8 2009 Professional

File Edit Clock Trials Results Objects Graphics Professional Tools Finance Window Help

Speed: 66%

RESULT TABLE		
	passengers entered	passengers arrived
Kazincbarcika aut.áll	4089	0
Kazincbarcika Szt. Flórián tér	1562	2244
Berente bányagépjavító	191	237
Sajószentpéter parasznyi elág.	2234	1214
Sajóbábonyi elágazás	52	217
Miskolc Stromfeld laktanya	409	0
Miskolc aut. áll	0	4625
Key PERFORMANCE INDICATORS		
cycle time	18	
number of daily turns	61	
minimal wait time	0	
average wait time	7,71299011066635	
maximal wait time	61,3344	
minimal service fee	222,557000235215	

Finance

Cost: F 1 890 399.16

Revenue: F 0.00

Profit: F -1 890 399.16

Anlage 7-2 Detaillierte Daten der Fahrgastzählungen

Anlage 7-2-1: Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 03.45-08.00 Uhr an den Haltestellen der untersuchten Relation

HS Nr.	Haltestelle (HS)	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste																										
1	Kazincbarcika,aut.áll.	1	26	16	22	13	14	21	10	15	3	12	13	6	5	4	12	36	18	41	5	34	33	36	41	32	41	24
2	K.barcika,Ifjú munkás tér	3	14	7	6	10	5	7	4	1	1	3	1	0	6	0	4	3	4	3	15	7	10	7	0	11	5	6
3	K.barcika,kórház	2	10	8	5	5	3	3	2	5	0	1	1	7	2	5	3	11	6	8	8	22	8	16	1	14	7	5
4	Kazincbarcika,vh.	2	9	8	13	8	12	11	5	3	3	4	10	5	9	5	6	7	9	0	11	18	11	0	1	3	11	4
5	Kazincbarcika,központi isk.	0	13	8	9	8	17	15	11	11	0	5	12	8	6	6	13	10	11	10	7	15	10	13	2	8	10	11
6	K.barcika,temető	1	3	4	8	1	2	2	2	0	1	0	0	0	2	5	6	4	0	2	1	3	5	2	0	0	1	3
7	K.barcika,Szt.Flórián t.aut.vt	0	3	2	4	1	18	7	6	11	3	0	11	16	5	0	15	12	9	3	1	7	20	13	3	2	2	4
8	K.barcika,VOLÁN tp.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	K.barcika,BORSODCHEM IV.k	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	Berente,PVC gyár b.út	0	3	5	2	0	3	1	2	0	0	0	0	8	1	1	5	0	0	6	1	0	5	0	1	0	2	2
11	Berente,Hőerőmű gy. felüljáró	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Berente,Bányagépjavító üzem	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
13	Sajószentpéter,Szabadság tp.	1	0	14	0	24	0	0	21	0	0	3	0	0	20	18	0	0	0	0	0	0	0	8	0	3	1	6
14	S.péter,parasznyai elág.	2	4	14	15	13	13	7	5	0	0	1	0	32	13	4	25	0	0	28	20	0	30	25	2	8	4	11
15	Sajószentpéter,posta	4	0	10	0	7	0	0	2	0	0	1	0	0	13	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	6
16	S.péter,edelényi elág.	4	0	10	3	4	2	8	5	0	0	0	0	15	4	2	15	0	0	22	20	0	13	8	3	2	0	5
17	Sajószentpéter,Kossuth u.32.	0	0	6	0	5	0	0	3	0	0	0	0	0	1	8	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	2	0
18	Piltatanyai elág.[1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	Faiskola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbábonyi elág.[2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	Sajóbábony,lakótelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbábony,ófalú bej.út	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbábony,gyártelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	SAJÓBÁBONYI ELÁGAZÁS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Sajókeresztúri elág.[1]	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	Borsodi Ércelőkészítő Mű bej.u	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
22	26.sz.fő.u.Sz.besenyői elág.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	Miskolc,Stromfeld laktanya	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
24	Miskolc,repülőtér bej.út	0	0	20	2	1	11	5	11	0	9	0	1	0	2	0	0	0	0	0	10	0	0	2	0	0	0	0
25	Miskolc,megyei kórház	2	0	0	0	3	0	1	0	1	3	0	3	0	0	0	0	0	0	1	5	3	6	13	0	5	4	0
26	Miskolc,Levente vezér u.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	Miskolc,aut.áll.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anlage 7-2-2: Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 08.00-12.00 Uhr
an den Haltestellen der untersuchten Relation

