

Nachfragemodellierung bei flexiblem Stadtschnellbahn-Betrieb

Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Lohse¹

Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“,
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
MommSENstraße 13, 01062 Dresden, Deutschland

Kurzfassung:

Vor dem Hintergrund eines umfassenden Verkehrsmanagements für eine Ballungsregion wird die integrative Verkehrsnachfrageberechnung und Verkehrsnetzberechnung für alle Verkehrsarten der Region kurz skizziert und darauf aufbauend die Ermittlung der besonderen Verkehrsnachfragesegmente der Stadtschnellbahn erläutert. Die integrative inermodale und intramodale Verkehrsnachfragemodellierung in kleinen Zeitabständen, die sich aus der „möglichen Reaktionszeit der Disposition“ ergeben, bildet die nachfrageseitige Basis für die Flexibilisierung des Stadtbahn-Betriebs. Die Verkehrsnachfrage wird für alle wesentlichen Situationen / Szenarien (Tages-, Wochen-, Jahresgang; Normalwerktag, Urlaubswerktag, Sonn-/Feiertag; Sonderveranstaltungen im Einzugsbereich usw.), Verkehrsarten und Verkehrsnachfragesegmente ermittelt und als Ausgangspunkt für die aktuellen Kurzzeitprognosen verwendet, die sich desweiteren auf die historischen und die aktuellen Zählraten des Verkehrsnachfragesegments „Stadtschnellbahn“ (Einsteiger, Aussteiger, Streckenbelastungen) abstützen. Das Ergebnis der Kurzzeitprognose sind die Verkehrsströme zwischen den Haltestellen der Stadtschnellbahn für die nächste Zeitscheibe, auf die das Dispositionsverfahren gerade noch angemessen reagieren kann.

Schlagworte:

Verkehrsnachfragemodellierung, Kurzzeitprognose, Stadtschnellbahn, Verkehrsganglinien, Flexibilisierung

¹ E-mail: dlohse@rcs.urz.tu-dresden.de , URL: <http://vplno1.vkw.tu-dresden.de/#vpl>

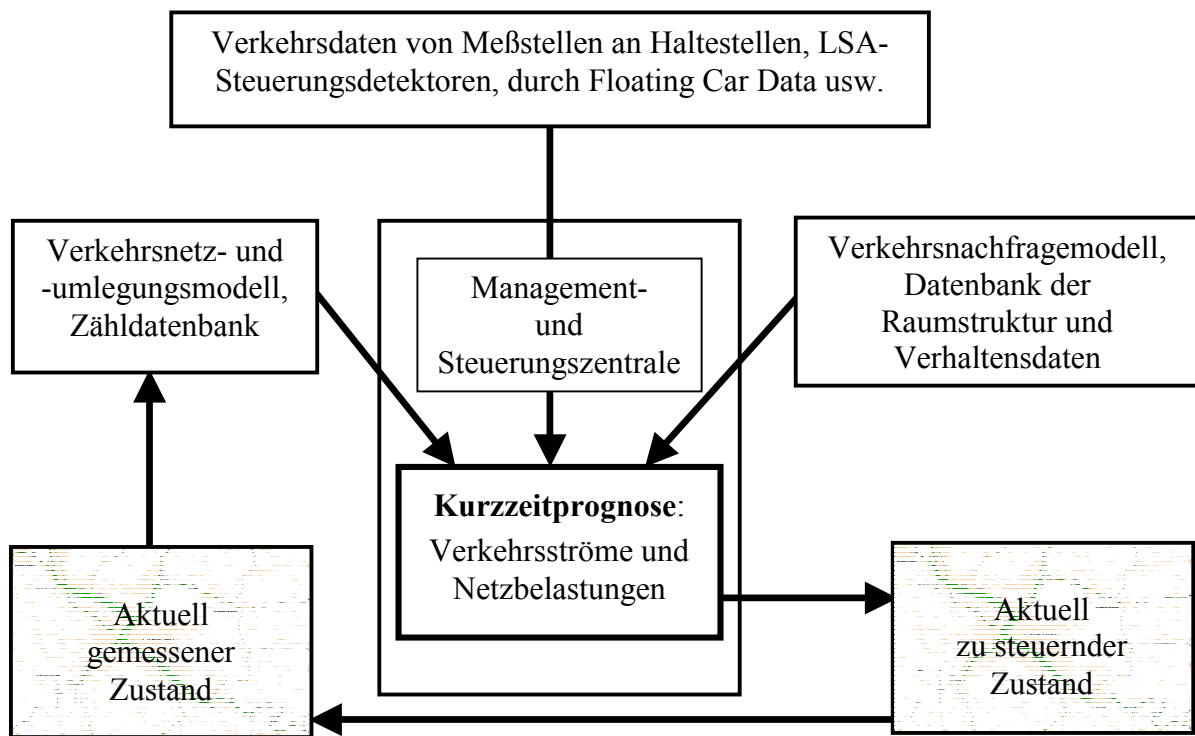


Bild 2: Datenbereitstellung für Kurzzeitprognosen

Die **Flexibilisierung der Bedienung in Straßennetzen** bezieht sich meist auf eine relativ sehr feingliedrige räumliche, zeitliche und sachliche Abbildung des Untersuchungsraumes, die letztlich jedes einzelne Fahrzeug einbezieht und den Fahrzeugführer z. B. über die Modifikation der Freigabezeitanteile an den LSA-Knoten, die Wegweisung, die Parkleitsysteme unmittelbar in seinen Entscheidungen beeinflusst. Das System hat sehr viele Freiheitsgrade in seinen Einwirkungen und in den daraus folgenden zentralen und individuellen Entscheidungen.

