

Verkehrsumlegungs-Modelle für stark belastete Strassennetze

Modèles d'affectation pour des réseaux fortement chargés

Traffic assignment models for congested road networks

Forschungsstelle

büro widmer
Bahnhofplatz 76
CH-8500 Frauenfeld
mail@buero-widmer.ch

Begleitkommission

Dr. Niklaus Bischofberger, TBA Kt. Zürich, Präsident
Dr. Casimir de Rham, Systems Consult, Monaco
Marco Sailer, Dip. del Territorio Kt. Tessin, Bellinzona
Markus Stöcklin, Rudolf Keller & Partner AG, Muttenz

Forschungsauftrag SVI 2001/541 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer
Verkehringenieure (SVI)

August 2004

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG

RÉSUMÉ

SUMMARY

1	AUFTRAG	1
1.1	EINLEITUNG	1
1.2	ZIEL DER STUDIE	3
1.3	DANK AN DIE BEGLEITKOMMISSION	3
2	ÜBERSICHT ÜBER DIE MODELLANSÄTZE	4
2.1	EINLEITUNG	4
2.1.1	Routenwahl	5
2.1.2	Verkehrsnetzmodellierung	6
2.1.3	Routensuche	9
2.2	STATISCHE UMLEGUNG MIT FIXER NACHFRAGE-MATRIX	10
2.2.1	Einleitung	10
2.2.2	Best-Weg-Umlegung	10
2.2.3	Inkrementweise Umlegung	10
2.2.4	Inkrementweise Umlegung mit Reload	11
2.2.5	Sukzessives Best-Weg-Verfahren mit Rückrechnung	11
2.2.6	Deterministische Gleichgewichtsverfahren (UE)	12
2.2.7	Methode der aufeinander folgenden Durchschnittswerte (MSA)	13
2.2.8	Stochastische Gleichgewichtsverfahren (SUE)	14
2.3	DYNAMISCHE UMLEGUNG MIT FIXER NACHFRAGE-MATRIX	15
2.4	ELASTISCHE UMLEGUNG	16
2.4.1	Einleitung	16
2.4.2	Elastizitäts-Ansätze	20
2.4.3	"Pseudo-Link" Methode	21
2.4.4	"Schatten-Strassennetze"	22
3	TESTBEISPIELE	23
3.1	EINLEITUNG	23
3.2	TESTANORDNUNG	23
3.2.1	Netz	23
3.2.2	Verkehrsnachfrage	26
3.2.3	Routen durch das Testnetz	27
3.2.4	Getestete Umlegungsmethoden	28

3.3	RESULTATE DER TESTANWENDUNGEN	28
3.3.1	Inkrementweise Umlegung (fixe Nachfrage, ohne dynamische Effekte)	28
3.3.2	Volume Averaging (MSA) (fixe Nachfrage, ohne dynamische Effekte)	30
3.3.3	Deterministisches Gleichgewichts-Verfahren (UE) (fixe Nachfrage)	31
3.3.4	Stochastisches Gleichgewichtsverfahren (SUE) (fixe Nachfrage)	33
3.3.5	"Quasi"-dynamische Umlegung	35
3.3.6	Elastische Umlegung	36
4	BEURTEILUNG DER UMLEGUNGSMETHODEN	38
4.1.1	Einleitung	38
4.1.2	Umlegungs-Algorithmen	38
4.1.3	Umlegung mit/ohne Modellierung der Knotenwiderstände?	40
4.1.4	Umlegung mit/ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte?	41
4.1.5	Umlegung mit/ohne Berücksichtigung der Nachfrage-Elastizität?	41
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	42

LITERATUR

ANHANG 1: Beispiele von Widerstandsfunktionen

ANHANG 2: Ergebnisse der Testanwendungen

ZUSAMMENFASSUNG

Umlegungsmodelle für den MIV bilden die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer ab und berechnen für eine gegebene Verkehrsnachfrage und ein gegebenes Strassennetz die Verkehrsbelastungen und die resultierenden Reisezeiten auf den einzelnen Netzabschnitten. Dazu gelangen in der Praxis verschiedene Algorithmen und Methoden zur Anwendung, von denen die wichtigsten beschrieben und aufgrund der Ergebnisse von Testanwendungen beurteilt werden. Das Hauptaugenmerk gilt dabei Situationen mit stark belasteten Strassennetzen in Agglomerationen und Städten. Die Studie behandelt die in der Praxis häufig vorkommende Aufgabe, eine gegebene heutige oder prognostizierte Verkehrsnachfrage auf das Strassennetz umzulegen, ohne dass eine integrale Rückkopplung mit Nachfrage-, Zielwahl- oder Verkehrsmittelwahlmodellen möglich ist.

Routenwahlmodelle gehen von der Annahme aus, der Verkehrsteilnehmer wähle die mit dem kleinsten Aufwand verbundene Route, um von A nach B zu gelangen, wobei eine Hauptkomponente dieses "Aufwandes" die Reisezeit ist. Die Reisezeit in einem Strassennetz ist von dessen Auslastung abhängig. Mit steigender Verkehrsbelastung sinkt die Geschwindigkeit auf den Strecken und steigt die Wartezeit an den Knoten, es bildet sich Stau. Die auf dem Markt verfügbaren Umlegungsmodelle unterscheiden sich hauptsächlich bezüglich der verwendeten Algorithmen, z.B.

- Inkrementweise Umlegung resp. Sukzessiv-Verfahren,
- deterministisches Nutzer-Gleichgewicht (UE) oder
- stochastisches Nutzer-Gleichgewicht (SUE)

und der folgenden Aspekte:

- Berücksichtigung der belastungsabhängigen Wartezeiten an den Knoten, wenn ja, wie detailliert?
- Berücksichtigung dynamischer Effekte?
- Berücksichtigung der Elastizität der Verkehrsnachfrage?

Am Beispiel eines fiktiven städtischen Strassennetzes werden die oben erwähnten Umlegungs-Algorithmen und -Methoden je für eine Situation mit mittlerer, starker und sehr starker Auslastung des Netzes angewendet. Die Beurteilung der Ergebnisse der Testbeispiele führt zu den folgenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen:

- Als Umlegungs-Algorithmen ist Gleichgewichtsansätzen (UE und SUE) der Vorzug zu geben. Den in der Anwendung aufwändigeren SUE-Ansätzen liegen plausible Annahmen zum Verkehrsverhalten zugrunde. Bei stark ausgelasteten Netzen ergeben aber UE und SUE ähnliche Resultate und in der Literatur werden für solche Situationen UE-Ansätze empfohlen.
- Während bei schwacher Verkehrsnachfrage die Wahl der anzuwendenden Umlegungs-Algorithmen eine wichtige Rolle für die Zuverlässigkeit der Resultate spielen kann, treten bei den hier interessierenden Situationen mit starker Auslastung des Strassennetzes die Fragen der Kapazitäten, der Widerstandsfunktionen, der Dynamik und der Elastizität der Verkehrsnachfrage in den Vordergrund.
- In stark belasteten städtischen Netzen werden die Reisezeiten massgeblich durch die Wartezeiten an den Knoten beeinflusst. Auch für grobe Abschätzungen sollte daher nicht auf die Modellierung der verkehrsabhängigen Knotenwiderstände verzichtet werden.

- Die vereinfachende Annahme statischer Verhältnisse ergibt bei den Umlegungs-Berechnungen für stark belastete Netze unrealistische Resultate (zu hohe Reisezeiten und über der Kapazität liegende Belastungen). Wenn höhere Ansprüche an die Zuverlässigkeit der Resultate gestellt werden, weil diese z.B. als Grundlage für die Variantenbeurteilung benötigt werden, sollten die dynamischen Effekte (Zeitabhängigkeit der Verkehrsnachfrage und zeitabhängiger Durchfluss des Verkehrs durch das Netz) berücksichtigt werden.
- Umlegungsberechnungen für gegenüber dem Ausgangszustand stark gestiegene Verkehrsnachfragen (Prognosematrix) oder wesentliche Änderungen des Verkehrsangebotes (betriebliche Änderungen, Verkehrsberuhigung, Kapazitätsänderungen usw.) ergeben ebenfalls unplausible Ergebnisse, wenn die Elastizität der Nachfrage unberücksichtigt bleibt; in solchen Fällen sollten daher Methoden der elastischen Umlegung angewendet werden.

Wenn, wie in dieser Studie angenommen, eine gegebene Quelle-Ziel-Matrix umgelegt werden muss, also kein Modell der Nachfrage, der Ziel- und Verkehrsmittelwahl verfügbar ist, können mit den vorgestellten heuristischen Methoden die in stark belasteten Netzen an Bedeutung gewinnenden Aspekte der Dynamik und der Nachfrage-Elastizität mindestens teilweise berücksichtigt werden. Höhere Ansprüche an die Zuverlässigkeit und Konsistenz der Ergebnisse lassen sich aber nur mit integrierten, dynamischen Gesamtmodellen erfüllen. Im Hinblick auf die zunehmende Problematik der überlasteten Verkehrssysteme in den Agglomerationen und Städten sollte deren Praxistauglichkeit vorangetrieben werden.

RÉSUMÉ

Les modèles d'affectation servent à représenter le comportement des utilisateurs lors de leur choix d'itinéraires et à calculer la charge du réseau ainsi que les temps de parcours pour un point d'équilibre entre une demande et une offre de transport donnée. Les principaux algorithmes utilisés dans la pratique sont décrits et évalués à l'aide de tests. L'étude s'est concentrée sur les situations chargées dans des villes et des agglomérations. La situation souvent rencontrée en pratique, à savoir l'affectation d'une prévision d'offre à un réseau sans possibilité de rétroaction sur la demande, le choix des destinations ou le choix modal, a été l'objet d'une attention particulière.

Les modèles de choix d'itinéraire partent de l'idée que l'utilisateur minimise l'effort nécessaire pour aller de A à B. Une des composantes principales de cet effort est le temps de parcours qui est lui-même dépendant de la charge du réseau. Lorsque la charge augmente, la vitesse diminue dans les tronçons et les temps d'attente augmentent aux nœuds, il y a congestion. Les modèles disponibles sur le marché se distinguent principalement par les algorithmes utilisés, p.ex.:

- affectation par incrément
- équilibre déterministe (UE, user equilibrium)
- équilibre stochastique (SUE, stochastic user equilibrium)

ainsi que les aspects suivants:

- modélisation des nœuds, spécialement des temps d'attente en fonction de la charge
- modélisation des effets dynamiques
- modélisation de l'élasticité de la demande

Les algorithmes mentionnés plus haut ont été testés à l'aide d'un réseau urbain fictif pour des situations moyennement, fortement et très fortement chargées. L'évaluation des résultats permet de tirer des conclusions et de faire les recommandations suivantes :

- Les algorithmes d'équilibre UE et SUE sont préférables aux autres. Les algorithmes SUE demandent plus d'effort lors de l'utilisation mais sont basés sur des hypothèses plus plausibles concernant le comportement des usagers. Les algorithmes UE et SUE produisent des résultats similaires pour les réseaux chargés, alors que d'autres sources recommandent les algorithmes UE.
- Le choix des algorithmes influence fortement la fiabilité des résultats lorsque la charge est faible. Quand la charge est importante, d'autres critères jouent leur rôle, à savoir la capacité, les fonctions débit-vitesse, la dynamique et l'élasticité de la demande.
- Dans des réseaux urbains fortement chargés, les temps de parcours sont principalement influencés par les temps d'attente dans les nœuds. Même pour des estimations grossières, il faudrait tenir compte de la modélisation des nœuds en fonction de la charge.
- La simplification apportée par les modèles statiques produit des résultats irréalistes pour des réseaux chargés (temps de parcours trop élevés, charges supérieures à la capacité). Si les exigences de fiabilité sont élevées, p.ex. pour des comparaisons de variantes, il faudra également simuler les effets dynamiques tels que les variations de la demande et le comportement dynamique de la charge en fonction du temps.

- Les résultats sont également peu plausibles lorsque l'affectation concerne une offre et/ou une demande très différente par rapport à la situation d'origine. Dans ces cas, il faut utiliser des méthodes qui tiennent compte de l'élasticité de la demande.

Les aspects de la dynamique et de l'élasticité de la demande prennent de l'importance dans des réseaux chargés. Ces aspects peuvent être au moins partiellement pris en compte par les méthodes heuristiques présentées dans cette étude quand il s'agit d'affecter une matrice sans disposer des modèles de demande, de choix des destinations ou de choix modal. Seuls des modèles dynamiques et intégrés sont capables de remplir des exigences élevées de fiabilité et de cohérence. Comme la problématique des réseaux urbains fortement chargés ne fait qu'augmenter, il serait judicieux d'étudier si ces modèles sont adaptés à la pratique.

SUMMARY

Traffic assignment is the stage of modelling the choice of routes by roadusers and of calculating linkflows and travel times for a fixed traffic demand and a given roadnetwork. Of the many different rules, algorithms and methods, the most commonly used in assignment models are described and evaluated in this paper, based on the results of test applications. The study's focus is on congested roadnetworks in urban areas. It is assumed, that – as is often the case in real life – a given od-matrix of present or future travel demand has to be assigned without availability of demand models (traffic generation, choice of destination or modal split).

