Umlegung zeitlich differenzierter Nachfragematrizen: ein dynamisches Verfahren für Verkehrsplanung und Telematik

Autoren / Authors:

Markus Friedrich, PTV AG

Hofsäß, I., PTV AG, Karlsruhe

Peter Vortisch, PTV AG, Karlsruhe

Veröffentlicht in / Published in:

Friedrich, M., Hofsäß, I., Nökel, K., Vortisch, P. (2000): Umlegung zeitlich differenzierter Nachfragematrizen: ein dynamisches Verfahren für Verkehrsplanung und Telematik, Tagungsband zum 1. Aachener Kolloquium Mobilität und Stadt, *Schriftenreihe Stadt Region Land, Heft 69*, Institut für Stadtbauwesen RWTH Aachen, S. 99-109.

Umlegung zeitlich differenzierter Nachfragematrizen: Ein dynamisches Verfahren für Verkehrsplanung und Telematik

Autoren

Markus Friedrich, markus.friedrich@ptv.de, PTV AG, Karlsruhe

Ingmar Hofsäß, ingmar.hofsaess@ptv.de, PTV AG, Karlsruhe

Klaus Nökel, klaus.noekel@ptv.de, PTV AG, Karlsruhe

Peter Vortisch, peter.vortisch@ptv.de, PTV AG, Karlsruhe

1 Einleitung

Umlegungsverfahren stellen seit Jahrzehnten eine zentrale Methode der Verkehrsplanung dar. Sie dienen der Berechnung von Verkehrsströmen, von Belastungen und von Kenngrößen der Verbindungsqualität. Üblicherweise werden sogenannte statische Umlegungsverfahren eingesetzt, die eine über den Untersuchungszeitraum konstante Verkehrsnachfrage auf das Verkehrsnetz verteilen. Diese statische Betrachtungsweise, die für planerische Zwecke häufig genügt, wird aktuellen Anforderungen aus dem Bereich der Verkehrssteuerung nicht mehr gerecht. Hier ist eine genaue Modellierung der räumlichen und der zeitlichen Komponente von Ortsveränderungen notwendig. State-of-the-art Verkehrsnachfragemodelle können die Nachfrage in hoher zeitlicher Auflösung modellieren, so dass Nachfragematrizen auf Stundenbasis zur Verfügung stehen. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die verfügbare Kapazität in einem Verkehrsnetz im Laufe eines Tages auf Grund von Steuerungsmaßnahmen oder Baustellen schwanken kann. Praxistaugliche Umlegungsverfahren für die Planung großer Netze oder für den Einsatz im Rahmen der Verkehrssteuerung müssen daher in der Lage sein, die Dynamik von Nachfrage und Angebot abzubilden.

2 Definitionen und Lösungsansätze

Dem Problem der dynamischen Umlegung kann man sich von verschiedenen Seiten nähern. Da es aus diesem Grund an einheitlichen Definitionen mangelt, werden in diesem Kapitel die im folgenden verwendeten Begriffe dargelegt. Eine mathematisch formalere Beschreibung des Problems findet sich zum Beispiel in Cascetta und Cantarella (1993).

2.1 Gegenüberstellung von statischer und dynamischer Umlegung

Aufgabe der statischen Umlegung ist es, aus einer gegebenen Verkehrsnachfrage die resultierende Verkehrsbelastung auf den Strecken eines gegebenen Verkehrsnetzes zu bestimmen. Die Verkehrsnachfrage wird beschrieben in Form einer Quell-Ziel-Matrix F. Sie enthält die Zahl der Fahrten, die zwischen jedem Paar der im Verkehrsnetz definierten Quellen und Ziele im Betrachtungszeitraum stattfindet. Das Verkehrsnetz N hat eine bestimmte Topologie und eine Menge von Attributen, typischerweise Angaben zur Kapazität und Geschwindigkeit der einzelnen Strecken des Netzes. Sowohl die Nachfrage F als auch das Netz N sind zeitlich konstante Größen, d.h. es wird genau ein fixer Zeitraum betrachtet. Zur Lösung der statischen Umlegungsaufgabe gibt es eine Vielzahl von Verfahren, angefangen bei der einfachen inkrementellen Umlegung bis hin zu Gleichgewichtsverfahren.

Wie bei der statischen Umlegung besteht die Aufgabe der dynamischen Umlegung in der Berechnung der Verkehrsbelastungen im Netz aus der Verkehrsnachfrage, aber für den Fall einer zeitlich veränderlichen Nachfrage F(t) und einem zeitlich veränderlichen Netz N(t). Durch die Einbeziehung der Zeit wird die Aufgabe erheblich komplexer, was schon daran zu erkennen ist, dass bislang kaum ein Verfahren den Weg aus dem akademischen Bereich in die Praxis geschafft hat. Die Praxis verlangt aber zunehmend nach operativen Verfahren, da einerseits die Steuerungstechnik im Rahmen verkehrstelematischer Maßnahmen eine zeitdynamische Betrachtung des Verkehrsablaufs nahe legt und andererseits durch Fortschritte in der Verkehrsnachfragemodellierung die notwendige zeitliche Auflösung der Nachfrage inzwischen geleistet werden kann.

In Ermangelung geeigneter Verfahren wird manchmal hilfsweise eine statische Umlegung zeitlich geschichteter Nachfragematrizen verwendet, d.h. die Nachfrage wird z.B. in Stundenmatrizen zerlegt und diese werden dann statisch umgelegt. Das ist im Prinzip das Vorgehen bei einer „Spitzenstundenumlegung“ in der Planungspraxis. Der Unterschied zwischen dieser geschichteten statischen Umlegung und einer dynamischen Umlegung ist am folgenden einfachen Beispiel erkennbar (**Abbildung 1**). Das Beispiel umfasst drei Zeitintervalle, in deren mittlerem eine höhere Nachfrage als in den beiden anderen vorliegt. Diese Nachfrage soll nun auf ein einfaches Netz umgelegt werden, das aus drei hintereinander folgenden Strecken besteht. Dabei wird angenommen, dass die mittleren Fahrzeiten auf jeder Strecke gerade so lang wie ein Zeitintervall sind.