HS Nr.	Haltestelle (HS)	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste										
1	Kazincbarcika,aut.áll.	17	36	30	32	50	30	22	41	16	18	
2	K.barcelona,Ifjúmunkás tér	2	13	5	2	10	6	3	6	1	4	
3	K.barcelona,kórház	0	10	13	15	10	10	3	8	3	5	
4	Kazincbarcika,vh.	9	9	5	16	10	5	16	3	7	6	
5	Kazincbarcika,központi isk.	5	11	19	10	12	6	6	3	3	8	
6	K.barcelona,temető	1	6	1	4	4	5	1	3	3	1	
7	K.barcelona,Szt.Flórián t.aut.vt	0	32	1	7	7	11	7	11	6	4	
8	K.barcelona,VOLÁN tp.	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
9	K.barcelona,BORSODCHEM IV.k	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	
10	Berente,PVC gyár b.út	1	3	1	0	0	0	4	0	1	0	
11	Berente,Hőerőmű gy. felüljáró	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	Berente,Bányagépjavító üzem	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	
13	Sajószentpéter,Szabadság tp.	0	4	7	1	2	6	1	2	5	0	
14	S.péter,parasznyi elág.	20	9	4	20	27	4	10	8	12	0	
15	Sajószentpéter,posta	0	4	15	11	8	2	5	7	14	0	
16	S.péter,edelenyi elág.	1	1	2	1	8	3	5	1	14	0	
17	Sajószentpéter,Kossuth u.32.	0	0	2	3	0	3	2	4	1	0	
18	Piltatanyai elág.[1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Faiskola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbáony,lakótelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbáony,ófalú bej.út	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbáony,gyártelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	SAJÓBÁONYI ELÁGAZÁS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	Sajókeresztúri elág.[1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	Borsodi Ércelőkészítő Mű bej.u	0	4	0	0	0	0	1	3	0	0	
22	26.sz. fő.u.Sz.besenyői elág.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	Miskolc,Stromfeld laktanya	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
24	Miskolc,repülőtér bej.út	0	0	0	11	12	3	0	1	0	3	
25	Miskolc,megyei kórház	8	6	0	0	0	5	2	6	5	12	
26	Miskolc,Levente vezér u.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	Miskolc,aut.áll.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Anlage 7-2-3: Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 12.00-16.00 Uhr an den Haltestellen der untersuchten Relation