Route choice models are based on the assumption, that for a trip from zone i to zone j roadusers choose the route which has minimal costs. A main component of these costs are travel times. Travel times in a road network depend on traffic flows. As traffic flows increase, speeds on links drop and delays at junctions grow. Commercialized assignment models can be characterized by their rules and procedures implemented, e.g.

- incremental loading
- deterministic user equilibrium (UE)
- stochastic user equilibrium (SUE)

and by the more basic aspects such as

- whether or not junction delays are being modelled, and if yes, in what detail
- whether or not dynamic effects are taken into account
- whether or not demand elasticity is taken into account

Using as an example a fictitious network representing an urban situation, the above mentioned methods are used to assign od-matrices for moderate, high and very high travel demand. The analysis of the test results leads to the following conclusions and recommendations:

- Equilibrium assignment is the preferred method for congested networks. SUE is more difficult to apply but is based on more realistic assumptions than UE. However, for congested networks both methods give similar results and the use of UE is recommended in such situations.
- While in situations with low demand the choice of the assignment algorithms might be crucial, for congested aspects such as capacity, speed-flow-relationships, dynamic effects and demand elasticity become much more important.
- In congested urban networks, junction delays become a major component of travel times and have to be taken into account in the assignment stage. This requires detailed modelling of flow dependent delays and queuing.
- With static assignment methods, over capacity flows and unrealistically high delays will result for congested situations. When higher accuracies of assignment results are required, dynamic effects can not be neglected.
- A commonly used method to forecast future demand is to apply growth factors to an OD-matrix. If this "upgraded" od-matrix is assigned to the existing, already congested network, unrealistic results will be obtained (much too high flows and delays), if demand elasticity is not taken into account.

Given the situation, as is assumed in this study, where an externally established od-matrix has to be assigned and a demand model is lacking, the heuristic methods evaluated in this study can be applied to take dynamic effects and demand elasticity - at least partly - into account and to improve the results of traffic assignment in congested networks. However, more accurate and more consistent results can be achieved with dynamic, integrated transportation models only. In the light of growing problems due to congestion in urban areas, this new generation of transportation models should be further developed, focussing on facilitating practical applications.

1 AUFTRAG

1.1 EINLEITUNG

Die Strassennetze sind, vor allem in den Agglomerationen, immer stärker belastet. Häufigere und längere Stausituationen haben einen Einfluss auf das Verkehrsverhalten. Die Verkehrsteilnehmer können z.B.

- weniger belastete Routen wählen,
- den Zeitpunkt der Fahrt in eine Zeitperiode mit weniger Stau verschieben,
- auf andere Verkehrsmittel umsteigen,
- ein anderes Ziel wählen oder
- ganz auf die Fahrt verzichten.

Verkehrsmodelle versuchen, dieses Verhalten der Verkehrsteilnehmer abzubilden. Die vorliegende Studie legt den Fokus auf die Umlegungsmodelle. Das sind jene Teilm Modelle, welche die aus dem Routenwahl-Verhalten resultierenden Verkehrsbelastungen auf den Strassenabschnitten eines Untersuchungsgebietes berechnen.

Die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer wird im Modell als Funktion des Streckenwiderstandes abgebildet. Für den Streckenwiderstand werden in der Regel "generalisierte Kosten", d.h. eine Funktion von Reisezeit, Distanz, allfälliger Mautgebühren und evtl. weiterer Faktoren verwendet. Die zweckmässigste Funktion für den Streckenwiderstand wird im Rahmen der Modellkalibration ermittelt.

Verkehrsumlegungsmodelle verteilen nach bestimmten Regeln die Nachfrage einer Quelle-Ziel-Relation auf die für diese Relation in Frage kommenden Routen. Die Summe der Verkehrsbeziehungen jener Routen, welche einen bestimmten Netzabschnitt (Link) benutzen, ergibt die Verkehrsbelastung auf demselben.

Solange die Belastungen deutlich unter den Kapazitäten der Netzelemente liegen, ändern sich die Reisezeiten mit zunehmendem Verkehr nicht oder nur unwesentlich. Bei stark belasteten oder überlasteten Netzen verursacht zusätzlicher Verkehr aber zunehmend höhere Reisezeiten, d.h. der Netzwidestand nimmt zu. Dieser Zusammenhang zwischen Netzwidestand und Verkehrsbelastung wird mit Widerstands- resp. Capacity-Restraint-Funktionen beschrieben. Der typische Verlauf solcher Funktionen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

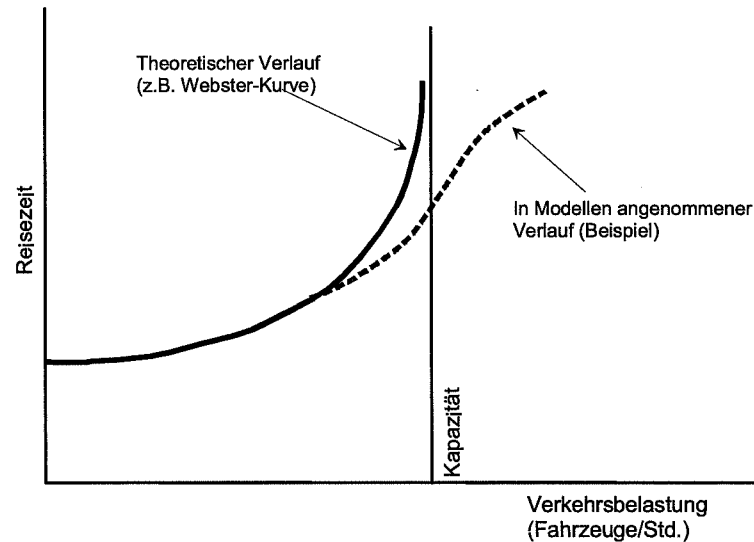


Abbildung 1: Typischer Verlauf von Widerstands-Funktionen

Theoretisch steigt die Reisezeit beim Erreichen der Kapazität gegen unendlich. In der Praxis ist dies nicht der Fall, weil sich der Stau in Zeitabschnitten mit schwächerer Verkehrsnachfrage wieder abbaut. Umlegungsmodelle verwenden meistens Widerstands-funktionen der gestrichelten Form.

Auf langen Überlandstrassen, insbesondere auf Autobahnen, sinkt die mittlere Reisegeschwindigkeit als Folge der Kolonnenbildung bei zunehmender Verkehrsbelastung. Erreicht die Verkehrsbelastung die Kapazität, wird der Verkehrsfluss instabil, d.h. es sinken sowohl die Durchflussmenge als auch die Geschwindigkeit. Dieser Zusammenhang wird im idealisierten, klassischen Geschwindigkeits-Belastungs-Diagramm (Abbildung 2) dargestellt.

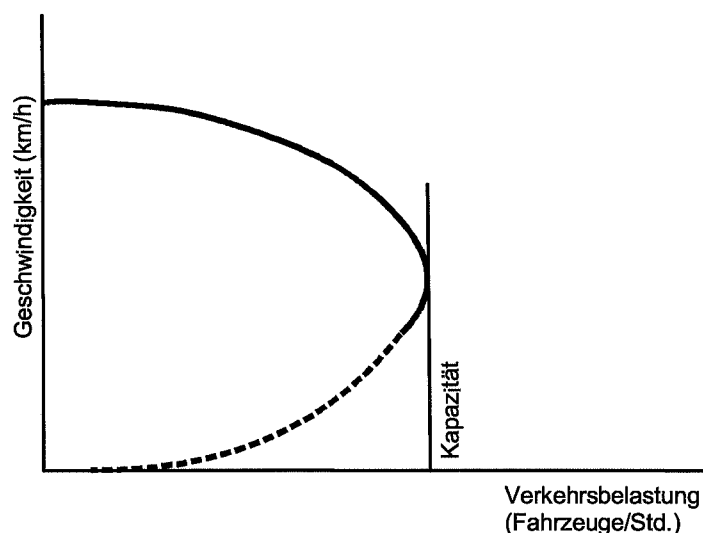


Abbildung 2: Geschwindigkeits-Belastungs-Diagramm

In städtischen Netzen sind es in erster Linie die Wartezeiten an Knoten, welche bei wachsendem Verkehr rasch ansteigende Reisezeiten zur Folge haben. Bei Überbelastungen kann der Rückstau stromaufwärts liegende Knoten blockieren. Im Gegensatz zu den oben erwähnten langen Überlandstrassen sind in städtischen Verhältnissen die

Reisezeiten auf einem Link nicht nur von der Verkehrsbelastung auf diesem, sondern auch von jener auf den angrenzenden Links abhängig.

Für die oben geschilderten Situationen stehen dem Verkehrsplaner verschiedene Umlegungsmethoden zur Verfügung. Jede dieser Methoden hat ihre Vor- und Nachteile in Bezug auf Modellierungsaufwand, Daten- und Zeitbedarf auf der einen und Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Resultate auf der anderen Seite.

1.2 ZIEL DER STUDIE

Mit der vorliegenden Studie soll eine Übersicht und Beschreibung der heute üblicherweise angewendeten Umlegungsmethoden für den motorisierten Personenverkehr auf Strassen erstellt werden. Dabei liegt das Schwergewicht bei Modellansätzen für stark belastete Strassennetze in städtischen Situationen. An einem einfachen Testbeispiel sollen der praktische Einsatz und die Ergebnisse einer Auswahl von Methoden demonstriert und beurteilt werden. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit werden als Empfehlungen und Hinweise für die Anwendung von Umlegungsmodellen zusammengefasst.

Zielpublikum des vorliegenden Berichtes sind neben Verkehrsmodell-Anwendern und Bestellern von Verkehrsmodellberechnungen auch Fachleute, welche die Ergebnisse von Verkehrsmodellberechnungen für die Beurteilung von Verkehrsmassnahmen, (z.B. Lärm- und Luftschadstoffemissionen, Kosten-Nutzen-Analysen usw.) weiterverwenden. Ihnen soll der Bericht eine grobe Einschätzung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse ermöglichen, welche die verschiedenen Umlegungsmethoden bei stark belasteten Strassennetzen zu liefern vermögen.

1.3 DANK AN DIE BEGLEITKOMMISSION

Die Verfasser danken den Mitgliedern der Begleitkommission für Ihr Engagement und die vielen wertvollen Hinweise und Kommentare.

2 ÜBERSICHT ÜBER DIE MODELLANSÄTZE

2.1 EINLEITUNG

Die Verkehrsumlegung ist der Prozess der Allokation der in einer Quelle-Ziel-Matrix enthaltenen Verkehrsbeziehungen (Fahrten, Personen, Güter usw. für eine bestimmte Zeiteinheit, z.B. eine Spitzenverkehrsstunde) zu ihren Routen in einem Verkehrsnetz (Willumsen L.G., 2000).

Grundsätzlich erfordert ein Umlegungsmodell die folgenden Input-Daten:

- Quelle-Ziel-Matrizen der Verkehrsnachfrage (Quelle, Ziel und Zahl der Fahrtwünsche) für die zu untersuchenden Verkehrssituationen (Zeitperioden)
- Beschreibung des Verkehrsangebotes in der Form eines Netzmodells (resp. von Netzmodellen für verschiedene Verkehrssysteme wie MIV, ÖV, Fussgänger, Radfahrer usw.), welches z.B. aus Verkehrszonen-Anschlüssen, Knoten (Haltestellen) mit zulässigen Abbiegebeziehungen und Strecken (Linien beim ÖV) mit Widerstandsfunktionen (siehe unten) besteht.
- Regeln und Prinzipien, welche das Routenwahlverhalten abbilden.

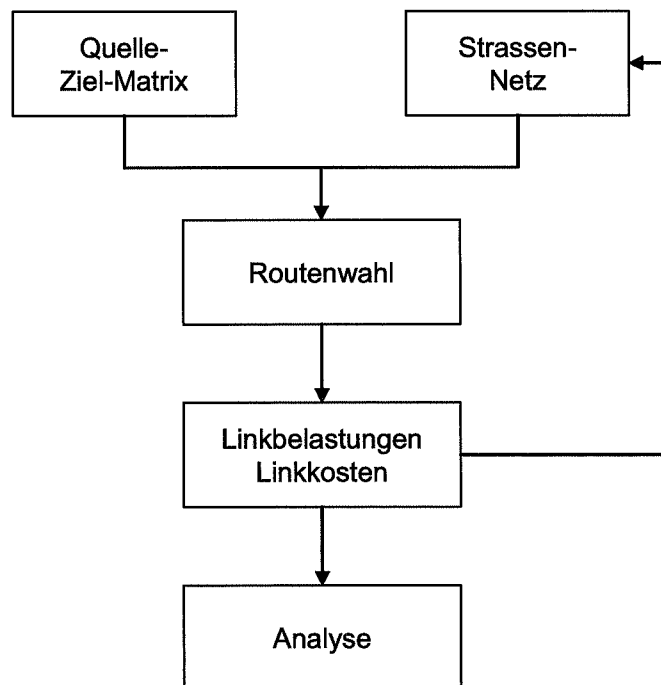


Abbildung 3: Prozess der Verkehrsumlegung

Die im Umlegungsverfahren verwendeten Regeln und Prinzipien sollen das Routenwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer möglichst realitätsgetreu nachbilden. Unterscheiden sich die Verhaltensmuster der Verkehrsteilnehmer stark, z.B. in Bezug auf die Gewichtung von Reisezeit, monetären Kosten, Sicherheit usw., oder sind Teile des Verkehrsnetzes nicht für alle Verkehrsarten offen, ist eine Aufteilung der Wunschlinienmatrizen nach Benutzergruppen (z.B. PKW, LKW, Busse), in gewissen Fällen nach

Wege Zwecken, erforderlich und es sind nutzerspezifische Umlegungsregeln anzuwenden.