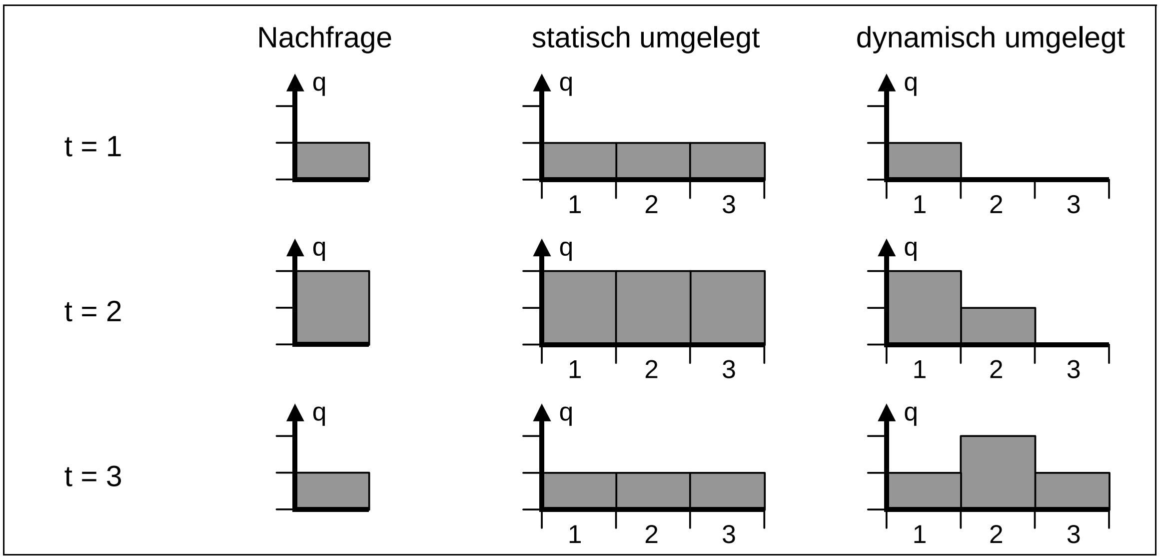


Abbildung 1: Umlegung einer zeitlich veränderlichen Nachfrage mit geschichteter statischer und dynamischer Umlegung

Es ist unmittelbar ersichtlich, dass die Modellierung durch das dynamische Verfahren realistischere Belastungen ergibt, auch wenn in manchen Anwendungen die vereinfachte Sicht ausreichen mag. Unter welchen Bedingungen eine dynamische Betrachtung zwingend erforderlich ist, hängt vom Zusammenspiel folgender Größen ab:

- Welcher Umlegungszeitraum t_U soll insgesamt betrachtet werden?
- In welcher zeitlichen Auflösung Δt soll die Verkehrsbelastung beschrieben werden?
- Wie groß sind die Reisezeiten t_R im betrachteten Netz?

In statischen Umlegungsverfahren wird angenommen, dass alle Fahrten im betrachteten Zeitraum abgeschlossen sind, d.h. dass $t_R \ll t_U$ gilt. Zudem gibt es per Definition keine zeitliche Auflösung, d.h. $t_U = \Delta t$. Wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, ist die Anwendung eines dynamischen Verfahrens vorteilhaft. Durch die Einführung einer Zeitachse in das Umlegungsverfahren ergeben sich auch Anforderungen an die räumliche Auflösung des Verkehrsnetzes. Die Fahrzeiten auf den kleinsten Einheiten des Netzes müssen deutlich kleiner sein als die Intervalllänge Δt, da sonst die zeitliche Auflösung im groben räumlichen Raster wieder verloren gehen würde.

2.2 Lösungsansätze

Statische Umlegungsverfahren sind im wesentlichen Routenwahlverfahren, d.h. die Wahl der Routen steht im Vordergrund während der Verkehrsablauf stark abstrahiert durch eine Widerstandsfunktion beschrieben wird. Da diese Verfahren keine Zeitachse haben, wird eine stationäre (und damit eben statische) Situation betrachtet.

Demgegenüber stehen die makroskopischen und mikroskopischen Verkehrsflussmodelle, deren methodischer Schwerpunkt die Abbildung des Verkehrsablaufs ist. Da bei diesem Ablauf gerade dynamische Effekte im Mittelpunkt des Interesses stehen, betrachten die Modelle naturgemäß den Verkehr im zeitlichen Verlauf, d.h. sie enthalten eine Zeitachse. Die zeitliche Auflösung ist dabei stark vom Anwendungszweck und von der Modellarchitektur abhängig; sie reicht von Zehntelsekunden bei mikroskopischen Fahrzeugfolge-Modellen bis zu rund 10 Minuten bei makroskopischen Flussmodellen für Autobahnen. Die Wahl der Routen wird in diesen Modellen meist nicht abgebildet. Die Routen sind stattdessen Teil der erforderlichen Modelleingaben.

Bei der dynamischen Umlegung spielen nun aber die Wahl der Routen und die Bewegung des Verkehrs durch das Netz gleichberechtigte Rollen. Somit ergeben sich zwei mögliche Ansätze zur Lösung, nämlich die Erweiterung der statischen Umlegungsverfahren um eine Abbildung des fließenden Verkehrs (vgl. Serwill, 1994) oder die Erweiterung der Verkehrsflussmodelle um eine Abbildung des Wegewahlverhaltens (vgl. Fellendorf, Vortisch, 2000). Bei dem im folgenden vorgestellten Verfahren handelt es sich um einen Ansatz aus der ersten Gruppe, also um die „Dynamisierung" eines bestehenden statischen Umlegungsverfahrens.