HS Nr.	Haltestelle (HS)	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste																			
1	Kazincbarcika,aut.áll.	24	41	31	42	46	21	42	25	13	20	25	26	61	32	26	22	7	32	13	20
2	K.barcelona,Ifjúmunkás tér	6	3	0	9	8	8	10	5	0	3	7	6	13	5	4	1	6	7	3	9
3	K.barcelona,kórház	5	5	1	3	11	2	7	1	3	2	0	2	8	5	5	0	10	2	6	2
4	Kazincbarcika,vh.	10	4	5	7	13	1	7	4	0	7	5	6	13	4	8	2	4	3	6	9
5	Kazincbarcika,központi isk.	5	10	8	9	14	2	8	6	2	3	2	1	10	2	3	2	7	10	1	9
6	K.barcelona,temető	3	1	0	1	7	0	16	0	1	1	0	1	3	3	2	0	2	0	1	3
7	K.barcelona,Szt.Flórián t.aut.vt	3	11	2	9	22	11	18	6	9	10	8	11	33	1	14	4	10	5	10	6
8	K.barcelona,VOLÁN tp.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	K.barcelona,BORSODCHEM IV.k	0	0	0	0	0	0	3	0	4	1	3	0	1	0	0	1	0	3	0	0
10	Berente,PVC gyár b.út	1	0	1	0	0	1	0	6	0	1	4	6	10	0	4	2	5	0	0	4
11	Berente,Hőerőmű gy. felüljáró	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	3	0	0	0	0	1	1	0	0	3
12	Berente,Bányagépjavító üzem	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	4	3	0	0	0
13	Sajószentpéter,Szabadság tp.	7	0	6	0	6	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
14	S.péter,parasznyi elág.	14	0	7	5	2	8	10	4	1	0	1	1	5	5	1	2	4	1	4	2
15	Sajószentpéter,posta	6	0	7	0	7	7	3	0	0	1	4	0	3	5	0	3	3	1	0	5
16	S.péter,edelenyi elág.	4	0	5	2	5	1	19	13	0	1	0	5	5	0	0	2	2	0	2	6
17	Sajószentpéter,Kossuth u.32.	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0
18	Piltatanyai elág.[1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Faiskola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbáony,lakótelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbáony,ófalú bej.út	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbáony,gyártelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	SAJÓBÁONYI ELÁGAZÁS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Sajókeresztúri elág.[1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	Borsodi Ércelőkészítő Mű bej.u	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	26.sz.fő.u.Sz.besenyői elág.	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0
23	Miskolc,Stromfeld laktanya	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	11
24	Miskolc,repülőtér bej.út	1	0	2	2	0	0	6	17	6	0	6	3	0	3	2	2	10	1	2	0
25	Miskolc,megyei kórház	1	0	5	7	0	1	0	9	7	0	3	4	4	9	9	9	14	3	1	0
26	Miskolc,Levente vezér u.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
27	Miskolc,aut.áll.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anlage 7-2-4: Anzahl der einsteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 16.00-22.15 Uhr an den Haltestellen der untersuchten Relation

HS Nr.	Haltestelle (HS)	Anzahl der einsteigenden Fahrgäste													
		14	13	39	35	37	10	8	12	11	17	2	5	9	
1	Kazincbarcika,aut.áll.	14	13	39	35	37	10	8	12	11	17	2	5	9	
2	K.barcika,Ifjúmunkás tér	5	9	11	2	3	4	1	6	1	7	3	0	1	
3	K.barcika,kórház	10	8	12	5	4	2	0	2	1	16	1	1	2	
4	Kazincbarcika,vh.	13	5	12	11	7	4	1	2	1	6	0	1	0	
5	Kazincbarcika,központi isk.	15	6	8	9	7	3	6	4	6	10	2	1	0	
6	K.barcika,temető	5	0	4	3	3	1	1	0	1	1	0	0	0	
7	K.barcika,Szt.Flórián t.aut.vt	7	18	16	4	1	3	0	4	5	5	1	3	4	
8	K.barcika,VOLÁN tp.	4	1	4	4	1	0	1	0	0	0	4	1	0	
9	K.barcika,BORSODCHEM IV.k	1	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	1	2	
10	Berente,PVC gyár b.út	1	3	3	0	2	0	0	0	6	2	0	1	2	
11	Berente,Hőerőmű gy. felüljáró	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	Berente,Bányagépjavitó üzem	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	
13	Sajószentpéter,Szabadság tp.	1	5	0	0	1	2	0	0	2	5	0	0	0	
14	S.péter,parasznyai elág.	4	1	2	3	4	7	1	8	1	11	1	1	0	
15	Sajószentpéter,posta	2	11	3	2	2	2	1	3	2	6	0	0	0	
16	S.péter,edelényi elág.	6	0	4	0	0	4	2	2	1	3	1	0	0	
17	Sajószentpéter,Kossuth u.32.	2	0	1	0	0	1	0	0	3	3	0	0	0	
18	Piltatanyai elág.[1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Faiskola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbáony,lakótelep	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbáony,ófalú bej.út	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbáony,gyártelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	SAJÓBÁONYI ELÁGAZÁS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	Sajókeresztúri elág.[1]	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
21	Borsodi Ércelőkészítő Mű bej.u	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	
22	26.sz.fő.u.Sz.besenyői elág.	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	
23	Miskolc,Stromfeld laktanya	0	0	0	0	5	0	0	0	0	2	0	0	0	
24	Miskolc,repülőtér bej.út	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	8	15	0	
25	Miskolc,megyei kórház	0	0	1	0	0	0	0	1	0	4	0	0	0	
26	Miskolc,Levente vezér u.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	Miskolc,aut.áll.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Anlage 7-2-6: Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 08.00-12.00 Uhr an den Haltestellen der untersuchten Relation