Erwartete Ergebnisse der Verkehrsumlegung sind:

- Belastungen auf den Netzabschnitten
- Reisezeiten zwischen den Zonenpaaren i und j für gegebene Nachfragesituationen
- Informationen zu den benutzten Routen zwischen den Zonenpaaren i und j
- Analyse der Quelle-Ziel-Relationen, welche einen oder mehrere bestimmte Netzabschnitte benutzen
- Abbiegeströme an interessierenden Knoten.

2.1.1 Routenwahl

Deterministische Routenwahl-Modelle gehen, ähnlich wie andere Verkehrsmodellteile auch, von der Annahme aus, der Verkehrsteilnehmer sei vollständig informiert, verhalte sich rational und wähle die objektiv beste Route, d.h. jene mit den geringsten Kosten. In vielen Modellen wird für die Kosten eine gewichtete Kombination von Reisezeit und Distanz als sog. generalisierte Kosten verwendet¹. Die Gewichtungsfaktoren werden aus Erhebungen übernommen oder in der Modellkalibration ermittelt.

Bekanntlich wählen aber nicht alle Verkehrsteilnehmer die gleiche Route, um von A nach B zu gelangen, und selbst unter gleichen Bedingungen benutzen nicht alle Verkehrsteilnehmer immer die gleiche Route zwischen zwei Orten. Ursachen können sein:

- Unterschiede in der individuellen Beurteilung, was die "beste" Route ausmacht
- Unterschiedliche Wahrnehmung oder unterschiedliche Kenntnis (keine vollständige Information) der tatsächlichen Attribute (z.B. Reisezeit) einer Route
- usw.

Mit stochastischen Modellansätzen wird versucht, diese nicht einfach zu erklärenden Variationen der Routenwahl "einzufangen".

¹ Gegebenenfalls sind auch Mautgebühren zu berücksichtigen.

2.1.2 Verkehrsnetzmodellierung

Im Umlegungsmodell muss das konkret vorhandene resp. geplante Netz vereinfacht und schematisiert werden. Dazu wird die Netztopologie mit Strecken und Knoten dargestellt.

a) Strecken

Bei der Mehrzahl der Modelle ist jede Strecke durch einen Anfangs- und Endknoten¹ und mindestens durch die Merkmale Länge, freie Geschwindigkeit, Kapazität und Streckentyp gekennzeichnet. Den Streckentypen sind Widerstandsfunktionen (siehe unten) zugeordnet. Je vollständiger das Netz in das Modell übernommen wird, desto zuverlässigere Resultate können erwartet werden, desto aufwändiger sind aber die Modell-etablierung und die Modellanwendung. Die Festlegung der zulässigen Abstrahierung soll in Abhängigkeit der Verkehrszonen-Einteilung und der zu behandelnden Fragestellung erfolgen und ist mehr eine Kunst (Erfahrung) als eine Wissenschaft. In jedem Fall sollen im Netzmodell alle in Wirklichkeit zulässigen Fahrtmöglichkeiten berücksichtigt und alle unzulässigen Fahrtmöglichkeiten ausgeschlossen werden (Schnabel und Lohse, 1997, Seite 269). Ein typisches Beispiel für die Art, wie die Strecken für die Eingabe in ein Verkehrsmodell kodiert werden, zeigt die folgende Abbildung.

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
102	103	20	3 1 3S	5000	800	2	① A-Node
106	107	20	3 1 3S	5000	800	2	② B-Node
102	106	20	3 1 3S	5000	800	2	③ Länge (km/100)
103	107	20	2 1 2S	7000	1000	2	④ Spezial-Codes
107	108	100	3 1 3S	5000	800	2	⑤ Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss (km/h*100)
107	112	30	2 1 2S	7000	1000	2	⑥ Kapazität
112	114	20	2 1 2S	7000	1000	2	⑦ Spezial-Codes
104	108	20	2 1 2S	7000	1000	2	
108	116	30	2 1 2S	7000	1000	2	
116	118	20	2 1 2S	7000	1000	2	
117	119	20	1 1 1S	11000	2400	2	
115	117	20	1 1 1S	11000	2400	2	
113	115	80	1 1 1S	11000	2400	2	
110	111	20	1 1 1S	11000	2400	2	
111	113	20	1 1 1S	11000	2400	2	
112	111	14	2 1 2S	7000	1000	1	
111	114	14	2 1 2S	7000	1000	1	
113	112	14	2 1 2S	7000	1000	1	
114	113	14	2 1 2S	7000	1000	1	

Abbildung 4: Beispiel für die Kodierung von Strecken

b) Knoten

Im Minimum werden die Knoten als Verbindungspunkte von Strecken codiert, an denen alle Abbiegebeziehungen möglich und mit keinen Widerständen behaftet sind. Mit der Auflösung der Knoten, z.B. gemäss untenstehender Abbildung, können Abbiegebeziehungen, welche in Wirklichkeit nicht zugelassen sind, auch im Modell unterbunden werden, und es lassen sich konstante oder belastungsabhängige "Knotenzuschläge" bei den generalisierten Kosten berücksichtigen.

¹ Ein Strassenabschnitt besteht also in der Regel aus zwei Strecken, einer pro Richtung.

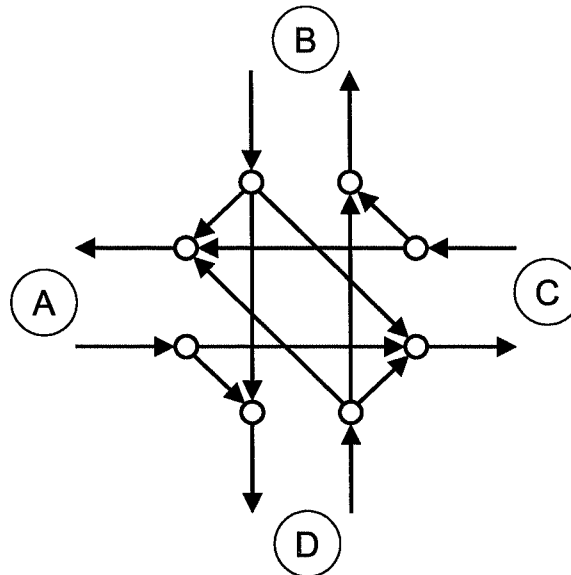


Abbildung 5: Auflösung eines Strassenknotens; Linksabbiegen A – B und C – D sowie U-Turns nicht zugelassen.

Diese in frühen Modellen angewendete Methode vernachlässigt, dass die Verlustzeiten eines Knotenstromes nicht nur von dessen, sondern auch von den Stärken anderer Verkehrsströme an diesem Knoten abhängig sind. Die Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten erfordert eine Berechnung der Kapazitäten und Wartezeiten an den Knoten ausserhalb des eigentlichen Umlegungsalgorithmus, z.B. nach den Methoden des HCM 2000¹ (TRB, 2000), des HBS (FGSV, 2001) oder mittels Simulation. Die dazu benötigten Informationen werden bei der Netzmodellierung mitcodiert. Dazu gehören:

- Vorfahrtsregelung (z.B. vortrittsberechtigete und vortrittsbelastete Ströme, Lichtsignalregelung usw.)
- Zulässige resp. nicht zulässige Verkehrsbeziehungen am Knoten
- Anzahl Spuren und Spurzuteilung auf den Zufahrten
- Sättigungsfluss pro Spur
- Geometrie bei Verkehrskreiseln
- Phasensystem, Umlaufzeit und Grünzeiten bei Lichtsignalsteuerungen sowie allenfalls die Daten der Lichtsignalkoordination

Ein typisches Beispiel für eine solche Kodierung zeigt die folgende Abbildung:

¹ Wird z.B. im Modellpaket UFOSNET (www.ufosnet.net) angewendet

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
13	1500	1	1.0	2	2	0	0.10	0	1.00
	1500	1		3	2	0	0.10	0	1.00
	1200	2		1	2	0	0.10	0	1.00
	1200	2		3	2	0	0.10	0	1.00
	1500	3		1	2	0	0.10	0	1.00
	1500	3		2	2	0	0.10	0	1.00
24	1500	1	1.0	2	2	0	0.10	0	1.00
	1500	1		3	2	0	0.10	0	1.00
	1500	1		4	2	0	0.10	0	1.00
	1200	2		3	2	0	0.10	0	1.00
	1200	2		4	2	0	0.10	0	1.00
	1200	2		1	2	0	0.10	0	1.00
	1500	3		4	2	0	0.10	0	1.00
	1500	3		1	2	0	0.10	0	1.00
	1500	3		2	2	0	0.10	0	1.00
	1200	4		1	2	0	0.10	0	1.00
	1200	4		2	2	0	0.10	0	1.00
	1200	4		3	2	0	0.10	0	1.00

- ① Knoten-Typ
- ② Anzahl Knoten-Arme
- ③ Sättigungsfluss der Abbiegebeziehung
- ④ Zufahrts-Ast
- ⑤ Verfügbare Spuren für Abbiegebeziehung
- ⑥ Ausfahrts-Ast
- ⑦ Art der Verkehrsregelung
- ⑧ Spezial-Codes

Abbildung 6: Beispiel für die Kodierung von Knoten

c) Widerstandsfunktionen

Zur Beschreibung der Abhängigkeit der Reisezeit von der Verkehrsbelastung (vgl. Abbildung 1) auf Strecken¹ gelangen sog. Widerstandsfunktionen zum Einsatz. In der Literatur werden für diese verschiedene Formen vorgeschlagen. Ortúzar und Willumsen (2001) listen die folgenden erwünschten Eigenschaften von Widerstandsfunktionen auf:

- Realitätsnähe; die berechneten Reisezeiten sollen möglichst gut mit den tatsächlichen übereinstimmen
- Monoton steigend; bei zunehmenden Verkehrsbelastungen sollen nicht abnehmende Reisezeiten resultieren
- Stetig und ableitbar
- bei Belastungen über der Kapazität sollen nicht unendlich grosse Reisezeiten resultieren (in der Realität können kurzfristige Überbelastungen auftreten, ohne dass die Wartezeiten auch nur annähernd gegen Unendlich streben)
- Einfache Transferierbarkeit von einem Kontext zu einem andern.

Beispiele von Widerstandsfunktionen, wie sie in Verkehrsmodellen Anwendung finden, sind im Anhang 1 zusammengestellt.

¹ In Modellen, welche die belastungsabhängigen Wartezeiten an Knoten berechnen, kann in städtischen Gebieten mit enger Knotenfolge auf die Berücksichtigung von Widerstandsfunktionen für die Strecken verzichtet werden, weil die belastungsabhängigen Verlustzeiten auf den Strecken im Vergleich zu jenen an den Knoten meistens von untergeordneter Bedeutung sind.

d) Zonenanschlüsse

Zonenanschlüsse dienen dazu, die in den Zonen beginnenden und endenden Fahrten mit dem modellierten Netz zu verbinden. Gerade in stark belasteten städtischen Netzen hängt das Ergebnis der Umlegungsrechnungen stark von der Modellierung der Zonenanschlüsse ab; entsprechend sorgfältig ist diese vorzunehmen. In einfachen Fällen (wie sie in den hier interessierenden Situationen kaum auftreten dürften) wird pro Zone ein einziger Punkt als Quelle und Ziel aller Fahrten angenommen, welcher mit Zonenanschluss-Strecken an einem oder an mehreren Knoten mit dem Netz verbunden ist. In gewissen Modellansätzen wird die prozentuale Verteilung des Zonenverkehrs auf die einzelnen Zonenanschluss-Strecken vorgegeben, bei anderen Modellen wird die Verteilung des Verkehrs auf einzelne Zonenanschlüsse als Teil der Umlegung modelliert (Multi-Point-Assignment). Eine weitere Verfeinerung resp. Annäherung an die Wirklichkeit (Strassenrandparkierung) ist die Modellierung des Netzein- resp. -austrittes des Zonenverkehrs entlang einem Link zwischen dessen Anfangs- und Endknoten.

2.1.3 Routensuche

Für die Fahrt von einer Quelle i zu einem Ziel j stehen meist mehrere Routen zur Verfügung. Je nach Art des Umlegungsmodells müssen für einen bestimmten Belastungszustand (konstante Streckenwiderstände) entweder die optimale Route, d.h. jene mit den kleinsten generalisierten Kosten (Best-Weg-Verfahren) oder alle "sinnvollen" Routen (Alternativrouten-Verfahren) gesucht werden.

