

Simulation von Verkehrsnetzbelastungen ohne speziellen Erhebungsaufwand

Jürgen Harders und Jürgen Gerlach

1. Einleitung

Grundlage zur Gestaltung der Verkehrsnetze aller Verkehrssysteme bildet die Kenntnis der vorhandenen sowie die Abschätzung der zukünftigen verkehrlichen Verflechtungen. Das Verflechtungspotential wird in Form von Quelle-Ziel-Matrizen abgebildet, die alle Verkehrsbeziehungen zwischen den Verkehrszellen eines Untersuchungsgebietes enthalten.

Die Auswirkungen einer Planungsmaßnahme, wie

- eine beabsichtigte Netzergänzung (z.B. Ortsumgehung),
- der Rückbau/die Umgestaltung einer Netzmasche oder
- der Einsatz von Abbiegeverboten,

können nur dann hinreichend bewertet werden, wenn die Verkehrsströme zwischen Quellen und Zielen realistisch erfaßt, abgebildet und prognostiziert sind. Dabei bildet die Ermittlung der Verkehrsverlagerungseffekte (z.B. Verkehrswert einer Netzergänzung, Entlastungen in sensiblen Bereichen) die Grundlage zur Beurteilung der Planungsmaßnahmen im Verkehrsnetz (Beispiel: Bild 1).

Die Belastungen der Netzstrecken werden mit Hilfe von Verkehrsumlegungsmodellen abgebildet. Verkehrsumlegungsmodelle dienen dazu, den Strecken eines Verkehrswegenetzes die Ströme der Verkehrsbeziehungen des zugehörigen Untersuchungsgebietes zuzuweisen, indem das Wegewahlverhalten der Verkehrsteilnehmer modelliert wird. Als Basis der Verkehrsumlegung wird eine Matrix der Verkehrsbeziehungen benötigt, die die Verkehrsmengen zwischen den Quellen i und den Zielen j angibt, die in einem bestimmten Zeitintervall nachgefragt werden.

Mit Hilfe von Befragungszählungen, wie

- Kordon-Befragungen,
- Haushalts- oder Betriebsbefragungen,
- Fahrgastbefragungen,

können Werte der zu bestimmenden f_{ij} -Matrix besetzt werden. Eine vollständige Erfassung aller Verkehrsbeziehungen ist aufgrund der mit den Befragungszählungen verbundenen hohen Kosten jedoch kaum möglich; oftmals muß in der derzeitigen Planungspraxis, auch infolge der technischen und rechtlichen Schwierigkeiten, auf diese Art der Erhebung verzichtet werden.

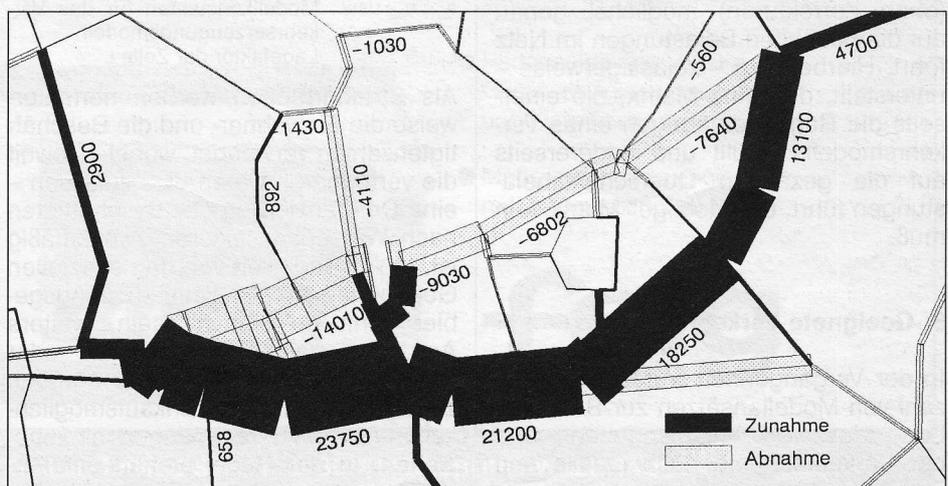
Schon seit längerer Zeit wird versucht, den Erhebungsaufwand einzuschränken. So kann bei rechnerischer Ermittlung des Binnenverkehrs eines Zählkordons auf Haushalts- und Betriebsbefragungen verzichtet werden; die Kordonbefragung bleibt allerdings weiterhin erforderlich.