Besonderes Potenzial zur Begriffsverwirrung bieten die simulationsbasierten, mikroskopischen Ansätze zur dynamischen Umlegung. Sie bieten zum Teil die Möglichkeit, während der Fahrt eines simulierten Fahrzeugs regelmäßig oder bei besonderen Anlässen die Routenwahl neu zu treffen. Beliebtes Beispiel dafür ist eine interaktiv in die Simulation eingebrachte Störung, der die Fahrzeuge ausweichen, sobald sich die Verkehrsqualität in ihrem Umfeld hinreichend verschlechtert hat. Da es sich dabei zweifellos um eine dynamische Änderung des Routenwahlverhaltens handelt, wird dieser Vorgang manchmal auch als dynamische Umlegung bezeichnet. Nach Meinung der Autoren handelt es sich dabei aber nicht um eine dynamische Umlegung, da die Modellierung der spontanen Reaktion auf eine gerade eintretende Störung eine ganz andere Aufgabe darstellt als die Modellierung der resultierenden Verkehrsbelastung einer dauerhaften, wenn auch innerhalb des Betrachtungszeitraums zeitlich begrenzten Kapazitätsreduktion. Modelle zur dynamischen Umlegung können zwar die Situation beschreiben, die sich nach Einrichtung einer Baustelle, die täglich zwischen neun und elf Uhr eine Kapazitätsreduktion im Netz erzeugt, nach einigen Tagen stabil einstellen wird, sie können aber keine Aussage darüber machen, wie die Autofahrer im Moment des ersten Erfahrens dieser Baustelle individuell darauf reagieren.

3 Dynamische Umlegung

Das im folgenden vorgestellte Verfahren für eine dynamische Umlegung basiert auf der Erweiterung eines vorhandenen statischen Umlegungsverfahrens, dem Lernverfahren von Lohse (1997).

3.1 Statisches Lernverfahren von Lohse

Das Lernverfahren von Lohse bildet den "Lernprozess" der Verkehrsteilnehmer bei der regelmäßigen Benutzung des Netzes ab. Ausgehend von einer Alles-oder-Nichts-Umlegung berücksichtigen die Fahrer die Informationen der letzen Fahrt für die neue Routensuche. In einem iterativen Prozess, bei dem sich das Verfahren dem Nutzergleichgewicht annähert, werden mehrfach kürzeste Wege gesucht. Für die Routensuche jedes Iterationsschrittes wird ein geschätzter Widerstand verwendet. Dieser geschätzte Widerstand $\mathrm{Wid}^*_{\mathrm{akt}}$ ergibt sich aus dem aktuellen Widerstand $\mathrm{Wid}_{\mathrm{akt}}$ bei der aktuellen Belastung und aus dem zuletzt geschätzten Widerstand $\mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}}$. Der geschätzte Widerstand $\mathrm{Wid}^*_{\mathrm{akt}}$ wird dabei ermittelt mit:

$$\mathrm{Wid}^*_{\mathrm{akt}} = \mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}} + \Delta \times \left(\mathrm{Wid}_{\mathrm{akt}} - \mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}}\right)$$

Der Parameter Δ beschreibt die Lerngeschwindigkeit. Bei einem kleinen Δ lernt das Verfahren langsam und sicher, bei einem zu großen Δ ist die Konvergenz nicht sicher gegeben. Der Parameter Δ liegt zwischen 0 und 1. Δ kann als Konstante (i.d.R. $0{,}2 < \Delta < 0{,}6$) oder als Variable (vgl. **Abbildung 2**) in das Verfahren eingeführt werden.

Input	
$\mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}}$:	zuletzt geschätzter Widerstand
$\mathrm{Wid}_{\mathrm{akt}}$:	Widerstand bei aktueller Belastung
ΔUnten:	untere Grenze für Δ
ΔOben:	obere Grenze für Δ
V1, V2, V3:	Verfahrensparameter
Output	
$\mathrm{Wid}^*_{\mathrm{akt}}$:	geschätzter Widerstand, Grundlage für die nächste Routensuche
Berechnungsweg	

$$\mathrm{Wid}^*_{\mathrm{akt}} = \mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}} + \Delta \times \left(\mathrm{Wid}_{\mathrm{akt}} - \mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}}\right)$$

mit:

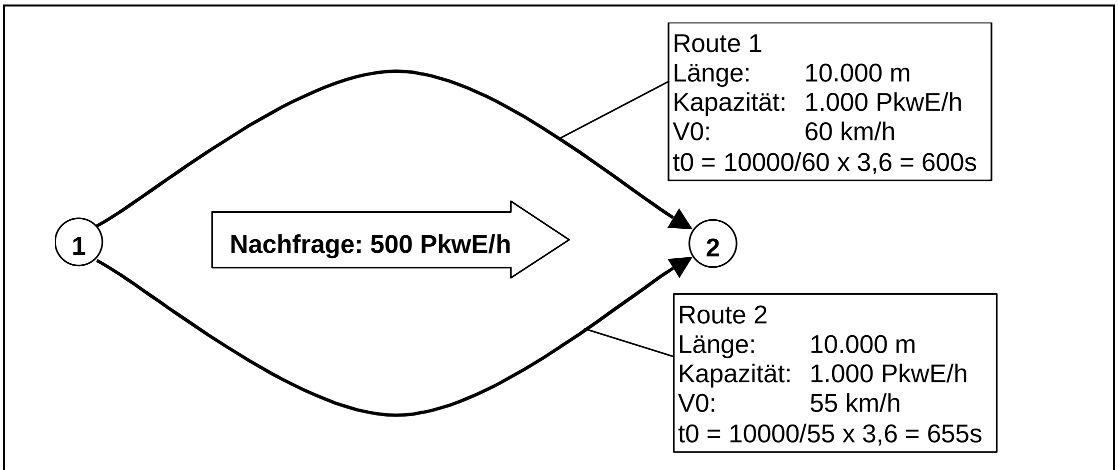
$$\Delta = \Delta\mathrm{Unten} + \frac{\Delta\mathrm{Oben} - \Delta\mathrm{Unten}}{(1+\mathrm{TT})^{f(\mathrm{TT})}}$$

$$f(\mathrm{TT}) = \mathrm{V1} \big/ \left(1 + e^{\mathrm{V2} - \mathrm{V3} \times \mathrm{TT}}\right)$$

$$\mathrm{TT} = \left|\mathrm{Wid}_{\mathrm{akt}} - \mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}}\right| \big/ \mathrm{Wid}^*_{\mathrm{alt}}$$