Im **öffentlichen Personennahverkehr** sind diese Freiheitsgrade a priori stark eingeschränkt. Die Fahrzeuge sind an ein Strecken- und Liniennetz gebunden (Hier werden alternative Bedienungsformen mit variablen Fahrwegen nicht betrachtet, da sie für einen automatisierten Stadtbahn-Betrieb nicht in Frage kommen). Die Automatisierung als Grundlage der Flexibilisierung ist beim jetzigen Stand nur für eigenständige Schienennetze realisierbar. Die Schienennetze sind wesentlich weniger vernetzt bzw. vermascht, sie erschließen vor allem räumliche Korridore und weniger sowie nicht unmittelbar die Fläche. Die Fahrzeugeinheiten sind wesentlich größer als eine durchschnittliche Pkw-Einheit und Überholvorgänge sind nur bei bestimmten netztopologischen Voraussetzungen an bestimmten Stellen möglich. Die betriebstechnischen und betrieblichen Rahmenbedingungen ermöglichen nur eine räumlich und zeitlich beschränkte Reaktion auf Schwankungen in der Verkehrsnachfrage. Diese Reaktion wird beim automatisierten flexiblen Stadtbahn-Betrieb vor allem durch eine nachfrageabhängige Verdichtung des Grundangebotes erfolgen (Beispiel: Grundtakt = 15 min; je nach Nachfrage werden ein oder zwei Zügeinheiten dazwischen gelegt (7,5min-Takt bzw. 5min-Takt)). Das flexible Gesamtkonzept des Betriebes bzw. der Disposition muß für eine funktionierende Bereitstellung und Zurückführung der Zügeinheiten unter Beachtung der Anforderungen des Gesamtsystems sorgen.

In den folgenden Abschnitten sollen die Probleme und die Vorgehensweise der Verkehrsnachfragemodellierung im Hinblick auf die Einrichtung eines flexiblen öffentlichen Personennahverkehrs im Vordergrund stehen, da er – wie oben angedeutet – in vielerlei Hinsicht

andere Anforderungen an die Betriebsführung und an das Verkehrsmanagement stellt als der motorisierte Individualverkehr und das zugehörige Straßenverkehrsmanagement.

Wie aus Bild 1 deutlich wird, ist die Verkehrsnachfrageermittlung für das gesamte Untersuchungsgebiet für alle Verkehrssysteme vorzunehmen. Diese Aussage ist auch im Hinblick auf die hier vorrangig betrachtete ÖV-Flexibilisierung gültig. Die multimodale Verkehrsnachfragemodellierung hat in so hoher Qualität zu erfolgen, daß sie allen intramodalen und intermodalen Anforderungen gerecht wird. Auf eine mögliche Vorgehensweise für diese erste Stufe der Verkehrsnachfragemodellierung wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

2 Zustandsschätzung der Personenverkehrsnachfrage und Verkehrsbelastung

Um konsistente Datenstrukturen für alle Verkehrssysteme des Untersuchungsraumes zu erreichen, ist eine weitgehend komplexe, alle wesentlichen Erscheinungsformen des Verkehrsgeschehens gleichwertig abbildende Verkehrsmodellierung erforderlich. Die sachlich, räumlich und zeitlich stark disaggregierte Verkehrserzeugung beruht auf sogenannten Quelle-Ziel-Gruppen (siehe Tabelle 1) mit jeweils zugehörigen maßgebenden Personengruppen (zusätzlich unterschieden in Untergruppen der Verkehrsmittelverfügbarkeit) und wesentlichen Raumstrukturgrößen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 1: Quelle-Ziel-Gruppen-Einteilung mit 21 Gruppen

von \ nach	W	A	K	G	B	H	D	E	F	S
(eigene) Wohnung	-	WA	WK	WG	WB	WH	WD	WE	WF	WS
(eigene) Arbeitsstätte	AW	-	AS							
Kindereinrichtung	KW	SA	SS							
Grundschule	GW									
Berufsschule	BW									
Hochschule	HW									
Dienstliche/geschäftl. Einrichtung	DW									
Einkaufseinrichtung	EW									
Freizeiteinrichtung	FW									
Sonstiges	SW									

Mit Hilfe der zu den Quelle-Ziel-Gruppen zugehörigen typischen Verhaltensdaten der Personengruppen (spezifisches Verkehrsaufkommen) und Erzeugungsraten der Raumstrukturgrößen lassen sich die Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke berechnen. Hierbei ist noch zu unterscheiden, ob für die Quell- und / oder Zielverkehrsaufkommen sogenannte harte (abhängig nur von den Raumstrukturkapazitäten), weiche (abhängig von Raumstrukturkapazitäten und Lagegunst / Erreichbarkeit) oder offene (abhängig von Raumstrukturpotentialen ohne Kapazitätsbegrenzungen und Lagegunst / Erreichbarkeit) Randsummenbedingungen (RSB) maßgebend sind.

