

Dipl.-Ing. Milenko Vrtic, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich

Dipl.-Ing. **Milenko Vrtic** (34) arbeitet seit November 1999 am Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich. Nach dem Studium des Verkehrsingenieurwesens an der Universität Sarajevo war er von 1993 bis 1999 als Projektleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Prognos AG in Basel tätig. Einer seiner Arbeitsschwerpunkte ist die Entwicklung und Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen.

Zusammenfassung:

Für ein prognose- und massnahsensitives Verkehrsmodell ist der realitätsnah abgebildete Ist-Zustand die wichtigste Voraussetzung. Bei der Modellierung des öffentlichen Personenverkehrs sind dafür neben dem Verkehrsangebot entsprechende Umlegungsalgorithmen und die Kalibration der Quell-Ziel-Matrix die wesentlichen Parameter. Hier wird gezeigt, mit welchen Erweiterungen der Umlegungs- und Kalibrationsmethode eine ausreichende Genauigkeit beim Routenwahlmodell erreicht wird.

Optimierung von Routenwahlmodellen für den öffentlichen Verkehr

Praktische Erfahrungen bei der Modellierung des öffentlichen Personenverkehrs

Im Rahmen der Quantifizierung verkehrlicher Auswirkungen von infrastruktur- und verkehrspolitischen Massnahmen wollen die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und der Dienst für Gesamtverkehrsfragen parallel zur Entwicklung eines bimodalen Personenverkehrsmodells auch die Weiterentwicklung der netzbezogenen Modellsoftware verfolgen. Als erste und wichtige Grundlage dafür wurde die Etablierung des Ist-Zustands im Schienenpersonenverkehr unter Weiterentwicklung eines ÖV-Umlegungsalgorithmus definiert [11]. Mit dem richtig bzw. realitätsnah abgebildeten Ist-Zustand werden die Voraussetzungen für ein prognose- und massnahsensitives Verkehrsmodell geschaffen. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, ist es nötig, einerseits alle Parameter und Einflussgrößen im Verkehrsmodell richtig abzubilden und zu quantifizieren und andererseits auch einen richtigen, d.h. realitätsnahen Modellalgorithmus zu erstellen.

Die Ausgangsdaten wurden von den SBB zur Verfügung gestellt. Diese umfassten im wesentlichen das Schienennetz der Schweiz, Quell-/Ziel-Matrizen und verschiedene Daten aus Verkehrserhebungen bzw. -befragungen. Das Schienenverkehrsmodell umfasste 1036 Zonen (mit ca. 11 000 Strecken und 2500 Knoten) und bildete den durchschnittlichen Werktagsverkehr ab. Die Basis der Netzattributierung bildete der Fahrplan 1997/98. Um den regionalen Verkehr vollständig abzubilden, wurden auch die dafür relevanten Bus-Linien berücksichtigt. Der Realität entsprechende Parameter sind die Voraussetzungen für den Test des Umlegungsalgorithmus, der dann eine weitere Voraussetzung für die Kalibration der Quell-Ziel-Matrix ist. Nachfolgend werden die Erweiterungen des Umlegungsalgorithmus und die Kalibration der Quell-Ziel-Matrix beschrieben, die im Rahmen dieses Auftrages mit der Modellsoftware Polydrom [3] durchgeführt wurden.

Umlegungsmethoden für den öffentlichen Verkehr

Grundlegende Ansätze für geeignete Routenwahl-Modelle im Öffentlichen Verkehr wurden in den 70er und 80er Jahren [4, 5 und 9] diskutiert und erarbeitet. Seit Beginn der 90er Jahre werden diese Ansätze mit fahrplanfeinen Umlegungsmethoden erweitert (VISUM) [8 und 10]. Für die Umlegung wird vor allem das Mehr-Weg-Verfahren mit der Verteilung der Verkehrsnachfrage [12] zwischen den Routen bzw. Linien auf der Grundlage von Logit, Probit, Kirchhoff oder ähnlichen Ansätzen verwendet. Da die Linien- bzw. Routenwahl im ÖV durch die Kapazitätsbegrenzung des Verkehrsangebots nicht stark beeinflusst wird, ist die Anwendung von für Individualverkehr typischen Umlegungsmethoden wie Gleichgewichtsverfahren in der Regel nicht notwendig. Die Idee, die für Verkehrsmittelwahl entwickelte Ansätze auch für die Routenwahl zu verwenden, wurde vor vielen Jahren unabhängig von mehreren Verkehrswissenschaftlern [5] vorgeschlagen.