Vor dem Hintergrund der erwünschten Aufwandsreduzierung gewinnen Verfahren, die die Ableitung von Verkehrsmatrizen bei gänzlichem Verzicht auf Befragungszählungen zugunsten von wesentlich kostengünstiger durchzuführenden Querschnittszählungen ermöglichen, zunehmend an Bedeutung. Ein solches Verfahren soll im folgenden vorgestellt werden.

Querschnittsbelastungen allein, auch wenn sie für nahezu alle Strecken des Netzes vorliegen, liefern ein hochgradig unbestimmtes Gleichungssystem, aus dem sich unendlich viele Lösungen für eine Matrix ableiten lassen. Es sind daher zusätzliche Informationen erforderlich, um zu einer eindeutigen Lösung zu gelangen. Dazu werden hier Strukturdaten und die Gesetzmäßigkeiten von Verkehrsmodellen herangezogen.

Kernpunkt des beschriebenen Verfahrens ist eine Kombination aus Verkehrsmodellrechnung und Matrixabgleich. Als Eingangsgrößen werden ausschließlich die Ergebnisse von Querschnittszählungen sowie Strukturdaten der Verkehrszellen benötigt.

Verkehrsmodelle der Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung leiten das Verkehrsaufkommen in einer Region aus den verkehrserzeugenden Strukturen und der Lage dieser Strukturen zueinander ab. Dabei wirken allgemeingültige Zusammenhänge, die sich durch mathematische Ansätze beschreiben lassen, und gebietsspezifische Besonderheiten zusammen. In jedem Einzelfall ist daher eine Eichung der Modellansätze durch Anpassung bestimmter Modellparameter an die örtlichen Gegebenheiten erforderlich. Diese Eichung erfolgt beim vorgestellten



1: Ermittelte Verkehrsverlagerungseffekte einer Ortsumgehung

Vortrag auf dem Internationalen Bauinformatikkongress, Berlin, Juli 1995

Verfasseranschrift: Dr.-Ing. Harders, Dr.-Ing. Gerlach, Ingenieurgesellschaft Stolz mbH, IGS, Broicherdorfstraße 11, 41564 Kaarst

ten Ansatz anhand gezählter Querschnittsbelastungen.

Das Ziel der Kombination aus Verkehrsmodellrechnung und Matrixabgleich besteht darin, in einem iterativen Verfahren eine Matrix zu erzeugen, die sowohl die im Straßennetz gezählten Querschnittsbelastungen liefert als auch die Bedingungen eines Verkehrsmodells erfüllt. Dabei spiegelt das Verkehrsmodell den durch Strukturdaten begründeten Ziel- und Quellverkehr der Verkehrszellen sowie die durch Attraktivitäten begründete Aufteilung des Quellverkehrs jeder Zelle auf die in Frage kommenden Zielzellen wider.

2. Lösungsansatz

Im ersten Schritt wird mit Hilfe eines Verkehrsmodells die Näherungslösung für eine Matrix der Fahrten zwischen den Verkehrszellen abgeleitet, wobei als Eingangsgrößen für die Berechnungen geschätzte Modellparameter verwendet werden. Diese Matrix wird benutzt, um mit Hilfe einer Umlegung eine erste Schätzung der Verkehrsbelastungen im Untersuchungsnetz abzuleiten.

Die so errechneten Belastungen werden mit Zählwerten verglichen, und die einzelnen Werte in der Matrix werden mit Hilfe eines Matrixkorrekturverfahrens so weit verändert, daß berechnete und gezählte Querschnittsbelastungen (auch Richtungsbelastungen und Knotenpunktsströme) möglichst gut übereinstimmen. Die veränderte Matrix wird dann wie eine durch Zählungen ermittelte Matrix behandelt und als Eingangsdatei für die Ableitung von Modellkonstanten des Verkehrsmodells benutzt.