Abbildung 2: Ermittlung des Widerstandes für die Routensuche beim Lernverfahren mit variabler Lerngeschwindigkeit Δ

In jedem Iterationsschritt erfolgt im Anschluss an die Routensuche der Routensplit. Dabei wird die Nachfrage einer Quelle-Ziel-Beziehung gleichmäßig über alle Routen dieser Beziehung verteilt. Routen, die wiederholt gefunden wurden, werden entsprechend ihrer Häufigkeit berücksichtigt. Das Verfahren terminiert, sobald die Differenz der Streckenwiderstände zwischen zwei Iterationsschritten einen vorgegeben Wert unterschreitet. **Abbildung 3** veranschaulicht den Ablauf des statischen Lernverfahrens an einem Beispiel mit zwei Routen.



$$Wid_{akt} = t_0 \times \left(1 + \left(\frac{Belastung}{Kapazität}\right)^2\right)$$

$\Delta = 0{,}5$

Iteration	Route	Belastung [PkwE/h]	Wid_{akt} [s]	Wid^*_{akt} [s]	Häufigkeit
0	1	0	600	**600**	1
	2	0	655	655	0
1	1	500	750	675	1
	2	0	655	**655**	1
2	1	500/2 x 1 = 250	638	**656**	2
	2	500/2 x 1 = 250	695	675	1
3	1	500/3 x 2 = 333	667	...	
	2	500/3 x 1 = 167	673	...	

Der Widerstand der zeitkürzesten Route ist **fett** dargestellt.
Belastung (Route) = Nachfrage / Anzahl Iterationen x Häufigkeit (Route)

Abbildung 3: Beispiel für den Ablauf des statischen Lernverfahrens.

3.2 Dynamisches Lernverfahren

Die dynamische Version des Lernverfahrens übernimmt die Methode der Widerstandsschätzung und des Routensplits aus dem statischen Verfahren. Zur Modellierung der Dynamik wird der Umlegungszeitraum in z Zeitintervalle t_1 bis t_z mit gleicher Länge Δt unterteilt. Die Länge eines Zeitintervalls beträgt dabei je nach Datenverfügbarkeit und Anforderung i.d.R. 15, 30 oder 60 Minuten. Nachfragematrizen F_t für jedes Zeitintervall t beschreiben die zeitlich variable Nachfrage.

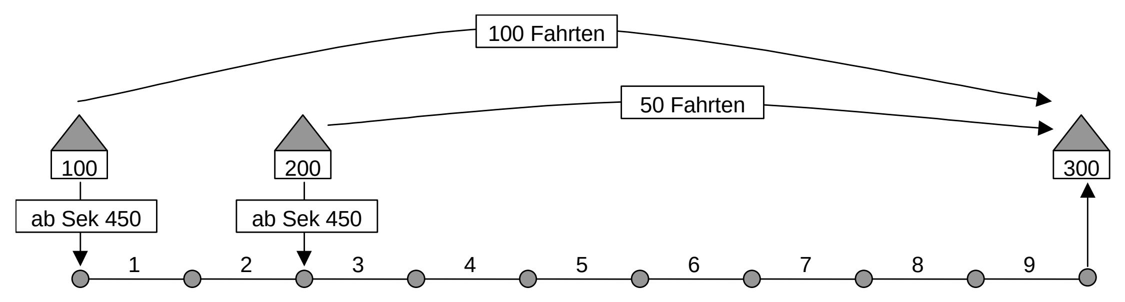
Zur Berücksichtigung der zeitabhängigen Bedingungen im Verkehrsnetz werden für jede Strecke bzw. jede Abbiegebeziehung je Zeitintervall folgende Attribute eingeführt:

- Kapazität Kap_t [Pkw-Einheiten/Zeitintervall]
- Belastung Bel_t [Pkw-Einheiten/Zeitintervall]
- Widerstand Wid_t [Sekunden]

Die Angabe einer Kapazität je Zeitintervall erlaubt es, Veränderungen im Verkehrsnetz abzubilden, die sich im Laufe des Tages z.B. durch Richtungswechselbetrieb oder tageszeitabhängige Wechselwegweisungen ergeben. Der Widerstand entspricht der Fahrzeit.

Startlösung des dynamischen Lernverfahrens, ist eine Bestweg-Umlegung (Alles-oder-Nichts-Umlegung), die für jedes Zeitintervall t durchgeführt wird. Da für jedes Zeitintervall zunächst im unbelasteten Netz gesucht wird, werden sich für eine Quelle-Ziel-Beziehung für alle Zeitintervalle die gleichen Routen ergeben, sofern sich die Kapazitäten im Umlegungszeitraum nicht ändern. Jede Route R_t wird nun mit der Nachfrage F_t des Zeitintervalls t belastet (Belastung $Bel_{R,t} = F_t$). Aus der Routenbelastung werden dann die Streckenbelastungen abgeleitet. Dazu wird für die Belastung, d.h. die Fahrzeuge einer Route R_t des Zeitintervalls t angenommen, dass sie in der Mitte des Zeitintervalls an der Quellzelle abfahren. Bei einem Umlegungszeitraum von 0 bis 24 Uhr, der in 96 Zeitintervalle mit je 15 Minuten bzw. 900 Sekunden unterteilt wird, ergibt sich so für das Zeitintervall t=1 beispielsweise als Abfahrtszeitpunkt die Sekunde 450. Aus der Abfahrtszeit an der Quellzelle und aus den zeitabhängigen Fahrzeiten der Strecken kann so der Zeitpunkt berechnet werden, an dem die Fahrzeuge einer Route den Anfang jeder Strecke entlang der Route erreichen. Eine Strecke wird mit den Fahrzeugen der Route in dem Zeitintervall belastet, das mit dem Einfahrtszeitpunkt übereinstimmt.