Bei den Best-Weg-Verfahren kommen verschiedene Algorithmen zur Anwendung. Ein bekanntes Beispiel ist der Moore'sche Algorithmus (siehe z.B. Schnabel und Lohse, 1997, S. 285ff). Bei den Alternativrouten-Verfahren wird zwischen deterministischen und stochastischen Verfahren unterschieden. Die deterministischen Verfahren wenden Prüfverfahren an, welche gewährleisten, dass nur "sinnvolle" Routen benutzt werden. "Sinnvoll" ist eine Route z.B. dann, wenn sie nicht um mehr als einen festzulegenden Faktor länger ist als die optimale Route. Die stochastischen Verfahren gehen davon aus, dass die Streckenwiderstände den Verkehrsteilnehmern nicht genau bekannt sind. Der Streckenwiderstand wird als Erwartungswert einer Verteilung, meistens einer Rechtecks- oder Normalverteilung, angenommen. Die Routensuche wird mit einem Best-Weg-Verfahren mehrfach mit zufälligen Schätzwerten der Streckenwiderstände wiederholt. Damit ergibt sich je nach der Struktur des Netzes eine Anzahl alternativer Routen. In der Regel handelt es sich bei diesen um "sinnvolle" Routen und auf komplizierte Tests wie bei den deterministischen Verfahren kann verzichtet werden. Der Dial- und der Burrell-Algorithmus sind bekannte Beispiele von solchen stochastischen Verfahren. Beide eignen sich aber weniger für Situationen mit stark belasteten Netzen, weil sie grundsätzlich von konstanten mittleren Streckenwiderständen ausgehen.

2.2 STATISCHE UMLEGUNG MIT FIXER NACHFRAGE-MATRIX

2.2.1 Einleitung

User Equilibrium (UE)

Für stark belastete Netze mit von den Verkehrsbelastungen abhängigen Reisezeiten können nur iterative Umlegungsverfahren eingesetzt werden. In der Praxis haben sich Gleichgewichtsmodelle durchgesetzt, welche auf dem sog. Wardrop-Prinzip (Wardrop, 1952) gründen. Dieses besagt: *In einem stark belasteten Netz verteilt sich der Verkehr so, dass sich auf allen benutzten Routen, die für eine Verkehrsbeziehung zwischen einem Zonenpaar i und j gewählt werden können, der gleiche Aufwand (generalisierte Kosten) einstellt und alle nicht gewählten Routen mit einem gleichen oder grösseren Aufwand verbunden sind.* Dieser deterministische Ansatz wird als Wardrop-Gleichgewicht, in der englischsprachigen Literatur als User Equilibrium (UE) bezeichnet. Der deterministische Ansatz ist sicher eine stark vereinfachende Darstellung der Wirklichkeit. Es hat sich aber in der Praxis gezeigt, dass die Anwendung des Wardrop-Prinzips zu Modellen führt, welche wenig aufwändig sind und auch bei sehr stark belasteten Netzen stabile Ergebnisse liefern.

Stochastisches User Equilibrium (SUE)

Wie bereits oben erwähnt, bestehen zwischen den Verkehrsteilnehmern Unterschiede in der Wahrnehmung der "Kosten" einer Route, welche sich nicht ohne weiteres erklären lassen. Die "Kosten" werden deshalb als Zufallsvariable betrachtet. In Anlehnung an das Wardrop-Prinzip wird das Stochastische User Equilibrium (SUE) wie folgt beschrieben: *In einem stark belasteten Netz verteilt sich der Verkehr so, dass die von einem Verkehrsteilnehmer gewählte Route jene mit den als minimal empfundenen¹ "Kosten" ist. Routen mit empfundenen "Kosten" über den minimalen werden nicht gewählt.*

2.2.2 Best-Weg-Umlegung

Die Best-Weg-Umlegung gelangt bei verschiedenen iterativen Verfahren in den Teilschritten zum Einsatz. Eine Best-Weg-Umlegung in einem einzigen Schritt, also nicht als Bestandteil eines Iterationsverfahrens, kann die belastungsabhängige Veränderung der Netzwidestände nicht berücksichtigen und ist daher für stark belastete Netze nicht geeignet.

2.2.3 Inkrementweise Umlegung

Bei der inkrementweisen Umlegung (auch Sukzessivverfahren genannt) wird die Quelle-Ziel-Matrix in einzelnen "Portionen" auf das Netz umgelegt. Typischerweise nimmt man als erstes Inkrement 10 – 20% der Matrix und legt diesen Verkehr auf das leere Netz nach einem Best-Weg-Algorithmus um, d.h. unter Annahme der Reisezeiten bei freier Fahrt (free-flow-speeds). Die berechneten Linkbelastungen ergeben neue Linkkosten, welche der Umlegung des nächsten Inkrementes zu Grunde gelegt werden. Dieser Prozess wird fortgeführt, bis die ganze Matrix umgelegt ist. Insgesamt werden

¹ Hier wird also im Gegensatz zum deterministischen Ansatz von subjektiv empfundenen Kosten und nicht von den effektiven Kosten ausgegangen.

vielleicht 10 Inkremente gebildet, welche laufend kleiner werden. Das Verfahren ist relativ einfach in der Anwendung, hat aber verschiedene Nachteile:

- Die Anzahl und die Grösse der Inkremente entscheiden über die Qualität der Modellergebnisse. Es gibt kein Verfahren zur optimalen Festlegung der Inkremente.
- Die durch die sukzessive Verfahrensweise erreichte Verkehrsstromaufteilung auf mehrere Routen erfolgt nicht aufgrund einer klaren Verkehrsstromaufteilungsregel sondern ist abhängig von der Wahl der Inkremente und damit in gewissem Sinne zufällig.
- Dieses Verfahren wird in der Regel nicht zu einem Gleichgewicht führen, wie es oben definiert worden ist.

2.2.4 Inkrementweise Umlegung mit Reload

Um mit der inkrementweisen Umlegung ein Gleichgewicht (UE) zu erreichen, werden z.B. in POLYDROM schrittweise zuerst umgelegte Inkremente vom Netz entfernt und unter Anwendung der Linkkosten bei der momentanen Netzbelastung neu umgelegt. Dieser Prozess wird fortgeführt, bis sich die Linkkosten nur noch innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite verändern.

2.2.5 Sukzessives Best-Weg-Verfahren mit Rückrechnung

Bei diesem von Schnabel/Lohse (1997) beschriebenen Verfahren wird die Quelle-Ziel-Matrix in jedem Schritt vollständig mit einem Best-Weg-Algorithmus umgelegt. Nach jedem Umlegungsschritt wird die Summenverkehrsstärke aller bisherigen Umlegungsschritte auf eine mittlere Verkehrsstärke für alle Strecken mit dem Niveau einer 100%igen Umlegung der Matrix zurückgerechnet. Diese mittlere Verkehrsstärke ist massgebend für die Berechnung der Streckenwiderstände, welche der nächsten Umlegung der vollständigen Matrix zugrunde gelegt werden. Die Berechnungen werden fortgeführt, bis eine geeignete Prüfbedingung, welche die Streckenwiderstände aufeinander folgender Schritte vergleicht, erfüllt ist oder – weil eine Konvergenz wohl nicht gewährleistet ist – eine vorgegebene Anzahl Bearbeitungsschritte durchgeführt ist. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass durch die Rückrechnung auf die über die bisherigen Umlegungen gemittelte Verkehrsstärke gleich von Anfang an die Kapazitätsgrenzen im Netz wirksam werden und dadurch mit relativ wenig Schritten viele alternative Routen gefunden werden können. Die Verkehrsstromaufteilung auf die Routen hängt von der Häufigkeit ihrer Auswahl durch den Umlegungsalgorithmus ab und nicht von der gewählten Inkrement-Grösse wie bei der einfachen inkrementweisen Umlegung. Ein Nachteil des Verfahrens ist die fehlende Gewähr der Konvergenz des Prozesses. Es wird unseres Wissens in keinem der bekannten kommerziellen Verkehrsmodell-Softwarepakete angeboten.

2.2.6 Deterministische Gleichgewichtsverfahren (UE)

Beckmann et al. (1956) haben gezeigt, dass mit der Lösung des unten dargestellten nicht-linearen mathematischen Programms jene Linkbelastungen gefunden werden können, welche das Wardrop-Prinzip eines Benutzer-Gleichgewichtes erfüllen. Die Herleitung und Beschreibung des darauf basierenden UE-Ansatzes findet sich in Sheffi (1985).

$$\min Z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw$$

Nebenbedingungen:

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r \in R, s \in S$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k \in K_{rs}, r \in R, s \in S$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \in A, k \in K_{rs}, r \in R, s \in S$$

wobei:

Z	= Zielfunktion
x_a	= Belastung des Links a
t_a	= Kosten-Funktion für Link a (separierbar, konvex und monoton steigend)
f_k^{rs}	= Verkehrsstrom auf Route k zwischen r und s
q_{rs}	= gesamter Verkehrsstrom zwischen r und s
K_{rs}	= Alle Routen zwischen r und s
$\delta_{a,k}^{rs}$	= Routen-Link-Inzidenz-Matrix

Die Minimierung der Zielfunktion unter Beachtung der Nebenbedingungen erfolgt in der Regel mit dem Frank-Wolfe-Algorithmus. Dieses Standard-Verfahren gelangt in verschiedenen Modellsoftwares zum Einsatz. Die folgenden Iterationsschritte werden durchgeführt:

1. Best-Weg-Umlegung der Quelle-Ziel-Matrix mit einem Ausgangs-Satz von Link-Kosten. Ergebnis: Satz von Link-Belastungen $x_a^{(n)}$, mit $n = 1$.
2. Berechnung der neuen Link-Kosten aufgrund der Belastungen $x_a^{(n)}$, $t_a^{(n)} = t_a(x_a^{(n)})$
3. Best-Weg-Umlegung der Quelle-Ziel-Matrix mit dem Satz von Link-Kosten $t_a^{(n)}$. Ergebnis: Satz von Link-Belastungen $F_a^{(n)}$
4. Berechnung eines "verbesserten" Satzes von Link-Belastungen $x_a^{(n+1)}$ als lineare Kombination der ursprünglichen und der neuen Link-Belastungen:

$$x_a^{(n+1)} = (1 - \lambda)x_a^{(n)} + \lambda F_a^{(n)}$$
wobei λ so gewählt wird, dass die Zielfunktion $z(x)$ minimiert wird.
5. Konvergenzkriterium prüfen. Wenn nicht erfüllt: Zurück zu Schritt 2

Die Modellierung der Verkehrsverhältnisse an Knoten bedeutet, dass die "Link-Kosten" (einer Abbiegebeziehung) auch von den Verkehrsflüssen auf den anderen, am Knoten verbundenen, Links abhängig sind. Wegen dieser Abhängigkeit der Link-Kosten von den Belastungen auf anderen Links kann das Benutzer-Gleichgewicht nicht mehr mit der oben beschriebenen Methode gelöst werden. Dieses Problem kann umgangen werden, indem aufgrund der mit Simulationen berechneten Wartezeiten an den Knoten für jede Abbiegebeziehung eine "Widerstandsfunktion" geschätzt wird, welche die Abhängigkeit zwischen der Wartezeit für diese Abbiegebeziehung und deren Verkehrsstrom angibt.

Mit den in der Praxis üblicherweise verwendeten Widerstands-Funktionen (siehe Anhang), welche auch sehr grossen Belastungen endliche Kosten zuordnen, können Umlegungen mit Gleichgewichts-Ansätzen Linkbelastungen ergeben, welche deutlich über der Linkkapazität liegen. In Wirklichkeit treten solche Überbelastungen nicht auf, weil sich bei Überschreitungen der Kapazität Staus bilden. Die Abbildung des Prozesses der Staubildung erfordert dynamische Modellansätze. Auf diese werden wir im Kapitel 2.3 zurückkommen. Als "statische" Lösung kann im oben formulierten mathematischen Programm die Kapazitätsgrenze C_a auf jedem Link a als weitere Nebenbedingung für die Linkbelastung x_a wie folgt festgelegt werden:

$$x_a \leq C_a \quad \forall a \in A$$

In der Literatur (siehe z.B. Lin Cheng et al. (2003) und Yu Nie et al. (2004)) werden verschiedene mathematische Ansätze beschrieben, mit denen dieses kapazitätsbegrenzte Umlegungsproblem gelöst werden kann. Diese Methoden sind relativ aufwändig und unseres Wissens noch in keiner der bekannten kommerziellen Modellsoftwares verfügbar, weshalb wir im Folgenden nicht weiter auf sie eingehen.