Im allgemeinen ist dieses Verfahren in einem iterativen Rechengang mehrmals zu durchlaufen, bis eine modellgerechtere Matrix erzeugt ist, die (ohne Korrekturen) möglichst genau auf die gezählten Belastungen im Netz führt. Hierbei wird – zulässigerweise – unterstellt, daß eine Matrix, die einerseits die Randbedingungen eines Verkehrsmodells erfüllt und andererseits auf die gezählten Querschnittsbelastungen führt, die „richtige“ Matrix sein muß.

3. Geeignete Verkehrsmodelle

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von Modellansätzen zur Beschreibung des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsströme nach Quelle und Ziel entwickelt, die sehr unterschiedliche Anforderungen an die Datenbasis

stellen. Teilweise greifen sie auf Daten zurück, über die allgemein verfügbare Statistiken geführt werden, zum Teil werden aber auch sehr differenzierte und spezielle Angaben verwendet, die umfangreiche Datenerfassungen und sogar eigene Datenerfassungen erfordern. Die Zielsetzung, eine Matrix mit minimiertem Erhebungsaufwand zu erstellen, grenzt die Auswahl der Verkehrsmodelle auf die erstgenannte Gruppe ein. Dies gilt um so mehr, als zur Beschreibung des Ziel- und Quellverkehrs des Untersuchungsgebietes sowie der bedeutsamen Ströme im Durchgangsverkehr auch Daten für die Zellen des Umlandes bis hin zum Fernbereich benötigt werden, die der für das Untersuchungsgebiet selbst zuständige Auftraggeber normalerweise nicht liefern kann.

Damit schränkt sich der Kreis der verwendbaren Modellansätze ein, und man kommt auf die klassischen Ansätze zurück, die das Verkehrsaufkommen der einzelnen Zellen auf deren Strukturdaten und die Verteilung der Verkehrsströme im Raum auf das Verkehrspotential der übrigen Zellen und die Lage der Zellen zueinander zurückführen.

Die „Verkehrserzeugung“, d.h. die Anzahl der in jeder Zelle beginnenden oder endenden Fahrten (Quellverkehr und Zielverkehr der Zellen), ergibt sich danach aus folgenden Gesetzmäßigkeiten:

$$Q_i = L_i (a_{q1} \cdot S_{1i} + a_{q2} \cdot S_{2i} + a_{q3} \cdot S_{3i} + \dots) \quad (1a)$$

$$Z_i = L_i (a_{z1} \cdot S_{1i} + a_{z2} \cdot S_{2i} + a_{z3} \cdot S_{3i} + \dots) \quad (1b)$$

Darin bedeutet:

Q_i und Z_i : Quellverkehr und Zielverkehr des Verkehrsgebietes i (alle in der Verkehrszelle i beginnenden bzw. endenden Fahrten)

S_{1i}, S_{2i} usw.: Strukturgrößen der Zelle i
 a_{q1}, a_{q2} usw.: Modellkonstanten für das Verkehrserzeugungsmodell

L_i : Lagefaktor der Zelle i .

Als Strukturgrößen werden normalerweise die Einwohner- und die Beschäftigtenzahlen verwendet, wobei – soweit die verfügbaren Daten dies zulassen – eine Differenzierung der Beschäftigten nach Wirtschaftssektoren zweckmäßig ist. In Abhängigkeit von den speziellen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet kann es sinnvoll sein, weitere Angaben wie z.B. Schulplätze oder Studienplätze oder auch Kenngrößen zur Beschreibung der Einkaufsmöglichkeiten in die Berechnungen einzubeziehen. In der Regel stehen differenziertere Strukturdaten nur für den Bereich der Gemeinde oder des Kreises