HS Nr.	Haltestelle (HS)	Anzahl der aussteigenden Fahrgäste									
1	Kazincbarcika, aut.áll.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	K. barcika, Ifjúmunkás tér	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0
3	K. barcika, kórház	1	2	4	1	1	0	0	2	0	0
4	Kazincbarcika, vh.	2	9	0	0	5	0	5	6	0	0
5	Kazincbarcika, központi isk.	3	2	1	4	3	6	6	3	2	1
6	K. barcika, temető	0	9	4	13	5	11	2	17	1	1
7	K. barcika, Szt. Flórián t. aut. vt	0	2	0	7	3	5	4	5	2	4
8	K. barcika, VOLÁN tp.	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
9	K. barcika, BORSODCHEM IV. k	0	0	1	0	3	0	0	3	0	0
10	Berente, PVC gyár b. út	0	3	1	2	4	10	0	2	1	0
11	Berente, Hőerőmű gy. felüljáró	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
12	Berente, Bányagépjavitó üzem	0	0	2	1	0	7	0	0	0	0
13	Sajószentpéter, Szabadság tp.	0	0	4	4	3	0	6	0	2	0
14	S. péter, parasznyi elág.	1	2	9	13	9	0	10	9	15	0
15	Sajószentpéter, posta	0	5	2	4	6	0	2	3	3	0
16	S. péter, edelényi elág.	1	3	0	0	5	7	2	3	10	0
17	Sajószentpéter, Kossuth u.32.	0	1	3	3	3	0	1	0	3	0
18	Piltatanyai elág. [1]	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	Faiskola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbábonyi elág. [2]	0	2	2	1	0	0	0	2	0	0
0	Sajóbábonyi lakótelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbábonyi ófalu bej. út	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbábonyi gyártelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	SAJÓBÁBONYI ELÁGAZÁS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Sajókeresztúri elág. [1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	Borsodi Ércelőkészítő Mű bej. u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	26.sz. fő. u. Sz. besenyői elág.	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0
23	Miskolc, Stromfeld laktanya	0	0	0	0	5	0	1	0	11	0
24	Miskolc, repülőtér bej. út	4	0	9	4	6	0	8	3	1	5
25	Miskolc, megyei kórház	5	20	16	19	20	8	9	11	9	9
26	Miskolc, Levente vezér u.	0	2	0	0	0	0	6	3	0	0
27	Miskolc, aut. áll.	47	86	48	59	80	45	24	33	32	41

Anlage 7-2-7: Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 12.00-16.00 Uhr an den Haltestellen der untersuchten Relation