Die für diese Methoden verwendeten Ansätze verwenden die Annahme, dass zwischen den generalisierten Kosten (oder einzelnen Komponenten wie z.B. Zeit) und der Wahrscheinlichkeit der Benutzung eines Weges ein Zusammenhang besteht. Die genaue Wahrscheinlichkeit für die Wahl einer Route wird durch den Nutzen bzw. generalisierten Kosten der Route und die Modell-Koeffizienten bestimmt. Dabei wird die Nutzenfunktion aus einem deterministischen Teil V_i und einem stochastischen Teil E_i gerechnet ($U_i=V_i+E_i$). Die deterministische Komponente V_i wird oft als lineare Funktion der Reisezeit T_i und der Reisekosten C_i dargestellt ($V_i= \beta_c \cdot C_i + \beta_t \cdot T_i$ mit β_c -Kosten-Koeffizient, β_t -Zeit-Koeffizient). Neben dem Verhältnis der generalisierten Kosten der einzelnen Alternativen, ist im ÖV die Verteilung der Verkehrsnachfrage während des Tages bzw. die Abfahrtszeit der Verkehrsteilnehmer einer der wesentlichen Faktoren für die Linien- bzw. Routenwahl. Schwierig ist bei den hier verwendeten Umlegungsverfahren vor allem die Beschaffung geeigneter Datengrundlagen (Tagesganglinien). Für den Fall, dass die Tagesganglinien nicht vorhanden sind, muss eine geeignete Methode gewählt werden, anhand derer die Routen- bzw. Linienwahl während des Tages definiert werden kann. Die Gesetzmässigkeiten werden aus der Analyse des beobachteten Verhaltens und des Verhältnisses des Verkehrsangebots und der Verkehrsnachfrage der einzelnen Routen bzw. Linien (in betrachtetem Zeitraum) festgestellt. Es ist hilfreich und für ÖV-Umlegungen zu empfehlen, das Verkehrsmodell getrennt nach Tagesabschnitten anzuwenden (z.B. Vormittagsspitze, Nachmittagsspitze und übrige Tageszeit) - unabhängig davon ob mit oder ohne Tagesganglinien gearbeitet wird. Damit können die Gesetzmässigkeiten der Verkehrsnachfrage bei der Linien- bzw. Routenwahl einfacher und genauer abgebildet werden.

Erweiterung des Umlegungsalgorithmus

Um eine richtige Verteilung der Verkehrsnachfrage im Verkehrsnetz zu erreichen, mussten hier neben den Umlegungsmethoden zusätzlich weitere Analysen der Einflussfaktoren der Routenwahl und der spezifischen Parameter des Umlegungsmodells durchgeführt werden. Die Erweiterung des Umlegungsmodell umfasste im wesentlichen folgende Bereiche:

- geeignete Parameterwahl im Umlegungsalgorithmus,
- Berechnung geeigneter Bedienungsintervalle,
- Umsteigezeit und die Kostenparameter

Wahl der Parameter für die Umlegungsfunktion

Für die Umlegung des öffentlichen Verkehrs, d.h. mit einem durch Fahrpläne bestimmten Angebot, sind die in der Modellsoftware Polydrom verfügbaren Methoden unterschiedlich geeignet. Das Verkehrsmodell soll hier die spezifischen Charakteristika der Routen- bzw. Linienwahl im ÖV berücksichtigen. Dies bedeutet, dass neben der Abbildung und Quantifizierung des Verkehrsangebots, die Verteilung der Verkehrsnachfrage zwischen Linien bzw. Routen (für betrachteten Zeitraum) durch geeignete Algorithmen und Kriterien im Verkehrsmodell abgebildet werden muss.

Auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis zeigte sich hier die multinominale Logit-Umlegung als die am besten geeignete Umlegungs-Methode. Nach dem Ansatz bestimmt sich die Wahrscheinlichkeit P_i , dass für eine Quelle/Ziel-Beziehung der Weg i benutzt wird, nach folgender Gleichung

$$P_i = \exp(-YC_i) / \sum_j \exp(-YC_j) \quad (1)$$

wobei:

i : betrachtete Route und

j : Anzahl Routen zwischen Quelle und Ziel

C_i : generalisierte Kosten der Route i zwischen Quelle und Ziel

Y : Koeffizient des Modells

In einem weiteren Schritt wird das Modell mit dem minimalen Wert der generalisierten Kosten normiert, so dass er unabhängig vom absoluten Wert der Kosten ist:

$$P_i = \exp(-YC_i / \min_k(C_k)) / \sum_j \exp(-YC_j / \min_k(C_k)) \quad (2)$$

$j, k \in$ die Anzahl der Routen zwischen Quelle und Ziel

Die genaue Grösse des Modell-Koeffizienten Y wird i.d.R. durch die Analyse empirischer Daten über die Routen bestimmt, d.h. ihrer Kosten sowie der Nachfrageverteilung (in Abhängigkeit der Angebotsdichte liegt Y bei der Betrachtung der generalisierten Kosten erfahrungsgemäss zwischen 2 und 4). Da die Verteilung der Verkehrsnachfrage für eine Quell-Ziel-Beziehungen auf zwei oder mehreren Routen durch unterschiedliche Faktoren bestimmt wird, ist die Kalibration der Modell-Koeffizienten für jedes neue Untersuchungsgebiet zu empfehlen.