Mit Hilfe des Kennwertmodells [2] der Verkehrserzeugung lassen sich für die Verkehrsbezirke die Gesamtverkehrsaufkommen selbst (bei harten RSB), ihre Maximalwerte (bei weichen RSB) bzw. zu ihnen proportionale Potentiale (bei offenen RSB) ermitteln.

Tabelle 2: Maßgebende Personengruppen und maßgebende Strukturgrößen (Kapazitäten) der Quelle-Ziel-Gruppen (siehe Tabelle 1) und QZG-Typen

QZG (Typ 1)	Maßgebende Bezugs-personengruppen SQ _i des Quellverkehrsbezirks i		Strukturgrößen SZ _j des Zielverkehrsbezirks j		
WA	BT	Berufstätige	B	Beschäftigte	
WK	KK	Kleinkinder	KKP	Plätze für Kleinkinder (Kapazität)	
WG	SCH	Schüler	SCHP	Plätze für Schüler (Kapazität)	
WB	AZUBI	Auszubildende	AZUBIP	Plätze für Auszubildende (Kapazität)	
WH	STUD	Studenten	STUDP	Studienplätze (Kapazität)	
WD	BT	Berufstätige	B	Beschäftigte	
WE	EW	Einwohner	BH, HF, KU	Beschäftigte, Fläche, Kunden (Kapazität) im Handel	
WF	EW	Einwohner	FP, FF	Plätze, Fläche für Freizeit (Kapazität)	
WS	EW	Einwohner	BS, EW, ...	sonstige Beschäftigte, Einwohner, ...	
AS	B	Beschäftigte	BS, EW, ...	sonstige Beschäftigte, Einwohner, ...	
QZG (Typ 2)	Strukturgrößen SQ _i des Quellverkehrsbezirks i			Maßgebende Bezugs-personengruppen SZ _j des Zielverkehrsbezirks j	
AW	B	Beschäftigte	BT	Berufstätige	
KW	KKP	Plätze für Kleinkinder (Kapazität)	KK	Kleinkinder	
WG	SCHP	Plätze für Schüler (Kapazität)	SCH	Schüler	
WB	AZUBIP	Plätze für Auszubildende (Kapazität)	AZUBI	Auszubildende	
WH	STUDP	Studienplätze (Kapazität)	STUD	Studenten	
DW	B	Beschäftigte	BT	Berufstätige	
EW	BH, HF, KU	Beschäftigte, Fläche, Kunden (Kapazität) im Handel	EW	Einwohner	
FW	FP, FF	Plätze, Fläche für Freizeit (Kapazität)	EW	Einwohner	
SW	BS, EW, ...	sonstige Beschäftigte, Einwohner, ...	EW	Einwohner	
SA	BS, EW, ...	sonstige Beschäftigte, Einwohner, ...	B	Beschäftigte	
Maßgebende Bezugspersonengruppe = Einwohner EW					
QZG (Typ 3)	Strukturgrößen SQ _i des Quellverkehrsbezirks i			Strukturgrößen SZ _j des Zielverkehrsbezirks j	
SS	BS, EW, ...	sonstige Beschäftigte, EW, ...	BS, EW, ...	sonstige Beschäftigte, EW, ...	

Es schließt sich die simultane Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung – für jede Quelle-Ziel-Gruppe gesondert – an, die mittels n-linearer Gleichungssysteme, die aus einer komplexen wahrscheinlichkeitstheoretischen Ableitung der Verkehrsnachfrage [2] entstehen, ermittelt werden.

Über die Bewertung BW der Verkehrsrelation i-j durch die Verkehrsteilnehmer wird die individuelle Entscheidungssituation bezüglich des Angebots der Verkehrsinfrastruktur modelliert. Das Bild 3 zeigt beispielhaft die sogenannte EVA-Funktion, die prinzipiell eine realitätsnahe Abbildung der Entscheidungssituation – wie auch aus der zugehörigen Elastizitätsfunktion erkennbar wird – bei einer Einbeziehung aller wesentlichen Bewertungsmerkmale (Zugangszeit, Wartezeit, Beförderungszeit, Umsteigezeit, Abgangszeit, Kosten, usw.) ermöglicht. Die potentiellen Verkehrsteilnehmer prüfen das gesamte Ereignisfeld mit den möglichen Ortsveränderungen (OV) und können diese annehmen oder ablehnen.