Abbildung 4 illustriert, wie die zeitabhängigen Belastungen und Widerstände für einzelne Strecken ermittelt werden. Das Beispiel zeigt ein Netz mit 3 Verkehrszellen und 9 gleichlangen Strecken. Die Länge eines Zeitintervalls beträgt 15 Minuten bzw. 900 Sekunden. Die Nachfrage beträgt 100 Fahrzeuge (von 100 nach 300) bzw. 50 Fahrzeuge (von 200 nach 300), die zur Sekunde 450 an der jeweiligen Quellzelle abfahren. Für jede Quellzelle ergeben sich damit spezifische Zeitpunkte, zu denen die Strecken erreicht werden. Da einige Strecken von den Quellzellen 100 und 200 im gleichen Zeitintervall erreicht werden, überlagern sich hier die Belastungen.



Strecke	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Länge [m]	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
Kapazität [PkwE/15min]	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Geschwindigkeit v0 [km/h]	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Widerstand / Fahrzeit im unbelasteten Netz									
Wid0* 0000-0900	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Wid0* 0900-1800	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Wid0* 1800-2700	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Streckenbelastung aus Route 1 von Bezirk 100 nach Bezirk 300 – Abfahrt Bezirk 100 Sekunde 450									
Abfahrtszeitpunkt [s]	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650
Bel 0000-0900	100	100	100	0	0	0	0	0	0
Bel 0900-1800	0	0	0	100	100	100	100	100	100
Bel 1800-2700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Streckenbelastung aus Route 2 von Bezirk 200 nach Bezirk 300 – Abfahrt Bezirk 200 Sekunde 450									
Abfahrtszeitpunkt [s]			450	600	750	900	1050	1200	1350
Bel 0000-0900			50	50	50	0	0	0	0
Bel 0900-1800			0	0	0	50	50	50	50
Bel 1800-2700			0	0	0	0	0	0	0
Gesamtbelastung									
Bel 0000-0900	100	100	150	50	50	0	0	0	0
Bel 0900-1800	0	0	0	100	100	150	150	150	150
Bel 1800-2700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Widerstand aus der Gesamtbelastung mit CR-Funktion									
Wid1 0000-0900	167	167	188	154	154	150	150	150	150
Wid1 0900-1800	150	150	150	167	167	188	188	188	188
Wid1 1800-2700	150	150	150	150	150	150	150	150	150
geschätzter Widerstand für nächste Routensuche Wid1 = Wid0* + 0,5 x (Wid1 - Wid0*)*									
Wid1* 0000-0900	158	158	169	152	152	150	150	150	150
Wid1* 0900-1800	150	150	150	158	158	169	169	169	169
Wid1* 1800-2700	150	150	150	150	150	150	150	150	150

Abbildung 4: Beispiel für die Ermittlung der zeitabhängigen Belastungen und Widerstände bei einer Zeitintervalllänge Δt von 15 Minuten bzw. 900 Sekunden. Die Nachfrage fährt zur Sekunde 450 an der Quellzelle ab.

Sobald die Streckenbelastungen ermittelt sind, können die aktuellen Widerstände und die geschätzten Widerstände für jedes Zeitintervall berechnet werden. Sie sind Grundlage für die Routensuche des nächsten Iterationsschrittes. Die weiteren Iterationsschritte unterscheiden sich vom ersten Iterationsschritt nur dadurch, dass sich die Nachfrage einer Beziehung gegebenenfalls auf mehrere Routen verteilt. Das Verfahren (**Abbildung 5**) wird beendet, sobald die Abbruchbedingungen erreicht werden.