In den meisten Fällen lässt sich durch die Anwendung des Logit-Modells eine geringere Anzahl Wege herausfiltern, die wesentlich günstiger als andere theoretisch mögliche Wege sind, so dass sich der grösste Teil der Verkehrsnachfrage auf diese Wege verteilt. Die übrigen, weniger günstigen Wege können im Verkehrsmodell durch die Vorgabe der „minimalen Wahrscheinlichkeit“ P_i bei der Bestimmung der Routen eliminiert werden. Hier zeigten sich vor allem Probleme bei den ausgewählten (günstigsten) und durch die generalisierten Kosten vergleichbaren Routen, bei denen die Verkehrsnachfrage nicht der Realität entsprechend verteilt wurde (sehr dichte regionale Netze). Um die Verkehrsnachfrage bei diesen Fällen richtig abzubilden, zeigte sich Bewertung der Zeiten (Fahrt-, Umsteige- und Wartezeit) sowie der Umsteige- und Haltehäufigkeiten als sehr bedeutend. Um diese Streuung aufgrund einer unplausiblen Verteilung auf zu viele alternative Routen zu begrenzen, wurden zusätzliche Abfragen eingeführt:

- **DISTMX**: Parameter für den Distanzenvergleich zwischen alternativen Routen:
 $[DIST(o,d) / DIST_min(o,d)] < DISTMX$, d.h. die Distanzen alternativer Wege dürfen nicht grösser als $(DISTMX) \cdot (\text{minimale Distanz})$ sein
- **TIMEMX**: Parameter für den Zeitvergleich zwischen alternativen Routen:
 $[TIME(o,d) / TIME_min(o,d)] < TIMEMX$, d.h. die Fahrtzeiten auf alternativen Wegen dürfen nicht grösser als $(TIMEMX) \cdot (\text{minimale Fahrtzeit})$ sein
- **CHNGMX**: Parameter für die Maximale Anzahl der Umsteigevorgänge auf alternativen Wegen: $Anzahl\ Umsteige(o,d) < CHNGMX$, d.h. die Anzahl der Umsteigevorgänge auf alternativen Wegen muss kleiner sein als **CHNGMX**. Falls der Bestweg eine höhere Umsteigezahl hat als **CHNGMX**, wird nur dieser ein Weg gewählt.

Mit diesen Optionen lässt sich die Verteilung der Verkehrsnachfrage über die alternativen Routen realitätsnah steuern. Neben der Analyse und der Überprüfung der Routenwahl im Verkehrsmodell wurde dies auch anhand der empirischen Datenbasis über die Anzahl Umsteiger sowie Ein- und Aussteiger im gesamten Netz und bei den wichtigsten Bahnhöfen überprüft.

Berechnung geeigneter Bedienungsintervalle

Weiterer Verbesserungsbedarf zeigte sich bei der modellmässigen Berechnung und Berücksichtigung der Bedienungsintervalle auf alternativen Routen. Hier sind zwei wichtige Punkte zu unterscheiden:

- ⇒ Quantifizierung der Bedeutung des Intervalls in den generalisierten Kosten
- ⇒ Berechnung des Intervalls einer Quell-/Ziel-Beziehung unter Berücksichtigung der parallelen Linien

Um die Bedeutung des Intervalls in den generalisierten Kosten zu quantifizieren, wurde ein Ansatz zur Umrechnung des Intervalls in eine mittlere Wartezeit am Bahnhof (Startbahnhof) verwendet. Die Frequenzintervalle fliessen durch die Ermittlung der mittleren Wartezeit auf dem Bahnhof in die generalisierten Kosten ein, die dann vor allem für die Bestimmung der Parameter der Verkehrsmittelwahl wichtig sind. Dafür wurden im Modell zwei verschiedene Möglichkeiten angeboten:

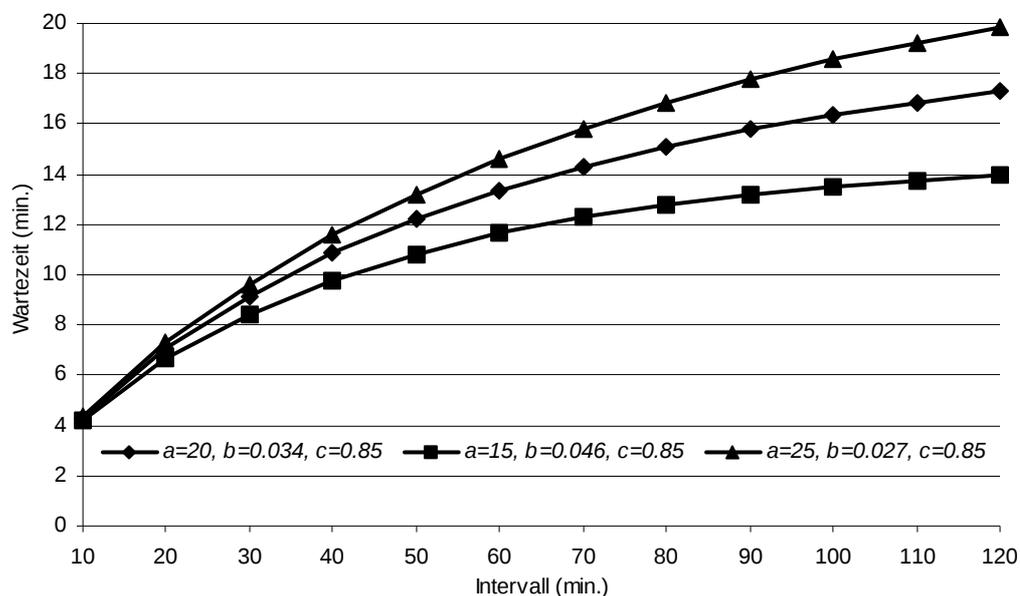
- Die Wartezeit auf einen Zug (Versatzzeit) wird aus folgendem Ansatz berechnet [6]:

$$T_{\text{wait}} = a * [1 - \exp(- b * \text{Intervall}^c)] \quad (3)$$

wobei a, b, c Koeffizienten sind.