Gesamtereignisfeld = [angenommene Ortsveränderungen + abgelehnte Ortsveränderungen]

$$\begin{aligned}
 \sum_i \sum_j \sum_k \tilde{v}_{ijk} &= \tilde{V} &= & \sum_i \sum_j \sum_k v_{ijk} = V &+ & \sum_i \sum_j \sum_k \bar{v}_{ijk} = \bar{V} \\
 \tilde{v}_{ijk} &= [v_{ijk} + \bar{v}_{ijk}] &= & [P(O_{ijk} \cap W) \cdot \tilde{V} &+ & P(O_{ijk} \cap \bar{W}) \cdot \tilde{V}] & (1) \\
 v_{ijk} &= P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(M_k) \cdot P(W / (A_i \cap E_j \cap M_k)) \cdot \tilde{V} \\
 \bar{v}_{ijk} &= P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(M_k) \cdot P(\bar{W} / (A_i \cap E_j \cap M_k)) \cdot \tilde{V}
 \end{aligned}$$

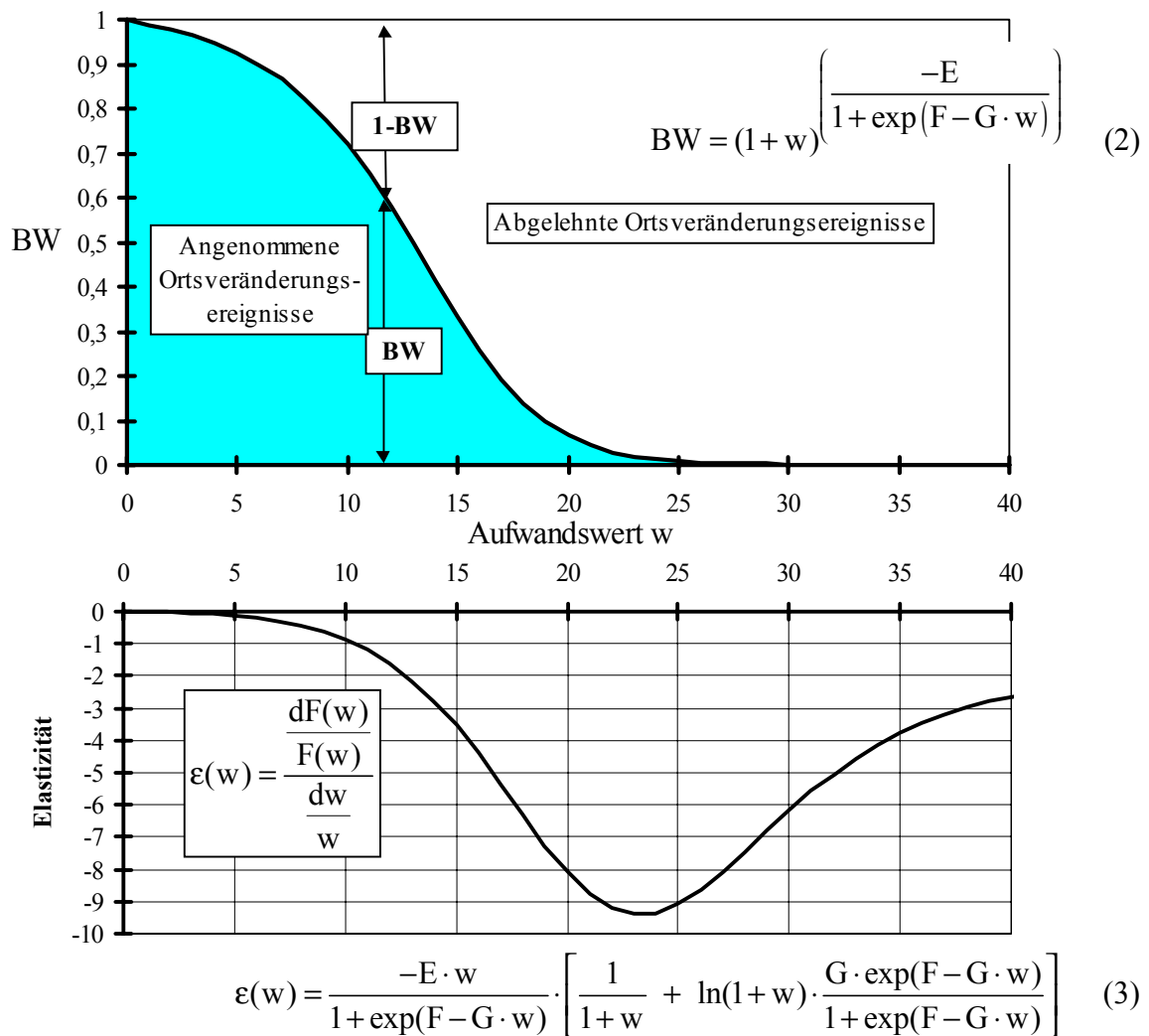


Bild 3: Bewertungswahrscheinlichkeit und Elastizität gemäß EVA-Funktion

Hierbei sind die Ereignisse A_i , E_j , M_k , O_{ijk} , W und \bar{W} wie folgt definiert:

- A_i = Wahl des Verkehrsbezirkes i als eine potentiell mögliche Quelle
- E_j = Wahl des Verkehrsbezirkes j als ein potentiell mögliches Ziel
- M_k = Wahl der Verkehrsart k als ein potentiell mögliches Verkehrsmittel
- O_{ijk} = potentiell mögliche Ortsveränderung in der Relation i - j der Verkehrsart k
- W = Annahme einer Ortsveränderung (nach erfolgter Bewertung),
- \bar{W} = Ablehnung einer Ortsveränderung (nach erfolgter Bewertung).