2.2.7 Methode der aufeinander folgenden Durchschnittswerte (MSA)

Wenn für die Abbiegebeziehungen an den Knoten keine Widerstandsfunktionen geschätzt werden können, muss für die Suche des Benutzer-Gleichgewichts ein Näherungsverfahren eingesetzt werden. Eine Möglichkeit, welche in verschiedenen Modellsoftware-Paketen zur Verfügung steht, ist ein Mittelungsverfahren, bei welchem iterativ die Linkbelastungen aus dem vorangegangenen Iterationsschritt mit den aktuell berechneten Belastungen nach der folgenden Formel gemittelt werden:

$$x_a^{neu} = (1 - \lambda)x_a^{alt} + \lambda F_a^{neu}$$

Diese Formel sieht sehr ähnlich aus wie die im Schritt 4 des Frank-Wolfe-Algorithmus verwendete. Der Hauptunterschied besteht darin, dass beim Volume-Averaging für den Faktor λ nicht ein optimaler Wert berechnet, sondern vom Modellanwender vorgegeben wird. Beispielsweise kann $\lambda = 1/n$ gesetzt werden¹. Dann werden im 1. Iterationsschritt die Belastungen zu 100% übernommen, im 2. Iterationsschritt werden 50% der

¹ n = Iterationsschritt

Belastungen aus dem 1. und 50% aus dem 2. Iterationsschritt addiert. Im 10. Iterationsschritt sind es dann 90% der alten und 10% der neuen Linkbelastungen, welche addiert werden, usw. In der Literatur wird diese Methode auch als MSA (Method of Successive Averages) bezeichnet.

2.2.8 Stochastische Gleichgewichtsverfahren (SUE)

Da die Zahl der möglichen Routen zwischen zwei Verkehrszonen endlich ist, lässt sich die Routenwahl auf der Basis der Nutzenoptimierungstheorie als diskretes Entscheidungsmodell abbilden. Dazu wird die Nutzenfunktion in eine deterministische und eine stochastische Komponente unterteilt. Die deterministische Nutzenkomponente wird als Funktion von Reisezeit und -kosten und evtl. weiteren Variablen dargestellt. Bei entsprechender Annahme der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die stochastische Nutzenkomponente ergibt sich ein Logit- oder Probitansatz. Die verfügbaren Routen zwischen zwei Verkehrszonen sind oft nicht unabhängig voneinander, sondern weisen mehr oder weniger lange gemeinsame Abschnitte (Überlappungen) auf. Mit diesen Ähnlichkeiten zwischen Alternativen ist eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit von normalen multinomialen Logit-Modellen (MNL) verletzt. Es gelangen daher Nested-Logit-, Cross-Nested-Logit-, C-Logit- oder, wie von Vrtic (2003) vorgeschlagen, Nested-C-Logit Modelle zum Einsatz, welche dank einer Hierarchisierung der Entscheidungsstruktur die Ähnlichkeit zwischen Alternativen berücksichtigen können.

Die Abhängigkeit der Linkkosten von den Belastungen erfordert für die Parameterschätzung des Routenwahl-Modelles ein iteratives Verfahren, welches das Erreichen eines Nutzergleichgewichtes gewährleistet. Dieses Verfahren ist aufwändig. Einfachere SUE-Ansätze verzichten daher auf die Schätzung von Modellparametern und gehen von einer gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung der von den Verkehrsteilnehmern wahrgenommenen Kosten aus.

Auch für die stochastische Gleichgewichtsumlegung wird oft die Methode der "aufeinander folgenden Durchschnittswerte" (MSA) verwendet. Sheffi und Powell (1981) haben gezeigt, dass mit dieser Methode Konvergenz gewährleistet ist und stabile Ergebnisse erzielt werden. Das Verfahren verläuft iterativ in folgenden Schritten:

1. Nehme eine geeignete Form der Wahrscheinlichkeitsverteilung an, z.B. Rechtecks- oder Normalverteilung mit dem Mittelwert gleich den berechneten Kosten.
2. Setze alle Link-Kosten auf den Wert bei leerem Netz (free flow values) und den Zähler n auf 0.
3. (a) Wähle zufällig Link-Kosten gem. angenommener Wahrscheinlichkeitsverteilung und (b) führe mit diesen Link-Kosten eine Best-Weg-Umlegung durch, welche den Satz von Link-Belastungen $F_a^{(n)}$ ergibt.
4. Middle die Link-Belastungen $F_a^{(n)}$ aus Schritt 3 und die früher berechneten Link-Belastungen $x_a^{(n)}$ wie folgt: $x_a^{(n+1)} = (1 - 1/n)x_a^{(n)} + F_a^{(n)} / n$, wobei für die 1. Iteration $x_a^{(1)} = F_a^{(0)}$ gesetzt wird.
5. Berechne die Link-Kosten neu für die Link-Belastungen $x_a^{(n+1)}$
6. Ist die festgesetzte Anzahl Iterationen erreicht? Wenn nein: setze $n = n+1$ und gehe zurück zu Schritt 3.

Dieser SUE-Algorithmus konvergiert wesentlich langsamer als das oben beschriebene deterministische Verfahren mit dem Frank-Wolfe-Algorithmus und erfordert entsprechend mehr Iterationsschritte.

2.3 DYNAMISCHE UMLEGUNG MIT FIXER NACHFRAGE-MATRIX

Die einfachen statischen Verfahren modellieren die zeitliche Bewegung des Verkehrs durch das Netz nicht und gehen von der vereinfachenden Annahme aus, eine umgelegte Fahrt wirke auf allen Strecken der Route gleichzeitig¹ und über den ganzen Bezugszeitraum (Vortisch, 2003). Diese Verfahren stossen spätestens dann an Grenzen, wenn längere Fahrtzeiten als das betrachtete Zeitintervall auftreten, wenn also nicht alle Fahrten im Untersuchungsgebiet innerhalb des Modell-Zeitraumes abgeschlossen werden können. Solche Situationen treten vermehrt bei zunehmender Auslastung des Strassennetzes auf. Es bildet sich an den Knoten Rückstau, welcher den bei den stromabwärts liegenden Knoten ankommenden Verkehr beeinflusst. Wenn der Rückstau bis in die stromaufwärts liegenden Knoten reicht, kann deren Leistungsfähigkeit massiv reduziert werden. Um diese Phänomene bei der Umlegung berücksichtigen zu können, müssen die Veränderungen des Verkehrsflusses durch das Netz (Bildung und Auflösung von Rückstau, Kolonnendispersion zwischen den Knoten) und die zeitliche Variabilität des Verkehrsaufkommens berücksichtigt werden. Dazu gelangen dynamische Umlegungsverfahren zum Einsatz, welche die Bewegung des Verkehrs entlang einer Route und die zeitliche Variabilität der Verkehrsnachfrage explizit abbilden. In der Literatur sind sehr viele – ältere und aktuellere – Beiträge zu dynamischen Modellen zu finden. Erwähnt seien z.B. Leutzbach et al. (1986), Romph (1994) und Bliemer (2001). Solche Modelle haben den Eingang in die Praxis aber noch kaum gefunden. Ein Experiment mit einem für Online-Anwendungen entwickelten dynamischen Umlegungsver-

¹ Dies würde bedeuten, dass ein einzelnes Fahrzeug gleichzeitig an mehreren Orten zur Staubildung beiträgt, was natürlich nicht realistisch ist.

fahren, welches auf einer Erweiterung des statischen Lernverfahrens von Lohse (Schnabel W., Lohse D., 1997) beruht, beschreiben Vritc und Axhausen (2003).

Einfache resp. "quasi" dynamische Umlegungsansätze, bei denen der Verlauf des Verkehrsaufkommens während der zu modellierenden Zeitperiode (z.B. der Abendspitzenstunde) in Zeitscheiben von z.B. 5 – 30 Minuten Dauer als Nachfrage-Profile dargestellt wird, sind auch in kommerziellen Verkehrsmodellpaketen verfügbar. Die Auswirkungen der Berücksichtigung dynamischer Effekte werden wir an einem Testbeispiel mit Hilfe der Modellsoftware SATURN darstellen.

2.4 ELASTISCHE UMLEGUNG

2.4.1 Einleitung

Im vorangegangenen Kapitel sind wir von der Annahme ausgegangen, die in der Quelle-Ziel-Matrix dargestellte Verkehrsnachfrage sei unabhängig von den Linkkosten, welche aus der Umlegung resultieren. In Wirklichkeit sind natürlich nicht nur die Link-Kosten von der Verkehrsnachfrage, sondern diese ihrerseits von den Link-Kosten abhängig. Es gilt für die Nachfragefunktion

$$T = d(c)$$

und für die Angebotsfunktion

$$c = s(T)$$

Mit T wird die Quelle-Ziel-Matrix und mit c die Kosten-Matrix bezeichnet. In einem Verkehrsmodell müssen das Nachfrage- und das Angebotsmodell (Umlegung) sowohl in sich als auch untereinander konsistent sein. D.h. für das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage muss gelten:

$$T^* = d(c^*)$$

und $c^* = s(T^*)$

Mit anderen Worten: Bei einem gegebenen Satz von Reisekosten c^* ergibt das Nachfragemodell die Quelle-Ziel-Matrix T^* und, wenn die Quelle-Ziel-Matrix T^* auf das Strassennetz umgelegt wird, resultieren die Reisekosten c^* .

Grundsätzlich können sich ändernde Reisekosten nicht nur auf die Routenwahl, sondern auf die gesamte Verkehrsnachfrage, d.h. die Verkehrserzeugung inkl. deren Verteilung über den Tag, die Ziel- und die Verkehrsmittelwahl auswirken. Wir beschränken uns hier auf Methoden zur Anpassung der Verkehrsnachfrage im Rahmen von Umlegungsmodellen¹. Dazu nehmen wir an, dass die Link-Kosten c_{ij} auf der Route von i nach j nur die Zahl der Fahrzeug-Fahrten T_{ij} zwischen i und j beeinflussen, d.h. es gelte:

$$T_{ij} = f(c_{ij})$$

Diese Nachfragefunktion entspricht z.B. einem Modal Split-Modell, welches die Aufteilung der Fahrten zwischen i und j auf die Verkehrsmittel MIV und übrige abbildet, einem Modell zur Abbildung der Wahl der Abfahrtszeit (peak spreading) oder des Entscheids, eine Fahrt durchzuführen oder nicht². In der Literatur werden die Methoden, welche die Nachfrage zwischen i und j im Rahmen der Umlegungsrechnungen in Abhängigkeit der Netz-Kosten anpassen, als **elastische Umlegungen** bezeichnet.

Beispiele von Fragestellungen, mit denen der Verkehrsplaner in der Praxis konfrontiert sein kann, sind:

- a) Was passiert in einem ausgelasteten Strassennetz, wenn Verkehrsberuhigungsmassnahmen getroffen, die Steuerung von Lichtsignalanlagen geändert, Busbevorzugungsmassnahmen eingeführt oder Strassenabschnitte gesperrt werden?
- b) Wie verteilt sich der Verkehr in Zukunft auf dem schon heute ausgelasteten Strassennetz, wenn infolge der allgemeinen Verkehrszunahme mit z.B. 20% mehr Verkehr gerechnet werden muss?

Im Fall (a) verschiebt sich die Angebotskurve, wie in Abbildung 7 dargestellt, nach oben: $S_1(T) \rightarrow S_2(T)$.

¹ Einerseits beschränkt sich diese Studie auf den Teilaspekt der Umlegung, andererseits kommt es in der Praxis oft vor, dass die umzulegende Quelle-Ziel-Matrix nicht das Resultat eines Nachfragemodelles ist, sondern direkt mittels Verkehrserhebungen oder Aktualisierung/Fortschreibung anhand von Querschnittszählungen/Prognosefaktoren gewonnen wurde.

² Die Funktion eignet sich aber z.B. nicht für die Modellierung der Verkehrsverteilung, weil die Zielwahl nicht nur von den Kosten zwischen i und j sondern von den Kosten zwischen i und allen Destinationen j abhängt.

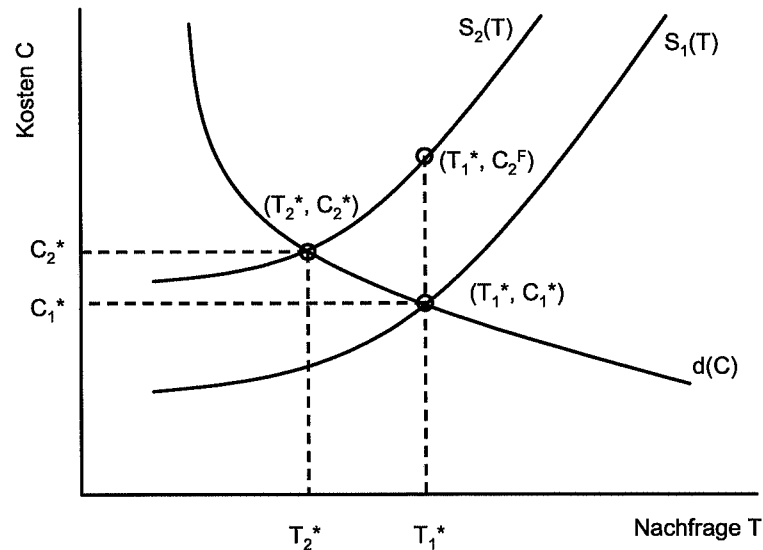


Abbildung 7: Verschiebung der Angebotskurve: neues Gleichgewicht

Weil sich die Kosten im Netz erhöht haben, liegt die zukünftige Angebotskurve S_2 über der gegenwärtigen S_1 . Würde die Umlegung mit unveränderter Nachfrage T_1 durchgeführt, ergäben sich die Kosten C_2^F . Der Punkt (T_1^*, C_2^F) liegt nicht auf der Nachfragekurve $d(c)$, entspricht also nicht einem Gleichgewicht. Das Gleichgewicht stellt sich bei (T_2^*, C_2^*) ein, d.h. die Nachfrage reduziert sich von T_1^* nach T_2^* und die Kosten erhöhen sich von C_1^* nach C_2^* , mit $C_2^* < C_2^F$.