Die folgende Abbildung 1 zeigt die Veränderung der mittleren Wartezeit am Startbahnhof in Abhängigkeit vom Bedienungsintervall und gewählten Koeffizienten. Es wird empfohlen, diese Zeiten darüber hinaus noch nach Fahrtzwecken zu unterscheiden.

Abbildung 1 Wartezeit der Reisenden am Bahnhof in Abhängigkeit vom Intervall



- Als zweite Option wird aus dem Intervall eine mittlere Wartezeit als Anteil des Intervalls berechnet. Nachteil dieser Methode ist, dass die Wartezeit bei grösseren Intervallen überschätzt wird.

Bei der Ermittlung der Wartezeit aus dem Intervall sollte die Grösse des Anteils dieser Zeit an den gesamten generalisierten Kosten beachtet werden. Für die o.g. zwei Ansätze ist zusätzlich von Bedeutung, wie im Verkehrsmodell ein Intervall (eine Quell-/Ziel-Beziehung

unter Berücksichtigung des Taktes der parallelen Linien) ab Abfahrtsbahnhof berechnet wird. Dieses Intervall wird im Modell aus folgendem Ansatz errechnet:

$$Intervall_{(o,d)} = 1 / \sum_i (1 / Intervall_i) \quad (4)$$

Allerdings erlaubt das so berechnete Intervall keine Schlüsse auf die Qualität der Bedingungshäufigkeit zu ziehen. Berücksichtigt wird hier nur die Anzahl der Züge pro Stunde, die zwischen zwei Zonen verkehren, aber nicht auch der zeitliche Abstand der Züge innerhalb dieser Stunde. Eine fahrplanfeine Umlegung hat für diese Fragestellungen wesentliche Vorteile. Es ist zu beachten, dass bei der Verteilung der Verkehrsnachfrage (eine Route) zwischen der Linie das genaue Bedingungsintervall der Linie massgebend ist.

Optimierung der Umsteigezeiten und sonstige Modellparameter

Die Umsteigezeit ist eine weitere wichtige Komponente der generalisierten Kosten. Diese Zeit wird direkt aus dem Fahrplan ermittelt. Hier wurde eine zusätzliche Optimierung der Abfahrtszeit (vom Startbahnhof) unter Berücksichtigung des Intervalls am Umsteigebahnhof vorgenommen. Um die Wartezeiten beim Umsteigen zu minimieren und dementsprechend die Abfahrtszeit vom Startbahnhof anzupassen, wurde die folgende Bedingung im Modell implementiert: *Für eine Umsteigebeziehung A-B-C darf die Umsteigezeit im Bahnhof B nicht grösser sein als das Intervall zwischen A-B.* Zusätzlich wurden auch die minimalen Umsteigezeiten (Umsteigemarschzeiten zwischen Zügen) im Bahnhof eingeführt.

Es zeigte sich auch, dass die Bedeutung der Zeitwerte für die Fahrt-, Umsteige- und Wartezeit, sowie der Bewertung der Umsteige- und Halthäufigkeit im Verkehrsmodell sehr gross ist.

Tabelle 1 Kostenparameter im Verkehrsmodell

Fahrzeit (CHF / h)	15
Haltzeit (CHF / h)	16
Umsteigezeit (CHF / h)	30
Versatzzeit* (CHF / h)	7.5
Distanzkosten (CHF / Pkm)	0.13
Fixkosten / Umsteige (CHF / Umsteige)	5
Fixkosten / Halt (CHF/Halt)	1.25

(*) Versatzzeit = Wartezeit am Bahnhof

Für die genaue Bestimmung der subjektiven Bedeutung dieser Variable wäre die Durchführung einer Erhebung nötig. Im Rahmen dieser Untersuchung haben wir uns an vorhandenen Studien [1, 2, 6 und 7] zu diesem Thema orientiert, wobei eine weitere Optimierung der relativen Verhältnisse der Zeitkomponenten, sowie die Bestimmung der Fixkosten für die Umsteige und den Halt durch die Überprüfung dieser Komponenten (Routenwahl / generalisierten Kosten) im Modell bestimmt wurde. Mit zusätzlichen Fixkosten (neben den Zeitkosten) für die Umsteige und den Halt wird vor allem die Häufigkeit dieser Determinante bewertet (dadurch wird verhindert, dass ein Umstieg mit 10 min. Umsteigezeit nicht höher bewertet wird als drei Umsteige mit drei Minuten).