Die Ausdrücke $P(\dots)$ bezeichnen die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten. Die Bewertungswahrscheinlichkeit BW_{ijk} kann dann als bedingte Wahrscheinlichkeit formuliert werden:

$$BW_{ijk} = P(W / (A_i \cap E_j \cap M_k)) \text{ und } \bar{W}_{ijk} = P(\bar{W} / (A_i \cap E_j \cap M_k)) = 1 - BW_{ijk} \quad (4)$$

Mit diesen Vereinbarungen ist das gesamte Ereignisfeld definiert und die Verkehrsströme können auf der Basis des BAYES'schen Axioms für bedingte Wahrscheinlichkeiten berechnet werden:

$$V_{ijk} = \frac{P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(M_k) \cdot P(W / (A_i \cap E_j \cap M_k))}{\sum_r \sum_s \sum_t P(A_r) \cdot P(E_s) \cdot P(M_t) \cdot P(W / (A_r \cap E_s \cap M_t))} \cdot V \quad (5)$$

Die unbekanntes unbedingten Wahrscheinlichkeiten $P(A_i)$, $P(E_j)$ und $P(M_k)$ sind mittels geeigneter Lösungsverfahren für n-lineare Gleichungssysteme so zu bestimmen, daß die jeweilig zutreffenden Randsummenbedingungen eingehalten werden (nachfolgend drei mögliche Beispiele):

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= \sum_j \sum_k v_{ijk} \\ Z_j &= \sum_i \sum_k v_{ijk} \\ M_k &= \sum_i \sum_j v_{ijk} \end{aligned} \right\} \text{ harte Randsummenbedingungen} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{\max_i} \geq Q_i &= \sum_j \sum_k v_{ijk} \\ Z_{\max_j} \geq Z_j &= \sum_i \sum_k v_{ijk} \\ M_k &= \sum_i \sum_j v_{ijk} \\ V &= \sum_i Q_i = \sum_j Z_j = \sum_k M_k \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{weiche Randsummenbedingungen} \\ \text{harte Randsummenbedingungen} \end{array} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} QP_i \square Q_i &= \sum_j \sum_k v_{ijk} \\ ZP_j \square Z_j &= \sum_i \sum_k v_{ijk} \\ M_k &= \sum_i \sum_j v_{ijk} \\ V &= \sum_i Q_i = \sum_j Z_j = \sum_k M_k \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{offene Randsummenbedingungen} \\ \text{harte Randsummenbedingungen} \end{array} \quad (8)$$

Wenn bezüglich der Personengruppen nach berufstätigen und nicht berufstätigen Menschen unterschieden wird und man ihre polaren (bezogen auf den Wohnstandort e) bzw. bipolaren (bezogen auf Wohnstandort e und Arbeitsstandort I) Einzugsbereiche ihrer Ortsveränderungsaktivitäten bei Ermittlung der Verkehrsströme beachtet, entstehen z. B. für den Berufstätigen nicht nur dreidimensionale (ijk) , sondern fünfdimensionale $(ijkel)$ Ereignisfelder und entsprechend zugehörige n-lineare Gleichungssysteme, die mit Hilfe spezieller Näherungsverfahren (z. B. n-lineares Multimodell, n-lineares Furnessmodell, siehe [2]) gelöst werden können.

Die Berechnung dieser Verkehrsströme sollte in der ersten Stufe für einen relativ „geschlossenen“ Zeitraum, also z. B. für einen Werktag von etwa 2 Uhr bis zum nächsten Werktag 2 Uhr morgens, in dem die meistens Ortsveränderungsketten der Menschen am Wohnstandort abgeschlossen sind, erfolgen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, gewisse Systemprüfbedingungen zur Validierung der Nachfrageberechnungen einzubeziehen. Danach erfolgt die Aufteilung des Tagesverkehrsgeschehens auf die vorgesehenen Zeitscheiben Δt bzw. zugehörigen Zeitpunkte t für jede Quelle-Ziel-Gruppe c gesondert mit folgendem prinzipiellen Ansatz:

$$v_{cijkt} = v_{cij} \cdot f_{ckt} \quad \text{mit:} \quad \sum_t f_{ckt} = 1 \quad (9)$$

Die Tagesganglinien der Quelle-Ziel-Gruppen zeigen jeweils sehr typische Verläufe, die durch lokale Erhebungen abgesichert werden müssen und können. Das Bild 4 zeigt als Beispiel die Tagesganglinien im Berufsverkehr von der Wohnung zur Arbeit (WA) und zurück (AW).