Die Situation für den Fall (b) ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Nachfragekurve verschiebt sich infolge der allgemeinen Verkehrszunahme von $d^{Z0}(C)$ nach rechts zu $d^{Z1}(C)$. Gehen wir von einer Verkehrszunahme um 20% aus, würde unter der Annahme gleich bleibender Netzkosten die zukünftige Nachfrage bei $1.2T^{Z0}$ (Punkt B) liegen. Wird diese Nachfrage umgelegt, führen die Staueffekte zu den Netzkosten C_2^F (Punkt C). Dieser Punkt liegt über der Nachfragekurve $d^{Z1}(C)$. Damit der neue Gleichgewichtspunkt D erreicht wird, können nicht alle Fahrten ausgeführt werden, d.h. die betroffenen Verkehrsbeziehungen müssen in der Quelle-Ziel-Matrix reduziert werden (Annahme: die unterdrückten Fahrten werden auf ein anderes Verkehrsmittel oder in eine andere Zeitperiode verlagert oder sie unterbleiben ganz).

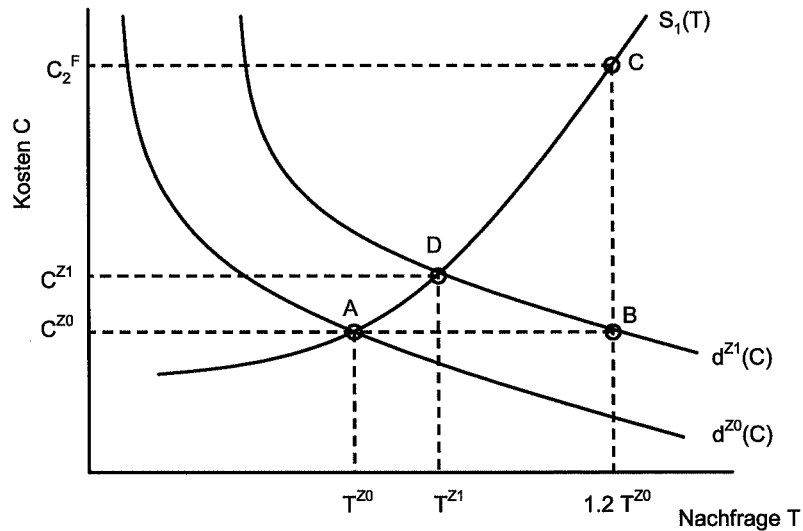


Abbildung 8: Verschiebung der Nachfragekurve: neues Gleichgewicht

Die "richtige" Lösung dieses Problems wäre natürlich die Bestimmung des Gleichgewichtes zwischen Angebot und Nachfrage (inkl. Ziel- und Verkehrsmittelwahl sowie Wahl der Abfahrtszeit). Grundsätzlich werden dabei die im Umlegungsschritt ermittelten Pfad-Kosten in einer äusseren Iterationsschleife zurückgegeben und Verkehrsgeneration, Verkehrsverteilung und Modal Split neu gerechnet. Die neue Quelle-Ziel-Matrix wird in der "inneren" Iteration wieder mit einem Gleichgewichtsansatz umgelegt. Dieser Vorgang, zu dem es je nach Modellaufbau verschiedene Variationen gibt, wird fortgesetzt, bis ein Gleichgewicht des Gesamtsystems gefunden ist.

Oft kann aber der Modellanwender nicht diesen ganzen Prozess durchlaufen, z.B. weil die umzulegende Quelle-Ziel-Matrix extern resp. nicht mit einem Nachfragemodell¹ erstellt worden ist. Im Folgenden beschreiben wir einfache Näherungs-Methoden, welche in der Praxis für die elastische Umlegung angewendet werden. Zu diesen Methoden gehören auch das "Kappen" der Quelle-Ziel-Matrix (matrix constraint) sowie verschiedene Ansätze zur Nachbildung der Verflachung und Verlängerung von Spitzenbelastungs-Situationen (peak spreading).

¹ Z.B. direkt mit Verkehrsbefragungen erstellte Quelle-Ziel-Matrix

2.4.2 Elastizitäts-Ansätze

Um die Auswirkungen relativ kleiner Angebotsveränderungen auf die Nachfrage abzuschätzen, bedient sich die Verkehrsplanung oft auf Erfahrungswerten beruhenden Elastizitäten. Als Beispiel wird z.B. von Axhausen (2002) eine Fahrzeitelastizität der Verkehrsnachfrage von -0.5 angegeben. Die folgenden drei Elastizitätsansätze sind für die Anwendung besonders einfach:

1. Ansatz mit konstanter Elastizität:

$$T_{ij} = G_{ij} T_{ij}^P \left(\frac{c_{ij}}{c_{ij}^P} \right)^B$$

2. Exponential-Ansatz:

$$T_{ij} = G_{ij} T_{ij}^P e^{B(c_{ij} - c_{ij}^P)}$$

3. Semi-Log-Ansatz:

$$T_{ij} = G_{ij} T_{ij}^P e^{B \left(\frac{c_{ij} - c_{ij}^P}{c_{ij}^P} \right)}$$

Mit

- i = Quelle, j = Ziel
- T_{ij} = Prognose-Verkehr zwischen i und j
- G_{ij} = Zunahmefaktor
- T_{ij}^P = Verkehr im Ausgangszustand
- c_{ij} = Pfad-Kosten
- c_{ij}^P = Pfad-Kosten im Ausgangszustand
- B = Kalibrationsparameter (< 0)

Im ersten Fall entspricht B der Elastizität, im zweiten Fall ist die Elastizität Bc_{ij} und im dritten Fall Bc_{ij} / c_{ij}^P .

Auf Elastizitäts-Ansätzen basierende Methoden erfordern die iterative Anwendung eines Umlegungsmodelles zur Berechnung der Pfad-Kosten und eines Matrix-Manipulationsprogrammes zur Berechnung der neuen Nachfragematrix. Weil dieser Iterationsprozess nicht notwendigerweise konvergiert, empfiehlt es sich, die MSA-Methode anzuwenden, wie sie im Kapitel 2.2.7 beschrieben ist.

2.4.3 "Pseudo-Link" Methode¹

Bei dieser Methode wird für jedes Quelle-Ziel-Paar ij ein Pseudo-Link eingeführt, welcher "überzähligen" Verkehr des realen Strassennetzes übernimmt. Dies ist in der folgenden Abbildung illustriert:

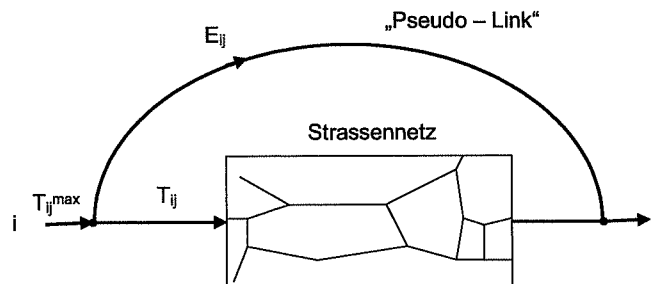


Abbildung 9: "Pseudo-Link" Darstellung für die elastische Umlegung

Für jedes Quelle-Ziel-Paar ij wird die maximale Anzahl Fahrten T_{ij}^{\max} , welche das Strassennetz benutzen möchten, bestimmt. Dabei kann es sich um die mit einfachen Aufwertefaktoren prognostizierten Fahrten handeln. Die Fahrten von i nach j können entweder durch das reale Strassennetz oder über den Pseudo-Link von i nach j gelangen. Die Matrix der ersteren bezeichnen wir mit T_{ij} , jene der letzteren mit E_{ij} . Die Matrix T_{ij} wird damit zur "aktuellen" Quelle-Ziel-Matrix, bei E_{ij} handelt es sich um eine "Pseudo-Matrix" mit jenen Fahrten, welche innerhalb des modellierten Zeitintervalles nicht auf dem Strassennetz ausgeführt werden.

Jedem Pseudo-Link von i nach j sind Kosten Z_{ij} zugeordnet, welche eine Funktion der auf diesen Link umgelegten Verkehrsmenge ist. Es handelt sich also um eine "Pseudo-Widerstandsfunktion", deren Form aus der Inversen der Nachfragefunktion abgeleitet wird.

Die Umlegung der Matrix T_{ij}^{\max} auf das um die Pseudo-Links erweiterte Strassennetz kann mit einem deterministischen Gleichgewichtsansatz unter Verwendung des Frank-Wolfe-Algorithmus erfolgen, wobei die zu minimierende Zielfunktion sich aus einem "Standardanteil" aus dem Strassennetz und einem zusätzlichen Anteil aus den Pseudo-Links wie folgt zusammensetzt:

$$Z = \sum_a Z_a(V_a) + \sum_{ij} Z_{ij}(E_{ij})$$

Es gelten die analogen Nebenbedingungen wie beim normalen deterministischen Gleichgewichtsverfahren.

¹ Diese Methode steht z.B. in SATURN zur Verfügung. Die Beschreibung lehnt sich an die Ausführungen im SATURN-Handbuch an.

2.4.4 "Schatten-Strassennetze"

Van Vuren und Davis (1992) schlagen als vereinfachte elastische Umlegungs-Methode die Verwendung eines "Schatten"-Strassennetzes vor. Bei diesem handelt es sich um eine Kopie des originalen Strassennetzes, allerdings mit konstanten Geschwindigkeiten¹. Die Quelle-Ziel-Matrix wird nun vollständig auf das originale Netz umgelegt, so lange als eine vorgegebene minimale Geschwindigkeit (z.B. 10 km/h) nicht unterschritten wird. Wenn die Geschwindigkeit von Quelle-Ziel-Beziehungen unter diesen minimalen Wert sinkt, werden sie ganz oder teilweise auf das "Schatten-Strassennetz" verlagert. Im Vergleich zur "Pseudo-Link"-Methode gelangen in der "Schatten-Strassennetz"-Methode sehr vereinfachte Angebots- und Nachfragefunktionen zur Anwendung. Entsprechend eignet sich die Methode höchstens für ganz grobe Abschätzungen im Sinne von "quick and dirty" elastischen Umlegungen.

¹ Geschwindigkeiten bei leerem Netz (free-flow-speeds)

3 TESTBEISPIELE

3.1 EINLEITUNG

An einem einfachen Beispiel sollen die wichtigsten der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Umlegungsmethoden angewendet und die Resultate verglichen werden. Dabei interessieren:

- Wie unterscheiden sich die von unterschiedlichen Umlegungsalgorithmen berechneten Linkbelastungen?
- Wie wirkt sich die zunehmende Auslastung des Netzes auf die Ergebnisse aus?
- Welchen Einfluss auf das Ergebnis der Umlegungsberechnung hat die zusätzliche Berücksichtigung der Wartezeiten an den Knoten gegenüber der heute noch üblichen Beschränkung auf Widerstandsfunktionen nur für Strecken?
- Wie wirken sich die Umlegungsmethoden auf die Wahl der Routen von der Zone i zur Zone j aus?
- Wird ein Gleichgewichtszustand erreicht? Wie viele Iterationen sind dazu nötig?
- Wie wirkt sich die Berücksichtigung dynamischer Effekte aus?
- Wie wirkt sich die Berücksichtigung der Elastizität der Nachfrage aus?
- Wie plausibel sind die Ergebnisse?