HS Nr.	Haltestelle (HS)	Anzahl der aussteigenden Fahrgäste																			
1	Kazincbarcika,aut.áll.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	K.barcelona,Ifjúmunkás tér	0	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
3	K.barcelona,kórház	0	3	2	3	8	0	7	2	1	0	0	0	1	2	2	2	0	3	0	
4	Kazincbarcika,vh.	6	5	5	2	0	1	3	3	1	4	1	5	5	1	3	2	3	7	2	
5	Kazincbarcika,központi isk.	4	4	5	6	2	0	3	3	1	5	1	3	12	3	3	0	4	6	6	
6	K.barcelona,temető	4	4	0	8	1	0	8	2	3	5	1	1	4	2	8	7	4	2	5	
7	K.barcelona,Szt.Flórián t.aut.vt	5	4	2	8	11	2	10	15	4	2	0	2	35	8	6	2	0	6	1	
8	K.barcelona,VOLÁN tp.	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
9	K.barcelona,BORSODCHEM IV.k	1	0	0	0	4	4	1	0	1	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	
10	Berente,PVC gyár b.út	0	0	0	3	2	3	5	0	0	0	0	0	6	0	0	0	1	0	1	
11	Berente,Hőerőmű gy. felüljáró	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
12	Berente,Bányagépjavitó üzem	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	1	0	2	0	0	1	1	1	0	
13	Sajószentpéter,Szabadság tp.	1	0	3	0	9	5	8	0	5	1	12	0	5	2	0	4	3	1	0	
14	S.péter,parasznyai elág.	10	0	8	12	30	10	19	12	0	9	8	10	24	7	9	4	1	6	8	
15	Sajószentpéter.posta	5	0	2	0	5	2	8	0	6	5	10	0	12	0	0	3	1	1	0	
16	S.péter,edelényi elág.	7	0	4	8	7	6	4	0	1	2	1	3	7	2	0	1	2	4	0	
17	Sajószentpéter,Kossuth u.32.	3	0	9	0	7	5	4	0	1	3	8	0	4	1	0	2	2	1	0	
18	Piltatanyai elág.[1]	0	0	0	0	7	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
0	Faiskola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbábonyi elág.[2]	2	0	0	0	0	3	11	0	0	1	4	0	7	0	0	2	8	1	0	
0	Sajóbábonylakótelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbábonyófalubej.út	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	Sajóbábonygyártelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	SAJÓBÁBONYI ELÁGAZÁS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	Sajókeresztúri elág.[1]	0	0	1	0	2	0	4	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	
21	Borsodi Ércelőkészítő Mű bej.u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	26.sz.fő.u.Sz.besenyői elág.	0	0	1	0	2	0	1	0	1	0	5	0	3	0	0	5	1	0	0	
23	Miskolc,Stromfeld laktanya	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	Miskolc,repülőtér bej.út	16	24	13	15	16	0	3	5	0	0	1	3	3	1	5	1	8	2	1	
25	Miskolc,megyei kórház	10	7	2	7	8	2	2	7	3	0	1	5	12	3	4	6	17	5	0	
26	Miskolc,Levente vezér u.	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	
27	Miskolc,aut.áll.	19	22	20	24	19	16	48	47	19	0	15	40	28	42	38	18	35	22	25	

Anlage 7-2-8: Anzahl der aussteigenden Fahrgäste an Wochentagen im Zeitraum 16.00-22.15 Uhr an den Haltestellen der untersuchten Relation