zur Verfügung, für die man eine Untersuchung durchführt; bei den Zellen im Umland ist deshalb eine Beschränkung auf Einwohnerzahlen und allenfalls noch Beschäftigtenzahlen erforderlich. Für den Umlandbereich ergibt sich daraus allerdings keine Einschränkung der Genauigkeit, da bei größeren Verkehrszellen, wie sie außerhalb des Untersuchungsgebietes definiert werden, die Verhältnisse zwischen Einwohner- und Beschäftigtenzahlen sowie eventuellen sonstigen Strukturgrößen sich sehr stark annähern und das Verkehrsaufkommen sich damit auch durch eine einzige Kenngröße beschreiben läßt. Die Lagefaktoren dienen dazu, Einflüsse zu berücksichtigen, die durch die Strukturdaten allein nicht hinreichend erfaßt werden. Hierzu gehören beispielsweise unterschiedliche Bedienungsqualitäten im ÖPNV, die bei gleichen Strukturdaten ein unterschiedliches Verkehrsaufkommen im Kfz-Verkehr hervorrufen können. Wo derartige Einflüsse nicht vorliegen, kann das Modell auch ohne Lagefaktoren verwendet werden; dann gilt für alle Zellen $L_i = 1$. Die Konstanten des Verkehrsmodells werden durch Regressionsrechnungen aus dem Ziel- und Quellverkehr der Zellen und ihren Strukturdaten abgeleitet. Der klassische Weg dabei ist die Berechnung der Konstanten unter Benutzung einer aus Zählungen ermittelten Matrix. Hier erfolgt – wie bereits eingangs erläutert – die Ableitung dieser Daten in einem iterativen Rechenprozeß aus der anhand gezählter Querschnittsbelastungen korrigierten Matrix.

Der nach den Formeln 1a und 1b definierte Ziel- und Quellverkehr umfaßt bei den Verkehrszellen im Untersuchungsgebiet alle in einer Verkehrszelle endenden bzw. beginnenden Fahrten, so daß die Werte Q_i und Z_i den Zeilen- und Spaltensummen der Matrix entsprechen. Bei den Verkehrszellen im Umland werden nur die Beziehungen zum Untersuchungsgebiet sowie ausgewählte Ströme des Durchgangsverkehrs in die Matrix übernommen, so daß die nach den Formeln berechneten Werte nur als Potentiale anzusehen sind; die Zeilen- und Spaltensummen für diese Zellen sind zum Teil sehr viel kleiner als die nach den Formeln ermittelten Werte.

Nach dem bisher Gesagten wird klar, daß innerhalb einer Untersuchung unterschiedliche Formeln für das Verkehrsaufkommen nach den Ansätzen 1a und 1b in Abhängigkeit von den jeweils verfügbaren Strukturgrößen benutzt werden müssen. Es werden mindestens zwei Ansätze mit differenzierteren Strukturgrößen im Untersu-

chungsgebiet und einfacheren Daten im Umland erforderlich; falls die verfügbaren Strukturdaten es zulassen, kann aber auch nach mehreren Bereichen, beispielsweise unter Berücksichtigung von Einwohnern und Beschäftigten im nahen Umland und der Einwohner allein im Fernbereich, unterschieden werden.

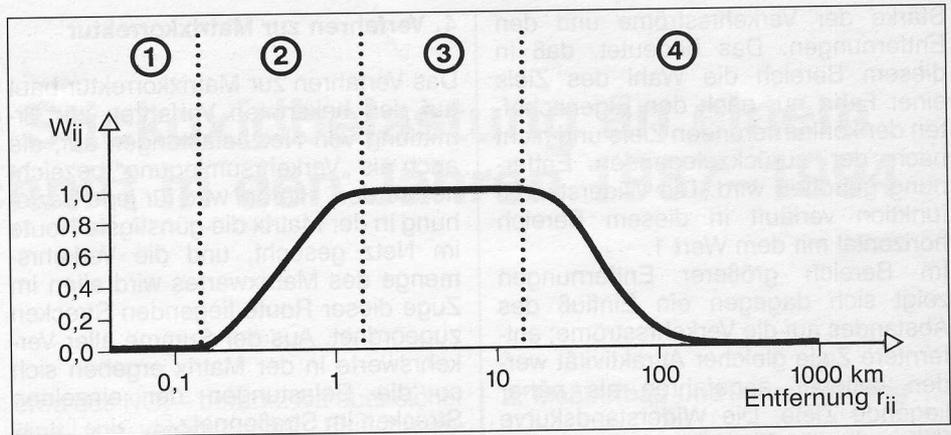
Aus dem Verkehrsaufkommen der einzelnen Zellen und den Entfernungen zwischen den Zellschwerpunkten lassen sich die einzelnen Verkehrsströme über das „Verkehrsverteilungsmo-
dell“ ermitteln, für das folgende Formel gilt:

$$f_{ij} = W_{ij} \cdot \frac{Q_i \cdot Z_j}{k} \quad (2)$$

Darin bedeutet:

- f_{ij} = Verkehrsstrom von der Verkehrszelle i zur Verkehrszelle j
- w_{ij} = Widerstandsbeiwert (abgeleitet aus der Entfernung zwischen den Zellen i und j)
- Q_i = Quellverkehr der Verkehrszelle i (gemäß Formel 1a)
- Z_j = Zielverkehr der Verkehrszelle j (gemäß Formel 1b)
- k = Konstante zur Kalibrierung der Formel.