3.2 TESTANORDNUNG

3.2.1 Netz

Für die Testanwendungen der verschiedenen Umlegungsansätze wird ein einfaches, fiktives Netz angenommen. Es stellt einen Ausschnitt, z.B. aus einer Agglomeration dar. Beidseits einer Hochleistungsstrasse liegt je ein Siedlungsgebiet, bezeichnet als Zone 1 und Zone 2. Für verschiedene Auslastungsgrade dieses Netzes (siehe Punkt 3.2.2) wird untersucht, wie sich die Verkehrsnachfrage von der Zone 1 in die Zone 2 über dieses Netz verteilt. Dabei werden für die Darstellung des Netzes zwei Detaillierungsgrade unterschieden: a) ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände, b) mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände.

a) Widerstandsfunktionen nur für Strecken berücksichtigt

In einer ersten Serie von Anwendungen dienen die Knoten nur der Verknüpfung des Netzes. Die Wartezeiten an den Knoten werden vernachlässigt. Das Testnetz und die angenommenen Linktypen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

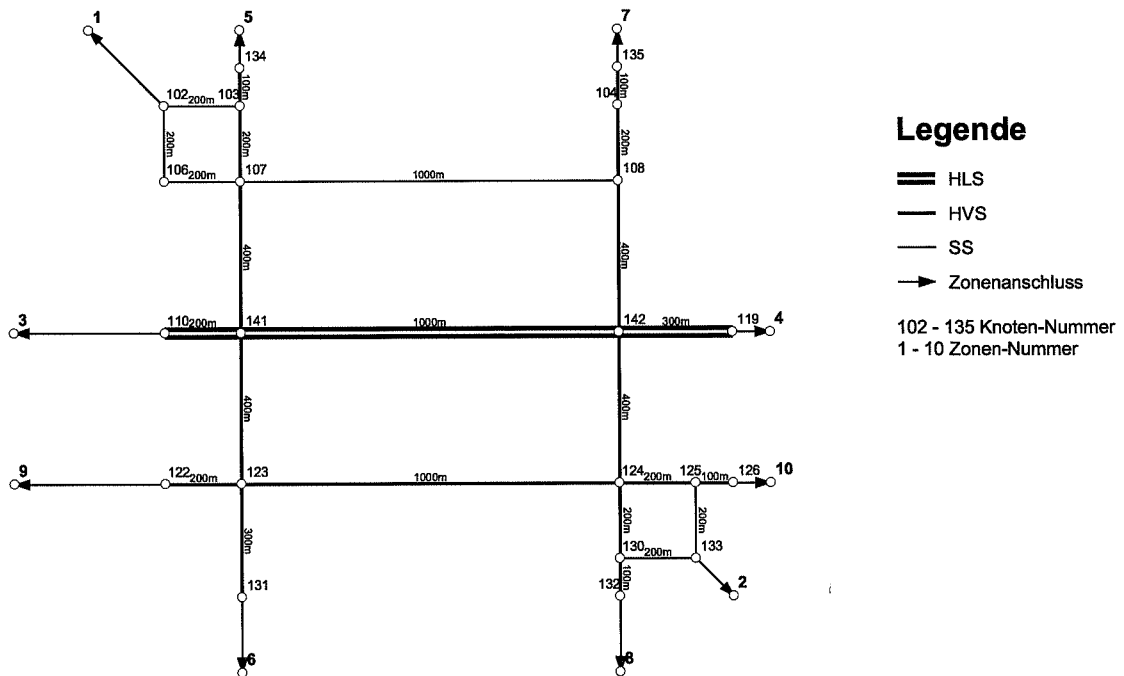


Abbildung 10: Testnetz, ohne Berücksichtigung der Knotendetails

Für die Widerstandsfunktionen wird eine einfache lineare Funktion (siehe untenstehende Abbildung) mit den in der folgenden Tabelle zusammengestellten Parametern angenommen.

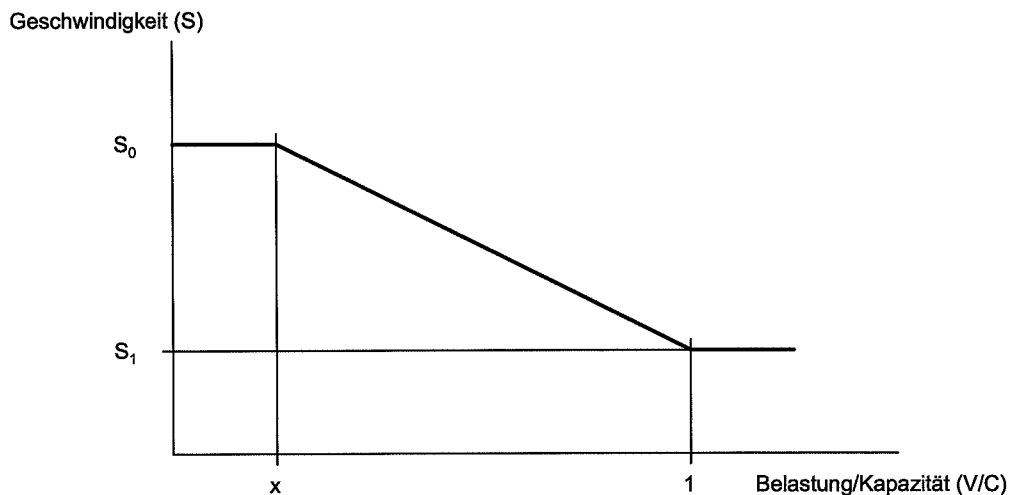


Abbildung 11: Angenommene Form der Widerstandsfunktion für Strecken

Tabelle 1: Angenommene Parameter der Widerstandsfunktionen

Linktyp	Kapazität (C) [Fz/Std.]	x (V/C)	Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss (S ₀) [km/h]	Geschwindigkeit beim Erreichen der Kapazität (S ₁) [km/h]
HLS	2400	0.4	110	45
HVS	1000	0.4	70	35
SS	800	0.3	50	20

b) Mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Für die zweite Serie von Anwendungen werden die belastungsabhängigen Knotenwiderstände berechnet und bei der Umlegung mitberücksichtigt. Es werden die in der folgenden Abbildung dargestellten Knoten-Typen angenommen.

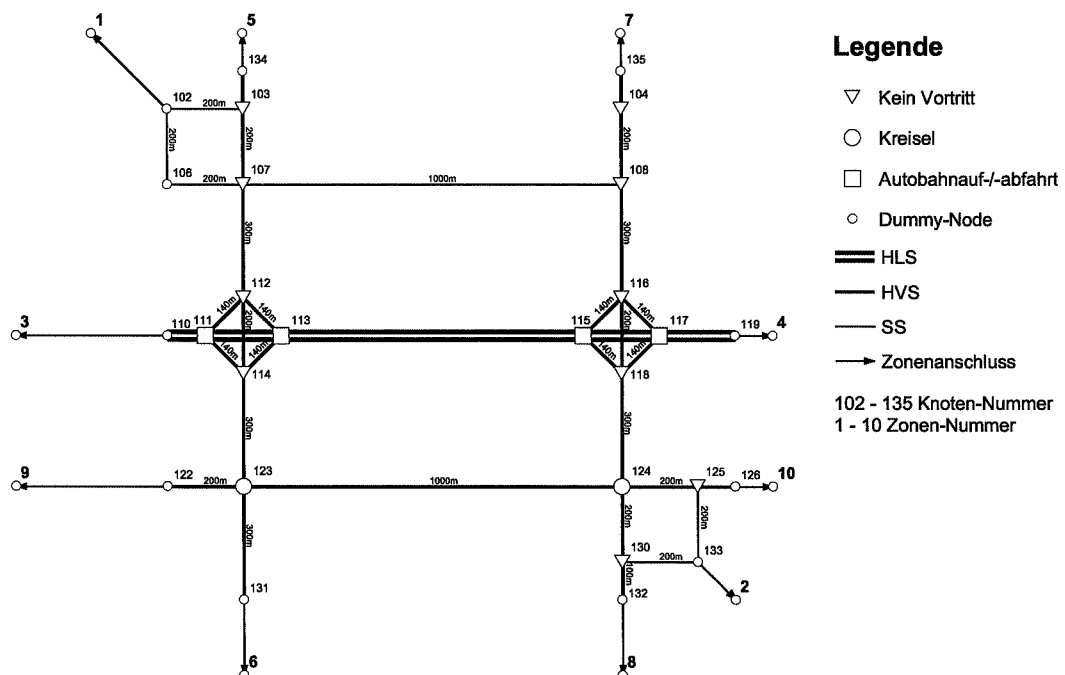


Abbildung 12: Testnetz mit angenommenen Knoten- und Linktypen

Zusätzlich zu den obigen Informationen werden weitere Parameter, wie z.B. Sättigungsflüsse pro Abbiegebeziehung, Grenz- und die Folgezeitlücken für vortrittsbelastete Zufahrten, Details von Signalsteuerungen (Umlaufzeit, Phasenfolge, Zwischenzeiten, fixe oder verkehrabhängige Grünzeiten usw.) kodiert. Insbesondere bei den Sättigungsflüssen fehlen in der Literatur und in der Praxis konkrete Hinweise, wie diese anzunehmen sind. Hier ist man vorläufig auf "engineering judgement" angewiesen.

3.2.2 Verkehrsnachfrage

Die Testanwendungen der Umlegungsansätze erfolgen jeweils für drei Belastungszustände:

- a) mittlere Belastung Quelle-Ziel-Matrix A
- b) starke Belastung Quelle-Ziel-Matrix B
- c) sehr starke Belastung Quelle-Ziel-Matrix C

Für den zu untersuchenden Verkehrstrom von der Zone 1 in die Zone 2 wird einheitlich eine Stärke von 500 Fz/Std. angenommen.

Die verwendeten Quelle-Ziel-Matrizen sind in den folgenden Abbildungen zusammengestellt.

		nach									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
von	1	0	500	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	1200	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	1200	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	500	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	500	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0

Abbildung 13: Quelle-Ziel-Matrix A (mittlere Belastung)

		nach									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
von	1	0	500	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	2000	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	2000	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	800	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	800	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	800	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	800	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	800	0

Abbildung 14: Quelle-Ziel-Matrix B (starke Belastung)

		nach									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
von	1	0	500	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	2200	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	2200	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	900	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	900	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	900	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	900	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	900
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	900	0

Abbildung 15: Quelle-Ziel-Matrix C (sehr starke Belastung)

3.2.3 Routen durch das Testnetz

Im Testnetz kann der Verkehrsteilnehmer für Fahrten von der Zone 1 in die Zone 2 zwischen 12 (sinnvollen) Routen auswählen. Diese sind in der untenstehenden Abbildung dargestellt und in der folgenden Tabelle als Knotenfolgen definiert.

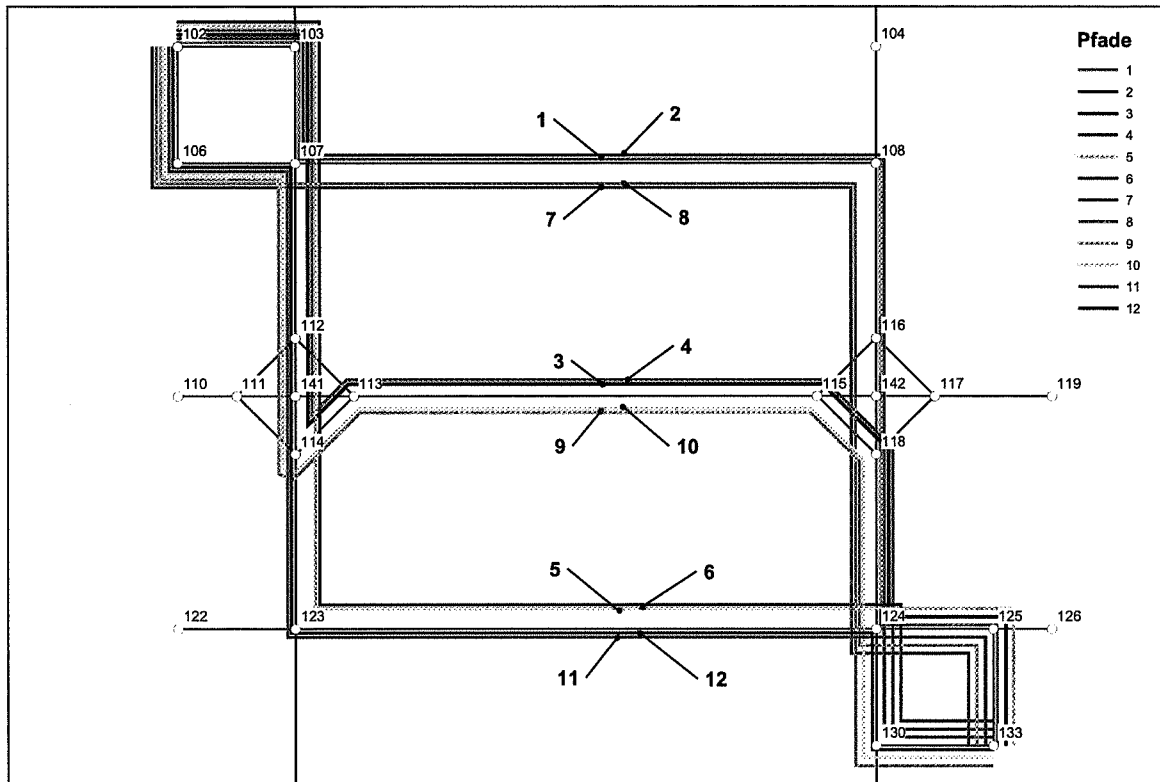


Abbildung 16: (Sinnvolle) Routen von der Zone 1 zur Zone 2

Tabelle 2: Knotenfolge der sinnvollen Routen

Routen-Nr.	Knotenfolge										
1	102	103	107	108	116	118	124	125	133		
2	102	103	107	108	116	118	124	130	133		
3	102	103	107	112	114	113	115	118	124	125	133
4	102	103	107	112	114	113	115	118	124	130	133
5	102	103	107	112	114	123	124	125	133		
6	102	103	107	112	114	123	124	130	133		
7	102	106	107	108	116	118	124	125	133		
8	102	106	107	108	116	118	124	130	133		
9	102	106	107	112	114	113	115	118	124	125	133
10	102	106	107	112	114	113	115	118	124	130	133
11	102	106	107	112	114	123	124	125	133		
12	102	106	107	112	114	123	124	130	133		

Wir werden auf die obigen Routen-Nummern bei der Beschreibung der Umlegungsergebnisse zurückgreifen.