HS Nr.	Haltestelle (HS)	Anzahl der aussteigenden Fahrgäste											
1	Kazincbarcika,aut.áll.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	K.barcelona,Ifjúmunkás tér	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	K.barcelona,kórház	0	0	1	0	1	1	0	0	0	2	0	0
4	Kazincbarcika,vh.	1	2	3	6	6	0	1	2	0	1	1	0
5	Kazincbarcika,központi isk.	2	2	7	10	8	1	2	4	2	1	0	1
6	K.barcelona,temető	10	9	7	4	1	0	3	1	0	0	1	0
7	K.barcelona,Szt.Flórián t.aut.vt	8	3	7	6	6	1	0	1	0	2	0	7
8	K.barcelona,VOLÁN tp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	K.barcelona,BORSODCHEM IV.k	1	0	0	1	1	0	0	0	2	10	2	0
10	Berente,PVC gyár b.út	2	9	4	4	2	0	1	1	1	18	1	0
11	Berente,Hőerőmű gy. felüljáró	0	0	3	0	0	0	0	0	0	5	0	0
12	Berente,Bányagépjavító üzem	0	1	4	1	0	0	0	0	0	1	0	0
13	Sajószentpéter,Szabadság tp.	4	1	7	6	4	2	1	1	0	1	1	0
14	S.péter,parasznyai elág.	7	6	11	7	15	5	1	4	7	2	3	2
15	Sajószentpéter,posta	1	1	4	0	1	2	0	1	0	0	1	3
16	S.péter,edelényi elág.	4	2	0	0	4	0	2	3	0	1	1	0
17	Sajószentpéter,Kossuth u.32.	0	3	2	0	1	4	3	1	0	0	1	0
18	Piltatanyai elág.[1]	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Faiskola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbátonyi elág.[2]	1	0	4	2	3	1	0	0	1	0	0	1
0	Sajóbátonyi,lakótelep	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbátonyi,ófalu bej.út	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	Sajóbátonyi,gyártelep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	SAJÓBÁTONYI ELÁGAZÁS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Sajókeresztúri elág.[1]	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
21	Borsodi Ércelőkészítő Mű bej.u	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0
22	26.sz.fő.u.Sz.besenyői elág.	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0
23	Miskolc,Stromfeld laktanya	3	4	8	0	0	0	0	0	1	6	0	0
24	Miskolc,repülőtér bej.út	10	16	7	1	4	1	1	9	14	35	0	1
25	Miskolc,megyei kórház	8	10	10	3	0	1	2	0	2	0	0	1
26	Miskolc,Levente vezér u.	0	2	0	2	0	0	0	0	1	2	0	2
27	Miskolc,aut.áll.	30	9	25	26	21	25	7	19	14	15	11	22

Anlage 7-3 Tabellen der Fahrpläne und Fahrgastzahlen von den Sammel- fahrten

Anlage 7-3-1: Daten der Fahrten im Knoten „Parasznya“, sortiert nach Ortschaften
der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Varbó, Parasznya, Radostyán, Kondó, Sajólászlófalva, Sajókápolna	00 -- 08	4:45	57
		5:14	27
		5:50	38
		6:05	10
		6:11	27
		6:16	57
		6:53	25
		7:03	110
		7:12	6
		7:29	42
	7:38	3	
	08 -- 12	8:13	20
		8:40	96
		10:20	38
		11:44	27
	12 -- 16	12:31	9
		13:10	47
		13:21	7
		14:00	10
		14:27	0
		14:56	3
		15:00	4
		15:12	4
	15:50	28	
	16 -- 00	16:45	4
		17:10	17
		17:56	9
		18:01	8
20:15		9	
21:14		5	
22:07		9	

Anlage 7-3-2: Daten der Fahrten im Knoten „Parasznya“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Alacska	00 -- 08	4:45	20
		5:11	18
		5:56	34
		7:09	50
		7:46	12
	08 -- 12	9:13	15
		11:45	10
	12 -- 16	12:32	10
		13:15	10
		14:11	8
		15:11	7
		15:51	1
	16 -- 00	17:11	4
		18:11	4
		20:16	10
		21:11	3
23:14		0	

Anlage 7-3-3: Daten der Fahrten im Knoten „Berente bányagépjavító“, sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Berente	00 -- 08	5:12	7
		5:46	1
		6:09	2
		6:59	7
		7:29	3
		7:59	3
	08 -- 12	9:59	2
		11:29	0
	12 -- 16	13:24	2
		14:25	1
		15:04	2
		15:54	0
	16 -- 00	16:19	2