Aufgrund der Ähnlichkeit dieser Formel mit einigen Formeln aus der Physik wird dieser Modellansatz auch „Gravi-



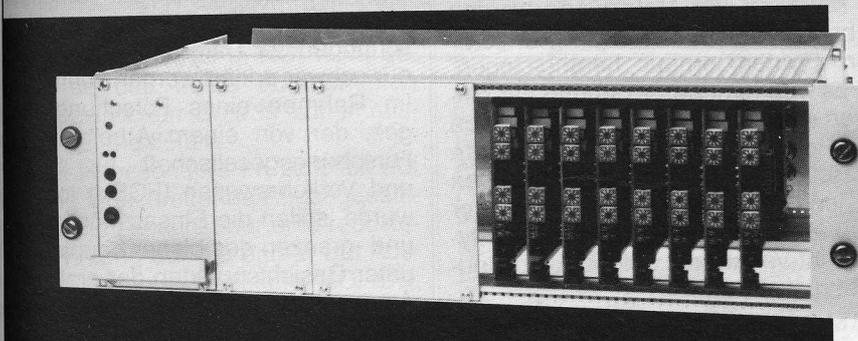
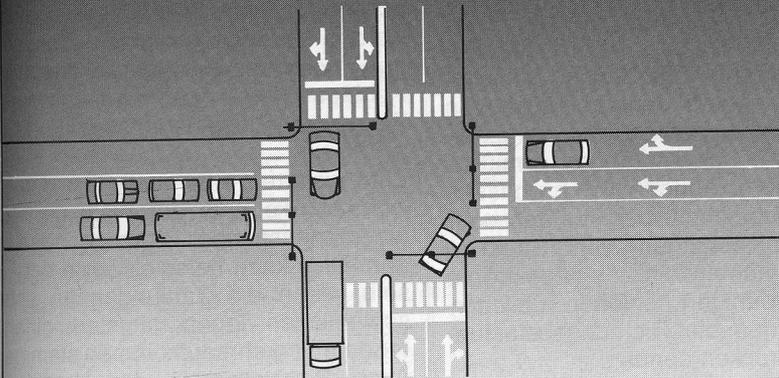
2: Genereller Verlauf der Widerstandsfunktion

tationsmodell“ genannt. Die Bezeichnung ist allerdings nicht ganz gerechtfertigt, da im Gravitationsgesetz der Physik die Entfernung einen sehr starken Einfluß ausübt, während bei der Verkehrsverteilung vor allem im Bereich kürzerer Entfernungen nur eine geringe Abhängigkeit gegeben ist. Der generelle Verlauf der Widerstandsfunktion ist im Bild 2 wiedergegeben. Sie läßt sich in vier Abschnitte einteilen, die in ihrer Ausdehnung sehr unterschiedlich sind; im Bild 2 ist daher für die Entfernung eine logarithmische Skala verwendet worden.

Im Bereich sehr kurzer Entfernungen ist die Benutzung eines motorisierten Verkehrsmittels nicht sinnvoll, da beim Kfz-Verkehr die Parkplatzsuche und beim ÖPNV die Wege von und zur Haltestelle sich ungünstiger darstellen als ein Fußweg. Die Widerstandskurve hat hier den Wert 0.