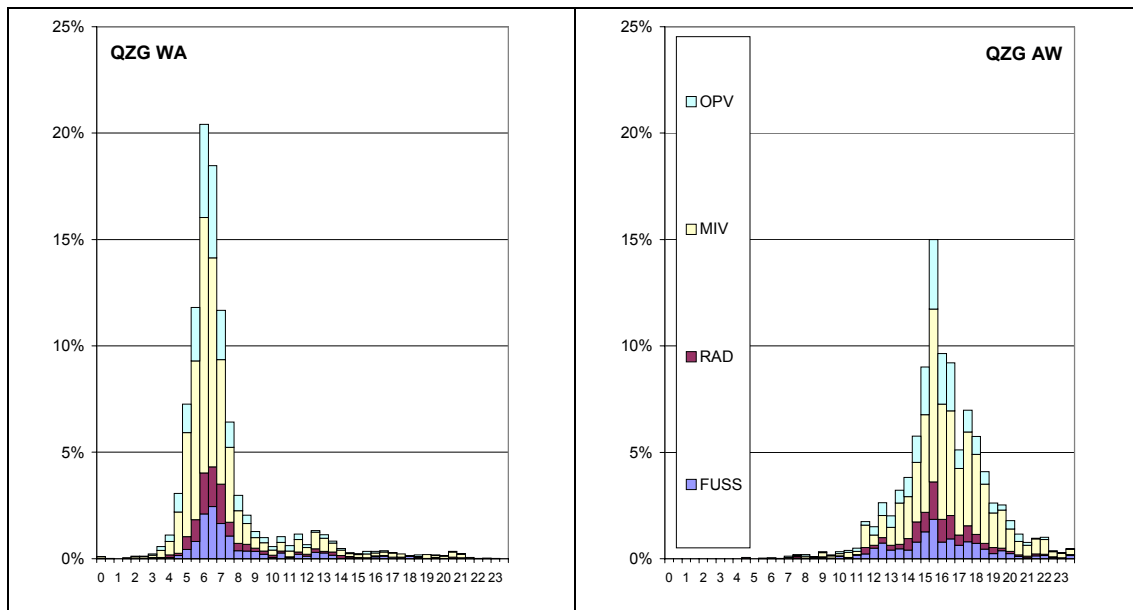


Bild 4: Tagesganglinien und Modal Split für die Quelle-Ziel-Gruppen WA und AW (halb-stündliche Auswertung des SrV-Städtepegels 1998)

Damit ist es nun möglich, eine Verkehrsstrommatrix des öffentlichen Personennahverkehrs für jede Zeitscheibe Δt bzw. ΔT des Tages zu berechnen und auf das gesamte ÖV-Netz (Bus, Straßenbahn, S-Bahn usw.) umzulegen sowie generell das Verkehrsmodell zu kalibrieren.

Bei der Nachfragemodellierung für den flexiblen Stadtbahn-Betrieb kann erwartet werden, daß im Laufe der Anwendungszeit durch eine begleitende Kalibrierungsarbeit (Anpassung an viele sach- und lokalspezifische Situationen) Berechnungsergebnisse erreicht werden, die eine sehr differenzierte und valide Abbildung des Verkehrsgeschehens für die typischen Situationen im Tages-, Wochen- und Jahresgang einschl. vieler typischer Sonderfälle (Ereignisse bzw. Cluster wie Festtage, Wetterlagen, Ferien, typische Großveranstaltungen usw.) ergeben. Die Kalibrierung der Verkehrsnachfrage in diesem globalen und umfassenden Sinne ist nicht täglich für jeden einzelnen Rechenschritt der unmittelbaren Verkehrssteuerung und -lenkung erforderlich, sondern nur generell begleitend bezüglich der ständig nötigen Anpassungsmodellierung an die ständigen Veränderungen im Untersuchungsraum (bezüglich Raumstruktur, Verkehrsnetzstruktur, Verhaltensänderungen usw.).

Durch die Umlegung der so ermittelten verkehrsbezirksbezogenen modalen Verkehrsnachfrage mit entsprechend differenzierten Berechnungsverfahren kann eine **auf die Haltestellen bezogene Verkehrsstrommatrix** als gesondertes **Nachfragesegment „Stadtschnellbahn“** erzeugt werden, so daß auch die Einsteiger e und Aussteiger a an den Haltestellen dieses Verkehrssystems für die betrachtete Zeitscheibe vorliegen. Diese Ein- und Aussteigerangaben sind für die oben genannten Kalibrierungsprozeduren wesentliche Vergleichs- bzw. Anpassungskennwerte, so daß zu erwarten ist, daß die Verkehrsnachfragemodellierung zu einer weitgehend adäquaten Zustandsschätzung der haltestellenbezogenen Verkehrsstrommatrix der Zeitscheibe ΔT der Stadtschnellbahn führt (Tabelle 3).

Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die so ermittelte Verkehrsstrommatrix sich auf ein konkretes Verkehrsnachfragecluster (maßgebenden Wochentag einer bestimmten Saison (Frühjahr, Sommer, Herbst, Winter; Schulzeit/Ferienzeit; Urlaubszeit / Nichturlaubszeit; typische Saisonmerkmale der Region (z. B. Messe), weitere Clustermerkmale) beziehen sollte und somit systematische Abweichungen vermieden werden.

Tabelle 3: Zustandsschätzung für haltestellenbezogene Verkehrsstrommatrix

Zustandsprognose		Haltestellen						Σ
		1	2	...	j	...	n	
Haltestellen	1	h_{11}	h_{12}	...	h_{1j}	...	h_{1n}	e_1

	I	h_{i1}	h_{i2}	...	h_{ij}	...	h_{in}	e_i

	n	h_{n1}	h_{n2}	...	h_{nj}	...	h_{nn}	e_n
	Σ	a_1	a_2	...	a_j	...	a_n	V

Die Ableitung der typischen haltestellenbezogenen Verkehrsstrommatrizen für alle wesentlichen Nachfragesituationen (Cluster) der Stadtschnellbahn aus der globalen Verkehrsnachfrage- und Verkehrsnetzberechnung und deren Bereitstellung für die nachfolgenden Steuerungs- und Lenkungsmodule ist eine wesentliche Voraussetzung für die Effizienz und Validität eines flexiblen Stadtbahn-Betriebes.