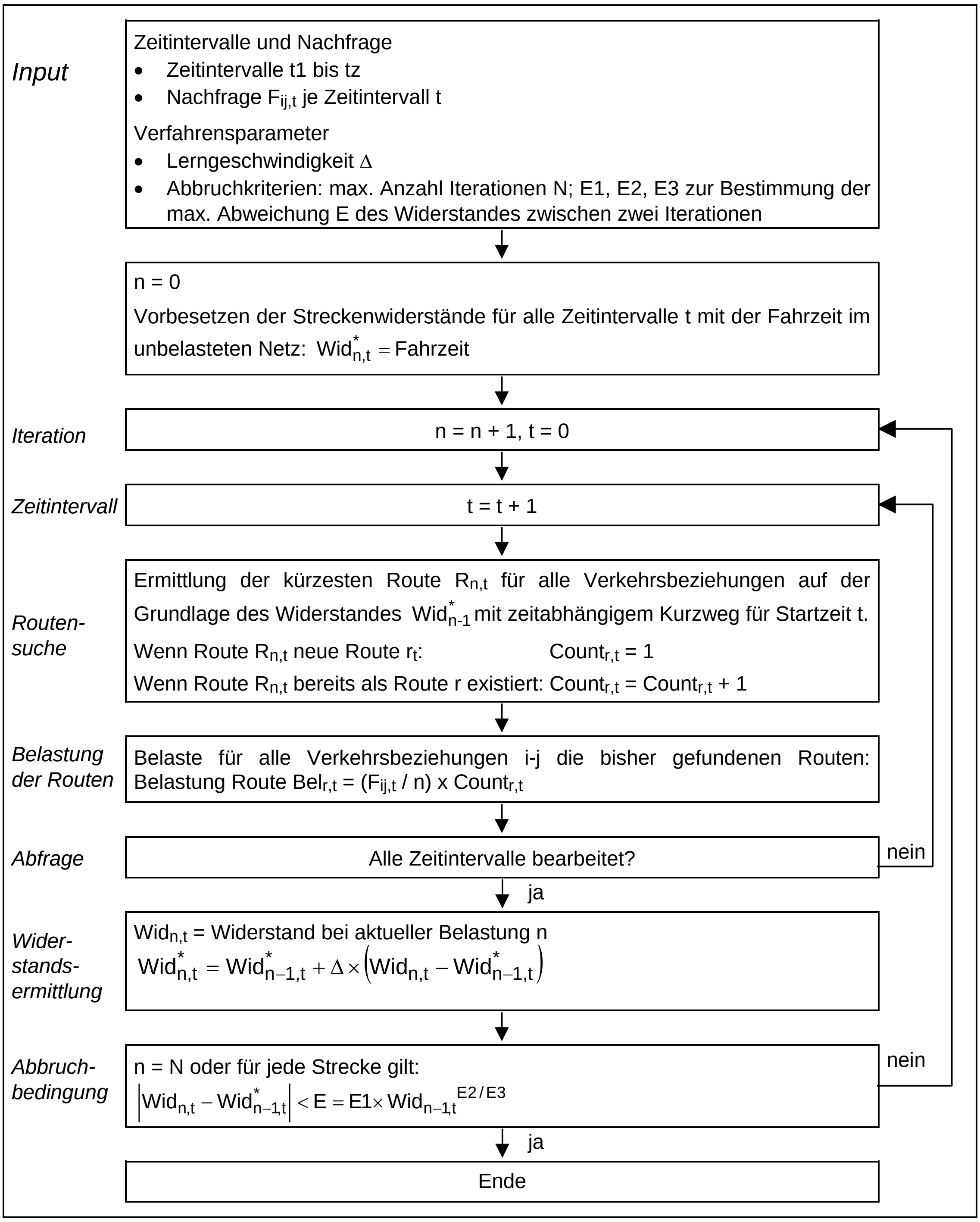


Abbildung 5: Ablauf des dynamischen Lernverfahrens

3.3 Zeitabhängige Kurzwegsuche

Der für die Routensuche verwendete Kurzwegalgorithmus muss für die dynamische Umlegung so modifiziert werden, dass er zeitabhängige Streckenwiderstände berücksichtigt. Da die Streckenwiderstände in jedem Zeitintervall unterschiedlich sein können, muss der Kurzwegalgorithmus sicherstellen, dass ein später abfahrendes Fahrzeug nicht vor einem früher abgefahren Fahrzeug am Ziel ankommt: Diese FIFO (first-in-first-out) Bedingung könnte sowohl bezogen auf eine Quelle-Ziel-Beziehung als auch bezogen auf eine Strecke bei folgenden Annahmen verletzt werden:

- *Quelle-Ziel-Beziehung:* Die FIFO Bedingung wird verletzt, wenn als Widerstände für die Routensuche die Widerstände verwendet werden, die zum Zeitpunkt der Abfahrt gültig sind. Fährt ein Fahrzeug z.B. im Zeitintervall der Verkehrsspitze ab, dann würden die Widerstände dieses Zeitintervalls in die Routensuche eingehen, auch wenn das Fahrzeug viele dieser Strecken erst später, nach der Verkehrsspitze, erreicht. Ein nach der Spitzenstunde abfahrendes Fahrzeug könnte dann aufgrund des netzweit geringeren Widerstandes vorher am Ziel ankommen.
- *Strecke*: Die FIFO Bedingung wird verletzt, wenn der zum Zeitpunkt der Einfahrt gültige Widerstand für die Ermittlung der Streckenfahrzeit verwendet wird. **Abbildung 6** zeigt den Unterschied zwischen einem Kurzweg, der mit konstanten Widerstand innerhalb einer Strecke arbeitet und einem Kurzweg, der den Widerstand zeitabhängig berücksichtigt. Unter Annahme eines konstanten Widerstandes zwischen Streckeneinfahrt und Streckenausfahrt wird in dem abgebildeten Beispiel die FIFO Bedingung verletzt, da ein später einfahrendes Fahrzeug das Streckenende vor einem zuvor eingefahrenen Fahrzeug erreichen kann.

Um die FIFO Bedingung sicherzustellen, verwendet der zeitabhängige Kurzwegalgorithmus nicht die zum Zeitpunkt der Abfahrt an der Quellzelle gültigen Widerstände, sondern die im Moment des Befahrens aktuellen Widerstände. Außerdem berücksichtigt er, dass sich die Widerstände entlang einer Strecke verändern können, wenn auf dieser Strecke ein Wechsel zwischen zwei Zeitintervallen stattfindet.