Durch die richtige Setzung dieser Kostenparameter konnte erreicht werden, dass die Anzahl der Umsteiger im Verkehrsmodell (35% aller Fahrten) mit den Erhebungsdaten vergleichbar ist. Zusätzlich wurde bei den aufkommensgrössten Bahnhöfen die Anzahl der Einsteiger, Aussteiger, Umsteiger und Durchfahrer analysiert und überprüft. Der niedrigere Zeitwert der Versatzzeit (Wartezeit am Bahnhof) erklärt sich dadurch, dass diese Wartezeit bei der Fahrt von Reisenden geplant und kalkuliert wird, sowie durch ihren (relativ geringen) Anteil an den generalisierten Kosten insgesamt [1].

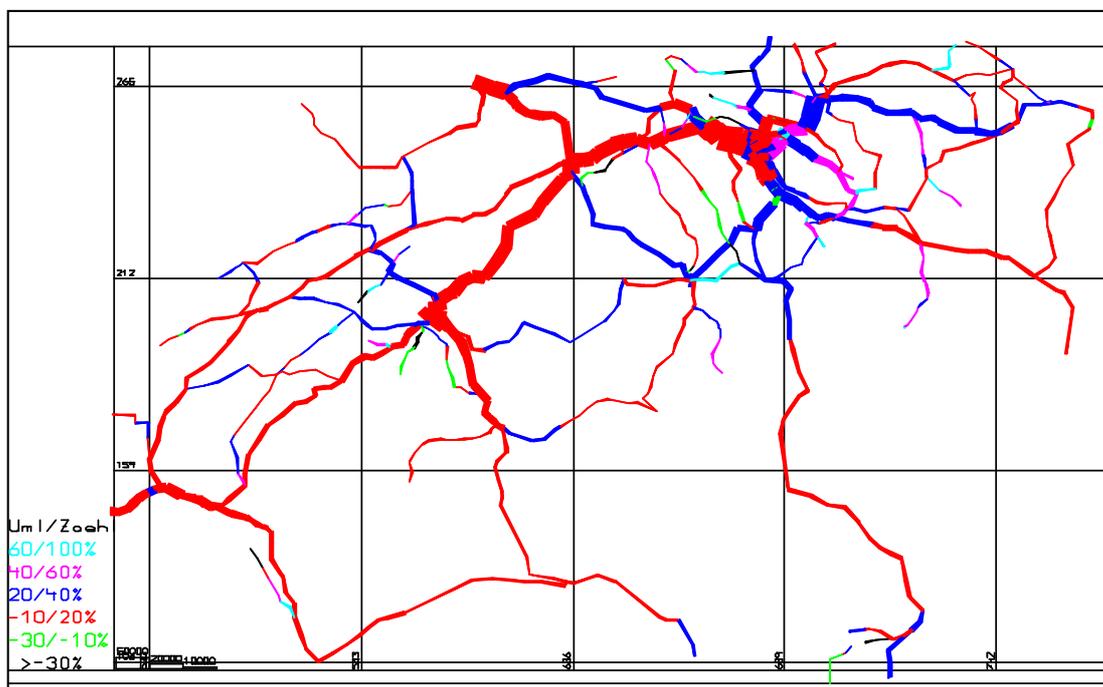
Mit diesen Erweiterungen konnte im Verkehrsmodell eine realitätsnahe Routenwahl abgebildet werden. Die erreichte Umlegungsqualität wird vor allem durch die Analyse der Quell-Ziel-Beziehungen an einem Querschnitt („Spinnenanalyse“), den Vergleich der Modell- und Zählquerschnittsbelastungen, o.g. Bahnstreckenanalyse, sowie durch im Modell vorhandene Möglichkeiten zur Verfolgung aller gewählten Routen überprüft. Durch die richtig abgebildete Routenwahl im Verkehrsmodell hat sich die Aufgabe des nachfolgenden Arbeitsschritts, der Kalibration von der Quell-Ziel-Matrix, sehr vereinfacht.

Umlegungsergebnisse mit ursprünglicher Ausgangsmatrix

Ein richtig abgebildetes Verkehrsangebot ist neben dem Umlegungsalgorithmus und den richtigen Zählquerschnittsdaten eine der Voraussetzungen für die Kalibration der Quell-Ziel-Matrix. Bei einer nicht realitätsentsprechenden Routenwahl im Verkehrsmodell führt jede Kalibration der Quell-Ziel-Matrix zu einer Verfälschung der Ausgangsmatrix. Diese Matrix (Ausgangsmatrix) wurde aufgrund der Querschnittszählungen und der Stichproben-Matrix aus der FQ-Befragung (Frequenzerhebung der SBB) auf einen durchschnittlichen Werktag hochgerechnet. Da die im Modell implementierten Verkehrsangebots- und Zählquerschnittsdaten sehr gut abgesichert und als realitätsnah zu betrachten sind, sollten sich mit dem „richtigen“ Umlegungsmodell und der „richtigen“ Quell-Ziel-Matrix zwischen den Zählquerschnittsdaten und den Modellbelastungen kaum nennenswerte Unterschiede zeigen. Durch die Plausibilisierung und Verbesserung der beschriebenen Komponenten des Verkehrsmodells konnte hier die Qualität der hochgerechneten Quell-Ziel-Matrix geprüft werden. Ein Vergleich zwischen Zählquerschnittsdaten und der Modellumlegung mit der hochgerechneten Ausgangsmatrix ist in der Abbildung 2 und 3 dargestellt.