Der zweite Bereich umfaßt den Übergang von den sehr kurzen Beziehungen zum Normalbereich; hier steigt die Widerstandskurve vom Wert 0 auf den Wert 1 an. Im daran anschließenden Bereich mittlerer Entfernungen besteht keine Abhängigkeit zwischen der

Verkehrslenkung für die Zukunft



- 2 und 4 Kanal LSA-Detektor VEK M 2/4 mit automatischer Frequenz- und Empfindlichkeitseinstellung
- Geschwindigkeitsdetektor VEK S3 mit Klassifizierung nach TLS
- Fahrzeug-Identifizierungssysteme zur Beschleunigung des ÖPNV, Zugangskontrolle, Innenstadt- abspernung, usw.
- Radarmeßgeräte MWD zur Geschwindigkeitsmessung und Klassifizierung nach TLS
- Mobile Stauwarnanlage mit Mikrowellendetektor

feig
electronic

FEIG ELECTRONIC GMBH · LANGE STR. 4 · D-35781 WEILBURG-WALDHAUSEN
TEL. 0 64 71 / 31 09-0 · TELEFAX 0 64 71 / 31 09-99

Stärke der Verkehrsströme und den Entfernungen. Das bedeutet, daß in diesem Bereich die Wahl des Ziels einer Fahrt nur nach den Eigenschaften der konkurrierenden Ziele und nicht nach der zurückzulegenden Entfernung getroffen wird. Die Widerstandsfunktion verläuft in diesem Bereich horizontal mit dem Wert 1.

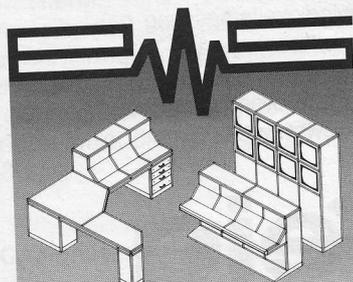
Im Bereich größerer Entfernungen zeigt sich dagegen ein Einfluß des Abstandes auf die Verkehrsströme; entferntere Ziele gleicher Attraktivität werden seltener angefahren als näher liegende Ziele. Die Widerstandskurve fällt in diesem Bereich vom Wert 1 auf den Wert 0 ab; allerdings ist eine Obergrenze für diesen Bereich nicht zu definieren, so daß die Annäherung an den Wert 0 asymptotisch erfolgt. Für den Bereich großer Entfernungen läßt sich die Widerstandskurve durch folgende Funktion darstellen:

$$W_{ij} = a \cdot r_{ij}^b \quad (3)$$

mit: r_{ij} = Entfernung zwischen den Zellen i und j
 a, b = Modellkonstanten.

Die Ausdehnung der einzelnen Bereiche der Widerstandsfunktion ist im Prinzip vom Fahrzweck und auch vom Untersuchungsgebiet abhängig. Die Gegenüberstellung mit gezählten Querschnittsbelastungen macht allerdings die Verwendung einer für alle Fahrzwecke gemittelten Widerstandskurve erforderlich.

Der hier beschriebene Ansatz für das Verkehrsmodell hat sich bei verschiedenen Anwendungen bewährt. Grundsätzlich ist er aber nur als Beispiel anzusehen, und es ließen sich auch andere Modelle einsetzen, wenn sie mit allgemein verfügbaren Eingangsdaten auskommen und geeignet sind, auch den Ziel- und Quellverkehr des betrachteten Untersuchungsgebietes sowie die benötigten Verkehrsströme im Durchgangsverkehr modellmäßig nachzubilden.



LEITSTÄNDE · KONSOLEN
 19"-SCHRÄNKE · MONITORWÄNDE
 RAUMAUSSTATTUNGEN
 in kostensparender Systembauweise

EHMKI, SCHMID & CO. GmbH, 85716 Unterschleißheim
 Ohmstraße 3 · Tel.: 0 89/310 20 91 · Fax: 0 89/310 91 54

4. Verfahren zur Matrixkorrektur

Das Verfahren zur Matrixkorrektur baut auf den bekannten Verfahren zur Ermittlung von Netzbelastungen auf, die auch als „Verkehrsumlegung“ bezeichnet werden. Hierbei wird für jede Beziehung in der Matrix die günstigste Route im Netz gesucht, und die Verkehrsmenge des Matrixwertes wird allen im Zuge dieser Route liegenden Strecken zugeordnet. Aus der Summe aller Verkehrswerte in der Matrix ergeben sich so die Belastungen der einzelnen Strecken im Straßennetz.