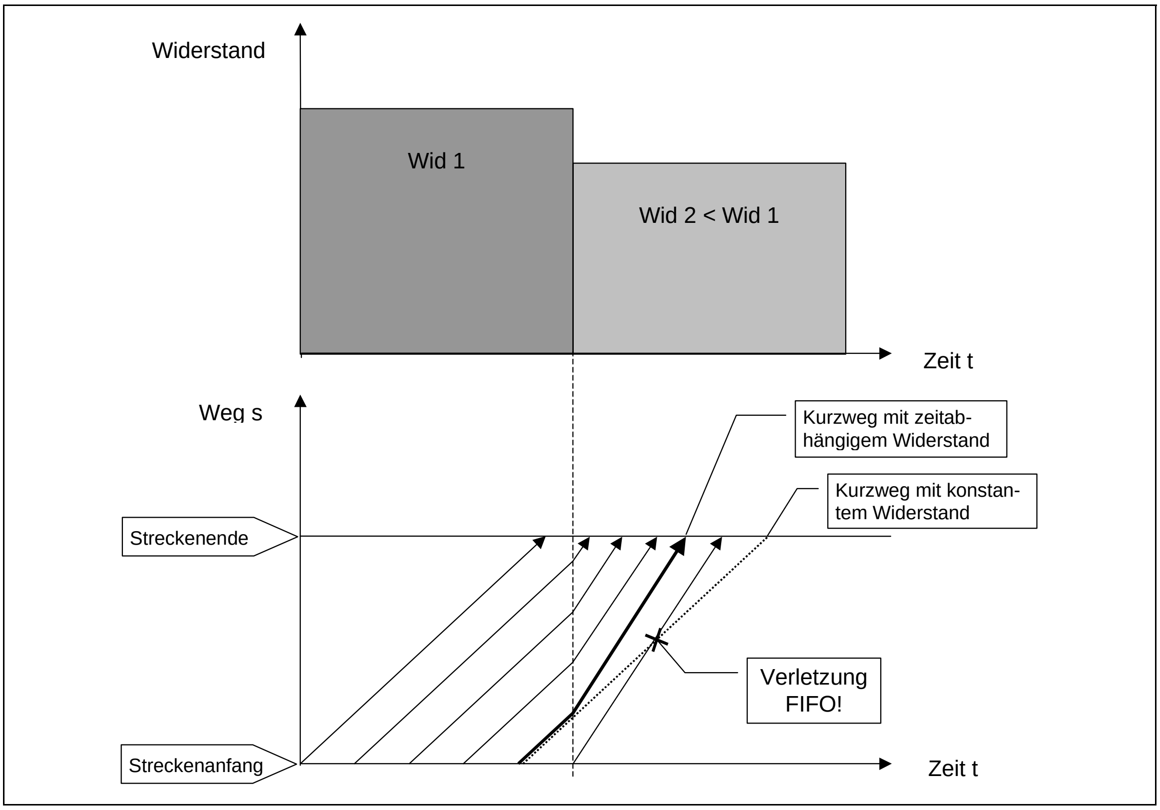


Abbildung 6: Vergleich der Kurzwegalgorithmen mit zeitabhängigem Widerstand und mit konstantem Widerstand

3.4 Beispiel

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für eine dynamische Umlegung. Das Verkehrsnetz besteht aus 3 Verkehrszellen und 24 Strecken, die alle die gleiche Länge (2.500 m) und die gleiche Kapazität (300 Pkw-E/15 Minuten) aufweisen. Die Geschwindigkeit im unbelasteten Netz beträgt 100 km/h bzw. 110 km/h. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten beträgt die Fahrzeit für die 50 km lange Strecke zwischen Zelle 100 und 300 über den Weg 1 rund 28,5 Minuten. Über den langsameren Weg 2 erhöht sich die Fahrzeit auf 30,0 Minuten. Trotzdem kann der Weg 2 eine sinnvolle Alternative darstellen, sobald die Fahrzeit auf Weg 1 aufgrund der Verkehrsbelastung zunimmt. Die Nachfrage ist für zwei Zeitintervalle 6:00 bis 6:15 und 6:15 bis 6:30 gegeben.

Nachfrage:

Von	Nach	6:00 – 6:15	6:15 – 6:30
100	300	100	125
200	300	50	75

Strecken:

- Länge: 2.500 m
- Kapazität: 300 Pkw-E/15 Minuten
- Geschwindigkeit v0: 100 bzw. 110 km/h

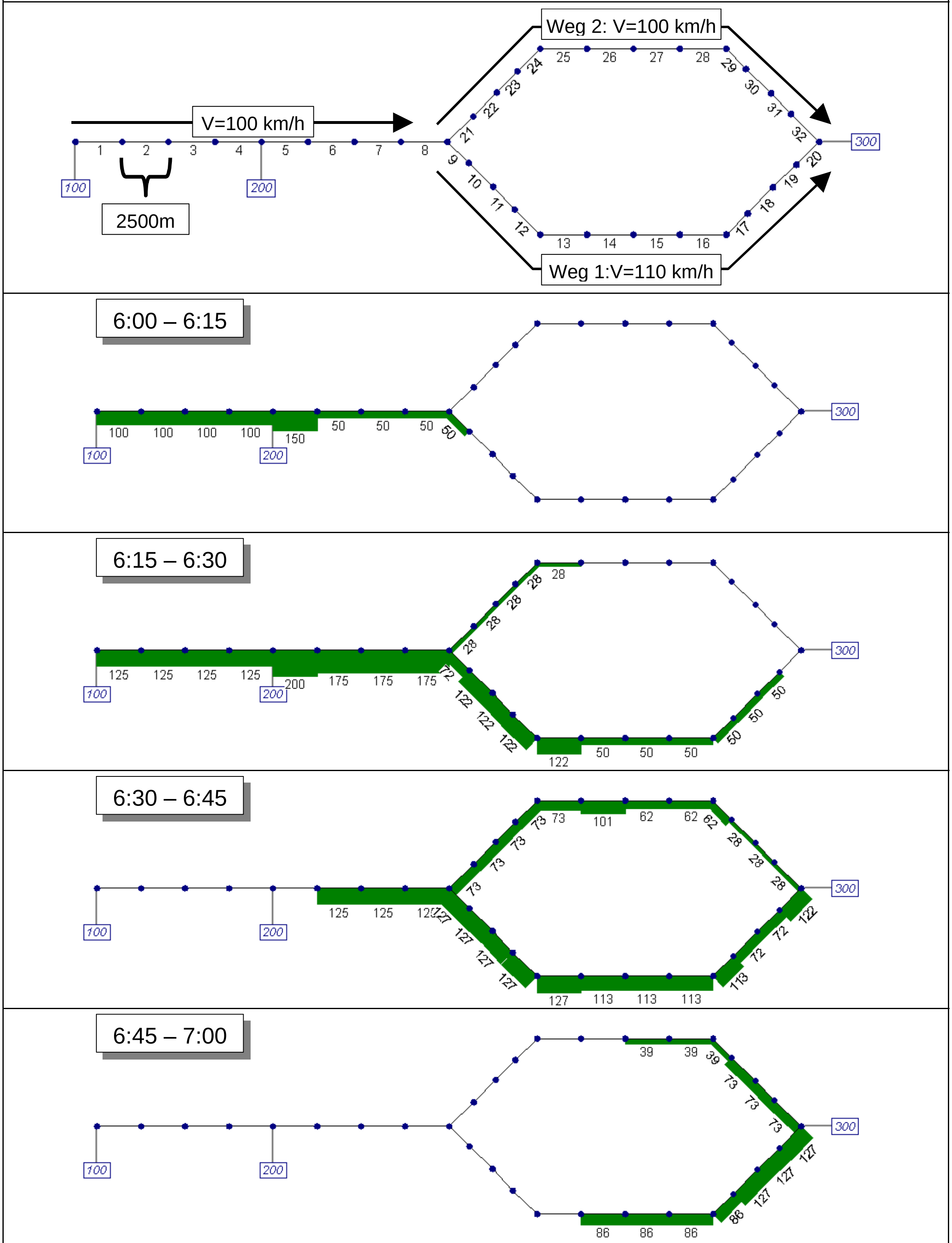


Abbildung 7: Beispiel

Die in **Abbildung 7** dargestellten Ergebnisse der dynamischen Umlegung lassen sich wie folgt interpretieren:

- *Zeitintervall 6:00 bis 6:15:* Das Belastungsbild zeigt, dass die Nachfrage von 100 Fahrten der Zelle 100 die Strecken 1 bis 5 erreicht. Die 50 Fahrten aus Zelle 200 kommen ebenfalls 5 Strecken weit. Alle 50 Fahrten wählen den schnelleren Weg 1.
- *Zeitintervall 6:15 bis 6:30:* Die 125 Fahrten, die die Zelle 100 im zweiten Zeitintervall verlassen, erreichen wieder die Strecken 1 bis 5. Die 75 Fahrten aus der Zelle 200 kommen jetzt allerdings nur mehr bis zur Strecke 8, da sich die Fahrzeit der Strecken 5 bis 9 aufgrund der 100 Fahrten (Zelle 100, Zeitintervall 1) erhöht hat. Von den 100 Fahrten der Zelle 100 wählen 72 % den Weg 1 und 28 % den Weg 2, da sich die Fahrzeit auf Weg 1 durch die Belastung so erhöht, dass Weg 2 eine Alternative darstellt.
- *Zeitintervall 6:30 bis 6:45:* Von den 75 Fahrten der Zelle 200 im zweiten Zeitintervall wählen 41 Weg 1 (55 %) und 34 Weg 2 (45 %). Die 125 Fahrten der Zelle 100 teilen sich im Verhältnis 69 % (86 Fahrten) zu 31 % (39 Fahrten) auf die Wege 1 und 2 auf. Die unterschiedlichen Aufteilungsverhältnisse ergeben sich aus den Fahrzeiten für Weg 1 und 2, die die Fahrten aus Zelle 100 bzw. 200 bei ihrem Eintreffen vorfinden. Die 75 Fahrten aus Zelle 200 (Zeitintervall 2) überlagern sich stark mit den 100 Fahrten der Zelle 100 (Zeitintervall 1). Die 125 Fahrten der Zelle 100 (Zeitintervall 2) befahren die Masche dagegen erst in einem etwas späteren Zeitraum mit geringeren Belastungen.

Um mit dem dynamischen Umlegungsverfahren gute Ergebnisse zu erzielen, sollten bei der Modellierung folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Die Qualität der Ergebnisse nimmt mit kürzeren Zeitintervallen und kürzeren Strecken zu. Kurze Strecken garantieren eine realistischere Überlagerung der Verkehrsströme.
- Die Länge der Strecken sollte so gewählt werden, dass die Fahrzeit jeder Strecke auch im belasteten Netz immer deutlich kleiner ist, als die Länge eines Zeitintervalls. Bei Zeitintervallen von 900 Sekunden sollten Streckenfahrzeiten angestrebt werden, die unter 180 Sekunden (20 %) liegen.
- Auch wenn Nachfragedaten nur auf Stundenebene vorliegen, ist es sinnvoll, mit Zeitintervallen von 15 Minuten zu rechnen, da 4 Abfahrtszeitpunkte pro Stunde (6:07, 6:22, 6:37, 6:52) eine realistischere Aufteilung der Nachfrage darstellen als ein einziger Abfahrtszeitpunkt (6:30). Die stündliche Nachfrage wird dabei gleichmäßig auf die kürzeren Zeitintervalle aufgeteilt. Die Belastungsbilder können dann aggregiert auf Stundenebene analysiert werden.

4 Anwendung des Verfahrens

Das dynamische Lernverfahren ist als Bestandteil des Progammsystems *ptv vision* (PTV, 2000) implementiert. Es wird zur Zeit u.a. im Rahmen des Verkehrsmanagementsystems für die Expo 2000 in Hannover zur Verkehrsprognose eingesetzt. Ziel ist dabei die Vorhersage der Verkehrsbelastungen in Stundenschritten für den nächsten Tag. Die Verkehrsnachfrage für den zu prognostizierenden Tag setzt sich dabei aus dem Normalverkehr für den entsprechenden Wochentag und zusätzlichen Verkehr zusammen, der aufgrund besonderer Ereignisse erzeugt wird. Diese Zusatzmatrizen werden für manche Ereignisse aus historischen Daten abgeleitet (z.B. Ferienbeginn) oder mit einfachen Modellen, z.B. mit einem Gravitationsansatz, geschätzt (z.B. Großveranstaltungen). Aus dem elektronischen Ticketverkauf der Expo liegen dazu Informationen über die Zahl der Besucher und deren räumliche Verteilung vor. Neben der detaillierten Modellierung der Nachfrage wird auch die Modellierung des Verkehrsnetzes auf den Prognosetag abgestimmt. Dazu werden Baustellen, veranstaltungsbedingte Sperrungen und andere auf das Netz wirkende Maßnahmen in zeitlich begrenzte Änderungen der Streckenattribute übersetzt, die dann bei der dynamischen Umlegung berücksichtigt werden. Um bei der Prognose unterschiedliche Nachfragesegmente (Pkw-Grundverkehr, Pkw-Besucher, Lkw) berücksichtigen zu können, wird die dynamische Umlegung als multi-class Umlegung eingesetzt, bei der mehrere Nachfragesegmente in 96 Zeitscheiben von 15-Minuten simultan umlegt werden.

5 Literatur

Cascetta, E; Cantarella, G. E.: Modelling dynamics in transportation networks: state of the art and future developments, Simulation Practice and Theory 1 pp. 65-91; Elsevier 1993

Fellendorf, M., Vortisch, P.: Integrated Modeling of Transport Demand, Route Choice, Traffic Flow and Traffic Emissions, Proceedings of TRB 2000 (Preprint CD-ROM), Washington, 2000

PTV: www.ptv.de, 2000

Schnabel, W., Lohse D.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1997

Serwill, D.: DRUM – Modellkonzept zur dynamischen Routensuche und Umlegung, Berichte Stadt, Region, Land, Band 43, Institut für Stadtbauwesen, RWTH Aachen, 1994