Nach einer detaillierten Analyse der Umlegungsergebnisse wurde festgestellt, dass die Abweichungen zwischen den Zählquerschnittsdaten und der Modellumlegung (ca. 80% der Querschnitte haben weniger als 30% Abweichung) vor allem durch die hochgerechnete Quell-Ziel-Matrix bzw. die Qualität und Auswertung der Befragungsmatrix verursacht wurden. Daraus hat sich ergeben, dass eine Kalibration dieser Matrix (mit den vorhandenen Querschnittszählungen) sinnvoll ist. Dadurch wird der Fehler, der sich durch die nicht vollständige Repräsentativität der Stichprobe gegenüber der Grundgesamtheit ergeben hat, korrigiert.

Abbildung 2 Abweichungen zwischen Zählquerschnittsdaten und der Modellumlegung
(Relativ / Mit Ausgangsmatrix, ohne Kalibration)



Kalibration der Quell-Ziel-Matrix

Ziel der Kalibration der Quell-Ziel-Matrix ist es, mit dem Verkehrsmodell die Umlegungsergebnisse der Zählquerschnittsdaten zu reproduzieren. Bei der Kalibration werden Umlegungsergebnisse mit den Zählquerschnitten verglichen. Entsprechend den Abweichungen wird die Quell-Ziel-Matrix korrigiert. Die Kalibration kann auf die Lösung eines linearen Gleichungssystems mit m Gleichungen (Zählquerschnitten) und n Unbekannten (Quell-Ziel-Beziehungen) zurückgeführt werden. Die m Gleichungen lauten [3]:

$$\sum_{j=1}^n (a(i,j) * (x(j)) - q(i) = 0 \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n \quad (5)$$

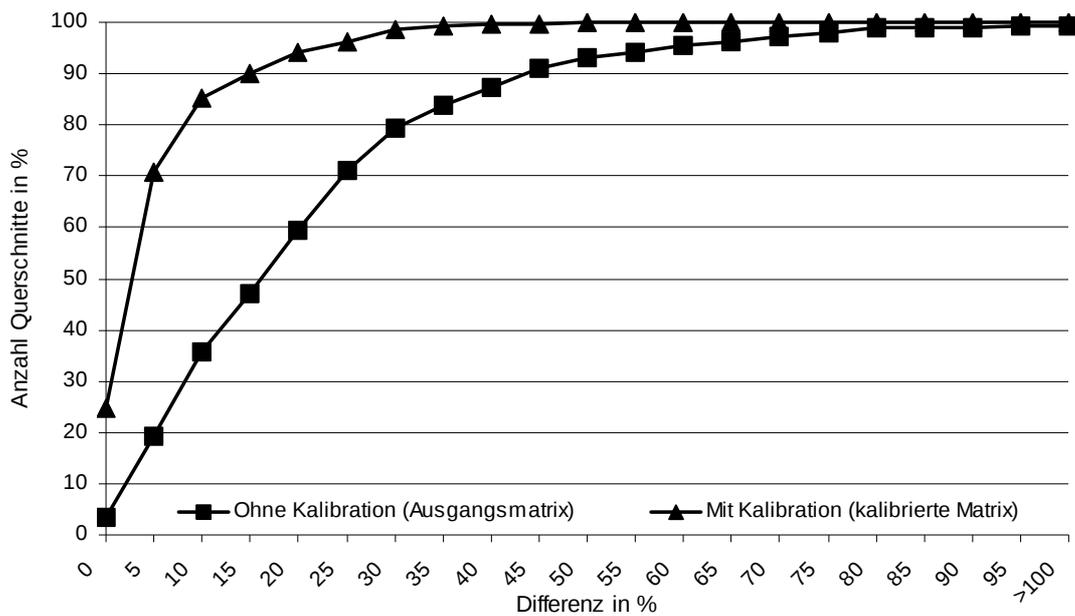
wobei

- $a(i,j)$ = Wert der Quell-/Ziel-Beziehung j im Querschnitt i
- $q(i)$ = Querschnittszählung im Querschnitt i
- $x(j)$ = Korrekturfaktor der Beziehungen

In Anwendungsfall ist m viel kleiner als n bzw. die Anzahl Querschnitte ist viel kleiner als die Anzahl Beziehungen. Die Konsequenz ist, dass es sehr viele Lösungsvektoren x gibt, die eine gute Lösung darstellen. Die Qualität der Kalibrationsergebnisse ist deshalb von der Anzahl der Zählquerschnitte im Netz abhängig. Die Querschnitte mit verfügbaren Zählwerten (1960 Strecken) sind in Abbildung 2 dargestellt. Eine zusätzliche Anforderung an das Verkehrsmodell ist, dass die vorhandene Struktur der Wunschlinien-Matrix (z.B. Distanzverteilung) durch die Kalibration nicht verloren gehen darf. Da zudem das Optimum relativ flach ist, kann es vorkommen, dass die Distanzverteilung der Beziehungen stark verzerrt wird. Üblicherweise werden kurze Beziehungen überbevorzugt, während lange im Resultat untervertreten sind. Dieses Phänomen kann praktisch eliminiert werden, indem die Distanzverteilung (aus der Ausgangsmatrix) als Nebenbedingung aufgenommen wird.