3 Vorausschätzung der Verkehrsnachfrage und Netzbelastung (Kurzzeitprognose)

Die gezählten Einsteiger an den Haltestellen (Hier wird vorausgesetzt, daß eine Erfassung der Einsteiger an allen oder zumindest an allen wesentlichen Haltestellen der Stadtschnellbahn möglich ist.) sind bei der Kurzzeitprognose von besonderer Bedeutung, da sie bezüglich der betrachteten Haltestelle „wahre“ Quellverkehrsaufkommen für den jeweiligen Zeitabschnitt Δt darstellen. Für den flexiblen Betrieb sind allerdings nicht die Einsteiger zum Zeitpunkt t , sondern zum zukünftigen Zeitpunkt $t+\Delta T$, für den dann gerade noch eine betriebstechnische Reaktion möglich sein muß, von Interesse. Es ist also erforderlich, das Einsteigerverkehrsaufkommen E der betrachteten Haltestelle für diesen zukünftigen Zeitpunkt möglichst genau zu schätzen und als Ausgangswert für eine aktuelle Kurzzeitprognose der Haltestellenmatrix bereitzustellen.

Für die Kurzzeitprognose ist folgende Vorgehensweise möglich:

- 1) Die Einsteiger werden täglich in Zeitintervallen Δt ($\leq \Delta T$) erhoben und entsprechend der oben genannten Clustermerkmale systematisch ausgewertet und gespeichert. Insbesondere wird für alle Zeitintervalle des gleichen Clusters eine Glättung der Meßwerte vorgenommen, die als „historische Basis“ für die weitere Schätzung zur Verfügung stehen. Die im Mittel eintreffende Einsteigeranzahl $\bar{E}(t,d)$ an einer Haltestelle in einem bestimmten Zeitintervall $(t-\Delta t)$ bis t an einem Tag d eines bestimmten Clusters (z. B. Montag / Normalwerktag) ergibt sich dann durch Glättung des Zählwertes des Tages d mit dem geglätteten Mittelwert des Tages $(d-1)$ (Montag / Normalwerktag der vorhergehenden Woche):

$$\bar{E}(t,d) = f[\bar{E}(t,d-1), \hat{E}(t,d)] \quad (10)$$

$\bar{E}(t,d)$ – geschätzte mittlere Einsteigeranzahl für Tag d zum Zeitpunkt t

$\bar{E}(t,d-1)$ – geschätzte mittlere Einsteigeranzahl für Tag $(d-1)$ zum Zeitpunkt t

$\hat{E}(t,d)$ – gezählte Einsteigeranzahl am Tag d zum Zeitpunkt t .

Die Zählung der Tage ($d, (d-1)$ usw.) bezieht sich auf die zeitliche Anordnung innerhalb des jeweiligen Clusters. Eine empirisch gesicherte Clusteranalyse für die hier behandelte Aufgabe wurde im Rahmen von INTERMOBIL noch nicht vorgenommen. Es ist davon auszugehen, daß bei der schrittweisen Einführung des flexiblen Betriebes zu Anfang mit

einer groben Untergliederung begonnen wird, die sich mit zunehmendem Datenbestand und wachsenden Erfahrungen immer stärker differenziert.

- 2) Die Kurzzeitprognose muß sich auf einen Zeithorizont $t+\Delta T$ beziehen. Für den Zeitpunkt t liegen die aktuellen Zählraten $\hat{E}(t, d)$ und die aus der „Historie“ bestimmten Mittelwerte $\bar{E}(t, d)$ vor. Zu bestimmen sind die Schätzwerte $E(t+\Delta t, d)$ für den zukünftigen Zeitpunkt $t+\Delta T$:

$$E(t+\Delta T, d) = f[\bar{E}(t+\Delta T, d-1), \hat{E}(t, d)] \quad (11)$$

- $E(t+\Delta T, d)$ – geschätzte Einsteigeranzahl für Tag d zum Zeitpunkt $t+\Delta T$
 $\bar{E}(t+\Delta T, d-1)$ – geschätzte Einsteigeranzahl für Tag $(d-1)$ zum Zeitpunkt $t+\Delta T$
 $\hat{E}(t, d)$ – gezählte Einsteigeranzahl am Tag d zum Zeitpunkt t .

Auf der Basis der Zustandsschätzung für den betrachteten zukünftigen Zeitabschnitt ΔT ist nun die Kurzzeitprognose unter Einbeziehung der geschätzten Einsteigeranzahlen $E(t+\Delta T, d)$ an den Haltestellen zu ermitteln. Hierfür sind – je nach Datenlage – zwei Fälle möglich.