Anlage 7-3-4: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Edelény, Mucsony	00 -- 08	4:20	2
		5:20	35
		5:25	31
		6:18	3
		6:38	42
		7:10	37
	08 -- 12	8:23	16
		9:25	10
		10:20	6
		11:35	6
	12 -- 16	12:28	8
		13:20	5
		13:25	10
		13:33	1
		14:45	2
		15:23	0
16 -- 00	16:30	1	
	17:00	6	
	18:50	2	
	21:25	9	

Anlage 7-3-5: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Nekézseny, Dédestapolcsány, Mályinka, Bánhorváti, Nagybarca	00 -- 08	5:21	16
		5:23	14
		5:27	40
		6:05	9
		6:28	24
	12 -- 16	13:30	16
	16 -- 00	21:30	15

Anlage 7-3-6: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Sajókaza, Szuhakálló	00 -- 08	5:20	14
	12 -- 16	13:20	21
	16 -- 00	21:20	9

Anlage 7-3-7: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit.

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Sajóvelezd, Putnok, Dubicsány, Sajógalgóc, Vadna, Sajóivánka	00 -- 08	5:21	8
		5:23	34
		5:25	4
		6:22	21
		6:35	27
		6:58	32
	12 -- 16	13:19	12
		13:21	13
		13:23	15
		14:36	0
	16 -- 00	21:22	15

Anlage 7-3-8: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Szuha fő, Zádorfalva, Alsószuha, Dövény, Jákfalva	00 -- 08	4:21	0
		5:23	27
		6:24	9
		6:33	14
		6:46	9
		6:53	23
		7:33	14
	08 -- 12	7:35	16
		9:23	2
	12 -- 16	11:53	2
		13:26	13
		13:56	1
		14:33	0
	16 -- 00	14:53	5
		16:07	3
16:28		6	
19:00		8	
		21:28	2

Anlage 7-3-9: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Aggtelek, Trizs, Ragály, Zubogy, Felsőkelecsény, Felsőnyárad, Kurityán	00 -- 08	5:26	91
		5:31	28
		6:08	5
		6:58	11
		6:59	12
	08 -- 12	8:40	14
		10:43	3
	12 -- 16	13:30	6
		13:31	12
	16 -- 00	16:49	3
		18:05	3
		20:03	6
		21:30	11

Anlage 7-3-10: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Kánó, Felsőtelekes, Alsótelekes, Rudabánya, Ormosbánya, Izsófalva, Rudolftelep, Mucsony(Alberttelep)	00 -- 08	5:13	30
		5:21	26
		5:51	17
		6:31	29
		6:46	18
		6:55	42
		7:14	17
		7:26	16
	7:50	8	
	08 -- 12	8:31	32
		9:39	2
		10:31	17
		11:31	15
	12 -- 16	13:19	7
		13:20	6
		13:21	16
		13:31	1
		14:11	9
		15:11	22
		15:15	0
15:51	3		
16 -- 00	16:39	12	
	17:15	8	
	20:31	4	
	21:16	15	

Anlage 7-3-11: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Jósvafő, Szinpetri, Szin, Szögliget, Perkupa, Szalonna, Szendrő Szuhogy	00 -- 08	4:25	2
		5:18	9
		5:20	10
		5:30	23
		6:31	33
		7:14	10
	08 -- 12	8:31	11
	12 -- 16	12:30	11
		13:18	7
		13:23	11
		14:26	38
	16 -- 00	17:50	2
		19:49	2

Anlage 7-3-12: Daten der Fahrten im Knoten „Kazincbarcika Szt. Flórián tér“,
sortiert nach Ortschaften der Linie und Tageszeit

Ortschaften der Linie	Tageszeit	Ankunftszeit	Fahrgastzahl
Kazincbarcika, Vájár út	00 -- 08	5:16	9
		5:31	4
		6:06	10
		7:16	12
	12 -- 16	13:16	2
	16 -- 00	21:16	0