Das Gleichungssystem wird nach der Methode der Entropy-Minimierung iterativ gelöst. Die resultierende Matrix ist die wahrscheinlichste, die einerseits die Distanzverteilung der Ursprungsmatrix respektiert und andererseits nach der Umlegung Belastungen produziert, die die gezählten Werte möglichst annähern.

Abbildung 3 Vergleich zwischen Modellquerschnittsbelastungen und Querschnittszählungen (mit und ohne Kalibration)



Wie aus der Umlegungsanalyse ohne Kalibration zu sehen ist, war die Qualität der hochgerechneten Quell-Ziel-Matrix auf einem sehr hohen Niveau, so dass bei automatischer Kalibration mit einem Kalibrationsschritt und relativ kleinem Korrekturfaktor (Spannweite 1.05 / 0.75) eine endgültige Quell-Ziel-Matrix ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass eine Quell-Ziel-Beziehung maximal +5% und -25% korrigiert werden darf. Im Rahmen der vorgegebenen Parameter lässt sich mit o.g. Kalibrationsansatz mittels Iterationsverfahren für jede Quell-Ziel-Beziehung ein optimaler Korrekturfaktor ermitteln. Die Qualität der Kalibration wurde durch den Vergleich der Umlegungsergebnisse und Zählquerschnitte (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4), sowie durch Änderungen des Verkehrspotentials der Zonen (Produktion und Attraktion) und der Distanzverteilung (siehe Tabelle 2) beurteilt.

Tabelle 2 Distanzverteilung der Quell-Ziel-Matrix vor und nach der Kalibration

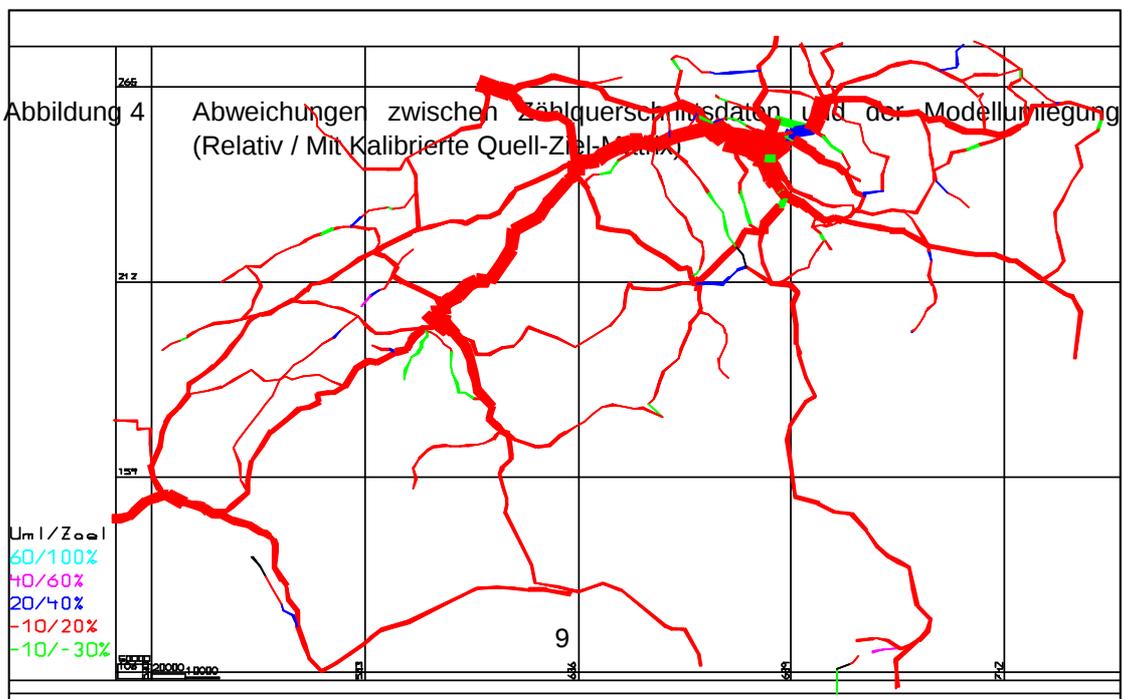
km-Klasse	KEP - Matrix* in %	SBB (hochgerechnete)- Ausgangsmatrix (ohne Kalibration) in %	SBB (hochgerechnete)- Matrix (mit Kalibration) in %	Veränderung durch die Kalibration in %
< 10 km	22.0	18.4	18.7	-0.3
< 20 km	49.2	41.3	41.7	-0.4
< 30 km	66.8	59.6	59.6	0.0
< 40 km	74.3	69.3	69.2	0.1
< 50 km	78.9	75.1	74.8	0.3
< 60 km	83.0	79.1	78.8	0.3
< 70 km	85.5	82.5	82.2	0.3

< 80 km	87.5	84.4	84.2	0.2
< 90 km	89.3	86.9	86.6	0.3
< 100 km	91.9	88.5	88.3	0.2
< 150 km	96.4	93.2	93.1	0.1
< 200 km	98.3	95.0	95.0	0.0
> 200 km	100.0	100.0	100.0	0.0

(*) KEP - Kontinuierliche Erhebung Personenverkehr (1997) erfasst das Reiseverhalten der Schweizer

Wohnbevölkerung im Alter zwischen 15 und 84 Jahren (ca. 16 000 Personen).