Im Fall 1) wird unterstellt, daß sich die Aufteilung der Abweichungen (Zunahme oder Abnahme der Einsteiger je Haltestelle bezüglich der „historischen“ Erfahrung) proportional zu den Zielpotentialen auf die Ziele verteilt. Die haltestellenbezogenen ÖV-Verkehrsströme der Zustandsschätzung gemäß Tabelle 3 werden auf der Basis der geschätzten Einsteiger an den Haltestellen i „korrigiert“. Die neuen Verkehrsströme H_{ij} der Tabelle 4 ergeben sich durch einfache Multiplikation der Verkehrsströme h_{ij} mit den Korrekturfaktoren.

Tabelle 4: Kurzzeitprognose für haltestellenbezogene Verkehrsstrommatrix

Kurzzeitprognose		Haltestellen						Σ
		1	2	...	j	...	n	
Haltestellen	1	H_{11}	H_{12}	...	H_{1j}	...	H_{1n}	E_1

	i	H_{i1}	H_{i2}	...	H_{ij}	...	H_{in}	E_i

	n	H_{n1}	H_{n2}	...	H_{nj}	...	H_{nn}	E_n
	Σ	A_1	A_2	...	A_j	...	A_n	V

Letztlich wird bei dieser Vorgehensweise unterstellt, daß es sich bei den Schätzwerten um zufällige Abweichungen von der Zustandsprognose handelt. Durch den Korrekturalgorithmus, der zu einer Lineartransformation der Matrix führt, wird die innere Matrixstruktur nicht generell verändert.

Im Fall 2) ist aus der konkreten Situation und Datenlage ersichtlich, daß die Einsteigeränderungen mit bestimmten Zielen korrelieren, also eine „systematische“ Veränderung der „historischen“ Verflechtungsmatrix vorliegt. Dies erfordert eine sachgerechte und situationsabhängige Modifikation der Zustandsprognose. Die geschätzten Einsteigeranzahlen E_i der Einstieghaltestelle sind dabei auf die Aussteiger an den „konkurrierenden“ Haltestellen unter Beachtung der Systembedingungen zu verteilen.

Für die Berechnung der haltestellenbezogenen Verkehrsströme können nun prinzipiell die bereits erläuterten n -linearen Gleichungssysteme, z. B. Modifikationen des FURNESS- oder MULTI-Modells verwendet werden.

Die Umlegung der Verkehrsströme h_{ij} und H_{ij} auf das ÖV-Netz liefert diejenigen Angaben, die für die betriebliche Disposition bzw. flexible Bedienung erforderlich sind.

Die Verkehrsströme h_{ij} und die aus ihnen folgenden Netzbelastungen können zeitlich relativ weit vorausschauend bestimmt und das wahrscheinlich zu erwartende Verkehrsgeschehen sowie das zugehörige – also unter diesem Blickwinkel auch flexible – Angebot unter Ein-schluß der Vorsorge für mögliche und evtl. nötige Verdichtungen ermittelt werden. Bereits auf dieser Ebene ist also eine optimierende Abstimmung zwischen Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot (Automatisierungstechnik, Fahrzeugkonzeption, Betriebsführung) mit positiven betriebswirtschaftlichen Effekten möglich.

Durch die Kurzzeitprognose für die Verkehrsströme H_{ij} wird eine weitere ständige und unmittelbare Aktualisierung der Verkehrsnachfrage und Anpassung des Verkehrsangebots an die stochastischen Schwankungen der Verkehrsnachfrage mit weiteren positiven Effekten auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebs möglich.

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage hat hierbei auch die verbesserten Verkehrsangebotsbedingungen durch die Flexibilisierung und die möglichen Reaktionen der Verkehrsteilnehmer im Gesamtverkehrssystem und damit die Verkehrsinduktion der Flexibilisierung zu beachten. Es werden also große Anforderungen an die Validität der im zweiten Kapitel verwendeten Verkehrsnachfrage- und Verkehrsumlegungsmodelle gestellt, um im Wechselspiel mit den Modellen der Kurzzeitprognose und den Dispositionsverfahren des Stadtschnellbahn-Betriebes zu einem wirkungsvollen und letztlich von den Verkehrsteilnehmern positiv bewerteten öffentlichen Nahverkehr beizutragen.

4 Zusammenfassung

Das moderne Verkehrsmanagement in Ballungsräumen sowie die dabei vielfach auch angestrebte Flexibilisierung des Betriebs von öffentlichen Nahverkehrssystemen, im hier behandelten Zusammenhang insbesondere der Stadtschnellbahn, erfordert eine genaue Kenntnis des Wechselspiels von flexiblem Verkehrsangebot und darauf reagierender Verkehrsnachfrage. Mögliche Modellierungsansätze der Verkehrsnachfrage aller im Raum konkurrierender Verkehrssysteme und die darauf fußende spezielle Ableitung von Kurzzeitprognosen für die speziellen Verkehrsteilsysteme, wie die Stadtschnellbahn, werden vorgestellt.

Literatur

- [1] Strobel, H., 2000, Die verkehrlichen und wirtschaftlichen Innovationspotentiale automatisierter Nahverkehrsbahnen, Jahrbuch des Bahnwesens, Nah- und Fernverkehr, 49. Folge, Hestra-Verlag, S. 106 - 118
- [2] Lohse, D., Teichert, H., Dugge, B., Bachner, G., 1997, Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung – , Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Heft 5