Zur Erfassung einiger Besonderheiten des Kraftfahrzeugverkehrs wie beispielsweise individuelle Kriterien bei der Routenwahl, Aufteilung der Verkehrsströme auf mehrere Alternativrouten oder Anpassung der Routenwahl an die Belastungszustände des Netzes wurden Erweiterungen und Verfeinerungen dieses Grundprinzips entwickelt. Eines der am häufigsten verwendeten Verfahren, das auch für die Matrixkorrektur übernommen wurde, ist das Capacity-Restraint-Verfahren, bei dem in mehreren Schritten jeweils ein Teil der Belastung auf das Netz umgelegt wird und die in den vorangegangenen Schritten den Strecken zugeordneten Verkehrsmengen bei der Berechnung der günstigsten Route berücksichtigt werden.

Mit Hilfe dieses Berechnungsverfahrens wird zunächst die sich aus der vorhandenen Matrix ergebende Belastung des Verkehrsnetzes ermittelt. Für jeden Querschnitt, für den ein Zählwert vorliegt, wird aus dem Vergleich von gezählter und berechneter Verkehrsmenge ein Korrekturfaktor ermittelt. Diese Faktoren können sich grundsätzlich auf Querschnittsbelastungen oder Richtungsbelastungen von Strecken oder auch auf einzelne Abbiegeströme an Knotenpunkten beziehen; üblicherweise werden die Richtungsbelastungen der Strecken benutzt.

Zur Korrektur der Matrixwerte werden die bei der Verkehrsumlegung abgeleiteten Routen erneut herangezogen, und es wird für jede Beziehung der Mittelwert aller Korrekturfaktoren der von den Routen berührten Querschnitte mit Zählwerten gebildet. Dabei werden für jede Quelle-Ziel-Beziehung der Matrix alle im Zuge des Capacity-Restraint-Verfahrens aufgebauten Routen berücksichtigt.

Der Matrixwert wird anschließend mit dem gemittelten Faktor korrigiert. Dabei ist es möglich, höchstzulässige Abweichungen vom Ausgangswert festzulegen, um eine zu weit gehende Veränderung der Matrix zu verhindern.

Eine erneute Verkehrsumlegung mit der korrigierten Matrix ergibt in der Regel Streckenbelastungen, die näher an den Zählwerten liegen, aber noch nicht exakt mit ihnen übereinstimmen. Diese begrenzte Wirkung eines Korrekturschritts ist vor allem auf die Mittelung der Korrekturfaktoren zurückzuführen. Das Verfahren ist daher mehrfach zu wiederholen, bis eine hinreichende Übereinstimmung von gerechneten und gezählten Netzbelastungen erreicht ist; nach den vorliegenden Erfahrungen muß mit etwa 5–10 Iterationsschritten gerechnet werden.

5. Anwendungshinweise und Ausblick

Das beschriebene Verfahren wurde in den vergangenen Jahren für vielfältige Aufgaben angewendet und dabei ständig weiterentwickelt. Da bestimmte Fehler in den Eingangsdaten sowie in der Anwendung des Verfahrens typische Fehlermuster in den Ergebnissen hervorufen, konnte ein Katalog von Anwendungshinweisen erarbeitet werden, mit deren Hilfe Fehler entweder von vornherein vermieden oder anhand ihrer typischen Ergebnisse erkannt und ausgeschaltet werden können.

Voraussetzung für die Matrixkorrektur ist ein richtiger Routenaufbau durch alle Restraint-Stufen hindurch. Das Netzmodell muß daher, bevor die beschriebenen Arbeiten durchgeführt werden können, sorgfältig auf die richtige Zuordnung der Streckentypen, der Abbiegewiderstände und die passende Wahl der Einspeisungspunkte überprüft sein.

Eine weitere Fehlerquelle bei der Anwendung kann in der Wahl nicht zusammenpassender Zählergebnisse liegen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Zählungen an unterschiedlichen Tagen mit stark differierendem Verkehrsaufkommen stammen. Auch Baustellen in der Umgebung einer Zählstelle können zu Verfälschungen der Daten führen, die später nur schwer erklärt werden können.

Im Rahmen eines Forschungsauftrages, der von einem Arbeitskreis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) formuliert wurde, sollen die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen des bisher hauptsächlich unter Gesichtspunkten der praktischen Anwendung entwickelten Verfahrens näher untersucht werden.