Bei der Kalibration ergaben sich keine signifikante Veränderungen in der Verteilung der Beziehungen nach Distanzklassen (Tabelle 2). Damit wurde die Qualität und die Struktur der Quell-Ziel-Matrix durch die Kalibration nicht verändert. Aus der Umlegungsanalyse nach der Kalibration (Abbildung 3 und 4) geht hervor, dass 90% der Querschnitte weniger als 15% und 10% der Querschnitte mehr als 15% Abweichungen gegenüber den Zählenden haben, was als ein sehr gutes Ergebnis zu bezeichnen ist. Bei den Querschnitten mit mehr als 15% Abweichung ist zu überprüfen, ob dies auf die Zählenden oder die Matrix zurückzuführen ist, um in der Folge weitere Korrekturen durchzuführen.



[Uml / Zael = Abweichungen zwischen der Modellumlegung und Zählquerschnittsdaten in %]

Da die Zählquerschnittsdaten auch eine Unsicherheit besitzen können, ist zu empfehlen, keine weitere automatische Kalibration der Quell-Ziel-Matrix vorzunehmen, sondern durch eine detaillierte Analyse (Zählraten und Quell-Ziel-Matrix) die Ursachen für die Abweichungen festzustellen und zu korrigieren.

Fazit

Hier wurde gezeigt, wie mit empirischen Daten Modellparameter abgeleitet werden können und mit dem entsprechenden Umlegungsalgorithmus eine ausreichende Genauigkeit beim Routenwahlmodell erreicht werden kann. Ein realitätsnah abgebildetes Verkehrsangebot (mit genauer Bewertung der Einflussfaktoren) und ein entsprechender Umlegungsalgorithmus sind die Voraussetzungen, die Quell-Ziel-Matrix zu eichen. Bei diesem Prozess sollten neben Querschnittsbelastungen mindestens die Distanzverteilung und die aus den Befragungen vorhandenen Quell-Ziel-Verhältnisse als Nebenbedingung beibehalten werden. Dafür ist eine zusätzliche, gezielte Erhebung (neben der vorhandenen empirischen Datenbasis) für die Ermittlung wesentlicher Modellparameter im betrachteten Untersuchungsgebiet zu empfehlen. Weitere Forschungsarbeiten sollten sich vor allem auf die dynamische Routenwahlmodelle konzentrieren.

Literatur

- [1] Ackermann, T. (1998) Die Bewertung der Pünktlichkeit als Qualitätsparameter im Schienenpersonenverkehr auf Basis der direkten Nutzenmessung, VWI an der Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [2] Arbeitsgemeinschaft Zivilingenieurbüro Sammer Graz – Prognos AG Basel (1998) Bundesverkehrswegeplan Österreich, Modellrechnung Personenverkehr, Graz und Basel.
- [3] de Rham, C. (1999) Polydrom Benutzer Manual, System Consult, Monaco.
- [4] Dial, R.B. (1971) A probalistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration, *Transportation Research* 5, 83-111.
- [5] Dial, R.B. (1979) A model and algorithm for multicriteria route-mode choice. *Transportation Research*, Vol.13B, 311-316.
- [6] Krämer, T. (1992) Der Modal-Split im Personenfernverkehr, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen.
- [7] Kritzing, S., M. Vrtic und S. Rommerskirchen (1997) Traffic and revenue study for fixed Warnow crossing, Rostock, Bericht an die Warnowquerung GmbH&Co.KG, St.-Quentin-enYvelines, Prognos AG, Basel.
- [8] Nielsen O. and G. Jovicic (1999) A large scale stochastic timetable-based transit assignment model for route and sub-mode choices, Vortrag bei der European Transport Conference, Cambridge, September 1999.
- [9] Sheffi Y., R. Hall, C. Daganzo (1982) On the estimation of the multinomial probit model. *Transportation Research*, Vol.16A, 447-456.
- [10] TetraPlan A/S, Möller-Pederson J. (1999) Assignment model for timetable based systems (Tpschedule), Vortrag bei der European Transport Conference, Cambridge, September 1999.
- [11] Vrtic M., R. Koblo und M. Vödisch (1999) Entwicklung bimodales Personenverkehrsmodell als Grundlage für Bahn 2000, 2. Etappe, Modellierungsauftrag 1, Bericht an die SBB und den Dienst für Gesamtverkehrsfragen, Prognos AG, Basel.
- [12] $F_{ij,k} = F_{ij} * P_{ij,k}$;
wobei $F_{ij,k}$ - Teilverkehrsstrom der Verkehrsbeziehung ij, der den Weg k benutzt,
 $P_{ij,k}$ - Wahrscheinlichkeit für die Benutzung des Weges k zwischen den Zone i und j,
 F_{ij} - Verkehrsstrom der Verkehrsbeziehung i,j