3.2.4 Getestete Umlegungsmethoden

Die getesteten Methoden sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Dabei ist auch angegeben, ob die Anwendung mit oder ohne Berücksichtigung der Knotendetails erfolgte. Bei der Auswahl der zu testenden Methoden wurden jene berücksichtigt, welche heute verbreitet zur Anwendung gelangen oder als typisch für eine Methodenkategorie gelten können.

Für alle Testanwendungen der Umlegungsmethoden wurde in der Widerstandsfunktion nur die Zeit als abhängige Variable verwendet. Auf die Berücksichtigung weiterer Komponenten des Netzwidestandes wurde – anders als in der Praxis meist üblich – verzichtet, damit die Unterschiede in den Umlegungsergebnissen eindeutig auf die Veränderungen der Linkbelastungen zurückgeführt werden können.

Tabelle 3: Durchgeführte Testanwendungen von Umlegungsmethoden

Methode	ohne Knotendetails	mit Knotendetails
Inkrementweise	x	x
Volume Averaging (MSA)	x	x
Wardrop-Gleichgewicht (UE)	x	x
Stochastisches Gleichgewicht (SUE)		x
"Quasi"-Dynamische Umlegung		x
Elastische Umlegung		x

Weil es sich sowohl beim Netz als auch bei der Nachfrage um fiktive Beispiele handelt, konnten die Umlegungsansätze nicht kalibriert werden. Für die Modellparameter – wie auch z.B. für die Widerstandsfunktionen – wurden deshalb plausible Werte angenommen, welche sich auf Erfahrungswerte aus praktischen Anwendungen stützen.

3.3 RESULTATE DER TESTANWENDUNGEN

Die Ergebnisse der Testanwendungen sind im Anhang als Belastungsplots dargestellt. Im Folgenden werden sie analysiert und mit den Ergebnissen der anderen Umlegungsmethoden verglichen. Dabei interessieren namentlich auch der Einfluss der angewandten Umlegungsmethode auf die Wahl der Routen, die Erreichung eines Gleichgewichtszustandes sowie natürlich auch die Plausibilität der Ergebnisse.

3.3.1 Inkrementweise Umlegung (fixe Nachfrage, ohne dynamische Effekte)

Das "Laden" des Netzes erfolgte in 10 Inkrementen à jeweils 10% der jeweiligen Quelle-Ziel-Matrix. Der Vergleich der Belastungsplots im Anhang 2 zeigt, dass die Berücksichtigung der Knotenwiderstände keinen grossen Einfluss auf die Umlegungsergebnisse hat, wobei im Testbeispiel durch die Berücksichtigung der Knoten die HLS offensichtlich am ehesten an Attraktivität einbüsst.

Je für den Fall ohne resp. mit Berücksichtigung der Wartezeiten an den Knoten sind in den beiden folgenden Tabellen die auf den 12 Routen resultierenden "Kosten" für eine Fahrt von der Zone 1 zur Zone 2 aufgelistet. Wie erwartet, nehmen diese mit steigender Auslastung des Netzes zu. Besonders ausgeprägt ist diese belastungsabhängige Zunahme der "Kosten", wenn auch die Knotenwiderstände berücksichtigt werden.

Tabelle 4: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei inkrementweiser Umlegung **ohne** Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	3.2	3.6	3.7
2	3.2	3.6	3.7
3	3.1	3.8	3.9
4	3.0	3.8	3.9
5	3.1	4.0	4.3
6	3.1	3.9	4.3
7	3.2	3.5	3.6
8	3.1	3.5	3.6
9	3.0	3.7	3.8
10	3.0	3.7	3.8
11	3.1	3.8	4.2
12	3.0	3.8	4.2

Tabelle 5: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei inkrementweiser Umlegung **mit** Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	3.9	14.0	22.5
2	3.9	13.9	22.4
3	4.0	14.2	22.8
4	3.9	14.1	22.7
5	4.2	15.8	29.5
6	4.1	15.7	29.4
7	3.9	13.8	22.2
8	3.8	13.7	22.2
9	3.9	14.0	22.6
10	3.9	13.9	22.5
11	4.1	15.6	29.2
12	4.0	15.5	29.2

Leider ist es mit dem verwendeten Programm nicht ohne weiteres möglich, die zwischen der Zone 1 und der Zone 2 effektiv benutzten Pfade zu identifizieren. Die obigen Tabellen zeigen aber, dass bei der mittleren Belastung die Pfad-Kosten nicht stark voneinander abweichen. Bei starker resp. sehr starker Belastung treten hingegen grössere Unterschiede auf, vor allem im Fall mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände. Wie den Belastungsplots im Anhang entnommen werden kann, wird z.B. im Fall der sehr starken Belastung mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände mindestens eine der Routen 5, 6, 11 oder 12 verwendet. Diese vier Routen weisen deutlich höhere Kosten auf als die übrigen Routen. Dass ihnen bei der Umlegung trotzdem Verkehr zugewiesen wird, ist ein Hinweis darauf, dass sicher kein Gleichgewicht im Sinne des Wardrop-Prinzips vorliegt¹.

¹ Mit der im Kapitel 2.2.4 beschriebenen Reload-Methode könnte hier vermutlich ein besseres Resultat erzielt werden.

3.3.2 Volume Averaging (MSA) (fixe Nachfrage, ohne dynamische Effekte)

Generell fällt auf, dass im Testbeispiel die Unterschiede zwischen den mit der Volume-Averaging-Methode (MSA) und den mit der Inkrement-Methode berechneten Linkbelastungen selbst im Fall der sehr starken Netzauslastung vergleichsweise klein sind.

Die aus den Umlegungen mit der Volume-Averaging-Methode (MSA) resultierenden Routen-Kosten sind in den beiden folgenden Tabellen zusammengestellt. Sofort ist ersichtlich, dass bei den einzelnen Belastungszuständen die Kosten auf allen Routen sehr ähnlich resp. sogar identisch sind. Im Fall der "sehr starken Belastung mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände" werden die Routen 5, 6, 11 und 12, welche höhere Kosten aufweisen als die übrigen Routen, tatsächlich nicht benutzt. Um diesen Gleichgewichtszustand zu erreichen, waren 1000 Iterations-Schritte erforderlich.

Tabelle 6: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei der Umlegung mit Volume Averaging, **ohne** Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	3.2	3.7	3.9
2	3.2	3.7	3.9
3	3.0	3.7	3.9
4	3.0	3.7	3.9
5	3.0	3.7	3.9
6	3.0	3.7	3.9
7	3.2	3.7	3.9
8	3.2	3.7	3.9
9	3.0	3.7	3.9
10	3.0	3.7	3.9
11	3.0	3.7	3.9
12	3.0	3.7	3.9

Tabelle 7: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei der Umlegung mit Volume Averaging, **mit** Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	4.0	15.6	24.5
2	4.0	15.6	24.5
3	4.0	15.6	24.5
4	4.0	15.6	24.5
5	4.0	15.6	26.2
6	4.0	15.6	26.2
7	4.0	15.6	24.5
8	4.0	15.6	24.5
9	4.0	15.6	24.5
10	4.0	15.6	24.5
11	4.0	15.6	26.2
12	4.0	15.6	26.2

3.3.3 Deterministisches Gleichgewichts-Verfahren (UE) (fixe Nachfrage)

Wenn die Knotenwiderstände nicht berücksichtigt werden, bestehen kaum Unterschiede zwischen den unter Verwendung des Frank-Wolfe-Algorithmus (FWA) und den mit der Volume-Averaging-Methode (MSA) berechneten Linkbelastungen.

Grössere Unterschiede zeigen die in den Belastungsplots dargestellten Ergebnisse der beiden Methoden für den Fall mit Einbezug der Knotenwiderstände. Mindestens teilweise ist dies sicher auf die Verwendung unterschiedlicher Ansätze für die Berechnung resp. Berücksichtigung (siehe Kapitel 2.2.7) der belastungsabhängigen Knotenwiderstände zurückzuführen

Tabelle 8: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei der Umlegung mit der deterministischen Gleichgewichtsmethode, **ohne** Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	3.2	3.7	3.9
2	3.2	3.7	3.9
3	3.0	3.7	3.9
4	3.0	3.7	3.9
5	3.0	3.7	3.9
6	3.0	3.7	3.9
7	3.2	3.7	3.9
8	3.2	3.7	3.9
9	3.0	3.7	3.9
10	3.0	3.7	3.9
11	3.0	3.7	3.9
12	3.0	3.7	3.9

Tabelle 9: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei der Umlegung mit der deterministischen Gleichgewichtsmethode, mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	7.3	18.4	20.7
2	7.3	18.4	20.7
3	7.0	16.6	19.8
4	7.0	16.7	19.8
5	6.9	17.4	20.6
6	6.9	17.4	20.6
7	7.4	18.5	20.7
8	7.4	18.5	20.8
9	7.1	16.6	19.8
10	7.1	16.6	19.8
11	7.0	17.4	20.6
12	7.0	17.4	20.6

Werden die Knotenwiderstände berücksichtigt, ergibt die Volume-Averaging-Methode im verwendeten (nicht kalibrierten) Testbeispiel für mittlere und starke Belastungen generell tiefere Routen-Kosten als die deterministische Gleichgewichtsmethode. Dies hängt weniger von der verwendeten Methode als vielmehr von der Berechnungsart der belastungsabhängigen Knotenwiderstände ab. Bei dem hier verwendeten deterministischen Gleichgewichtsverfahren nach Frank-Wolfe wird an den Knoten nur mit jenem Verkehr gerechnet, welcher an diesen auch ankommt, also nicht stromaufwärts in einem Kapazitätsengpass stecken geblieben ist (d.h. es werden in gewissem Sinne bereits dynamische Effekte berücksichtigt). Wird dieser Effekt – welcher vor allem bei sehr starker Auslastung des Netzes bedeutsam wird – wie bei der hier verwendeten Volume-Averaging-Methode oder bei den meisten heute standardmässig verwendeten Umlegungsmethoden (wenn sie überhaupt mit belastungsabhängigen Knotenwiderständen rechnen) vernachlässigt, überschätzt man infolge "Mehrfachzählung" die Summe der Wartezeiten an den Knoten.

In den beiden obigen und in den folgenden Tabellen sind die "Kosten" jener Routen, welche zwischen den Zonen 1 und 2 benutzt werden, fett eingetragen. Es zeigt sich, dass für den Fall mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände das angestrebte Wardrop-Gleichgewicht nicht exakt erreicht werden konnte; es gibt unbenutzte Routen, welche kleinere "Kosten" aufweisen als die benutzten und die "Kosten" der benutzten sind nicht alle genau gleich gross. Mit der Volume-Averaging-Methode wurde dieses Gleichgewicht besser erreicht (allerdings waren dazu 1000 Iterationsschritte nötig).

3.3.4 Stochastisches Gleichgewichtsverfahren (SUE) (fixe Nachfrage)

Das stochastische Gleichgewichtsverfahren wurde nur für den Fall mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände getestet. Für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der durch die Verkehrsteilnehmer wahrgenommenen "Kosten" wurden – lediglich zur Illustration und ohne weitere Abklärungen betr. Plausibilität – die beiden folgenden Fälle angenommen:

- Rechtecksverteilung mit dem Mittelwert = berechnete "Kosten" C und einer Breite von $\pm 0.2 \cdot C$
- Normalverteilung mit Mittelwert = berechnete "Kosten" C und der Varianz = $0.2 \cdot C$

Mit Ausnahme der Annahme stochastischer statt deterministischer Routen-Kosten gelangen in dieser Studie bei SUE-Umlegungen die gleichen Algorithmen und Annahmen zur Anwendung wie bei den UE-Umlegungen.

a) SUE mit Rechtecksverteilung der Kosten

Für alle drei Belastungszustände ergibt die stochastische Umlegung für grosse Teile des Netzes sehr ähnliche Resultate wie die UE-Methode. Die Nachfrage wird aber über mehr Routen verteilt (siehe auch die nachfolgende Tabelle, in welcher die "Kosten" der zwischen den Zonen 1 und 2 benutzten Routen fett eingetragen sind). Grössere Unterschiede sind bei den Linkbelastungen im Bereich der Zone 2 festzustellen, und zwar bei allen 3 untersuchten Belastungszuständen. Dies ist in gewissem Widerspruch zu der in der Literatur verschiedentlich erwähnten Feststellung, dass sich die UE- und SUE-Ergebnisse bei sehr starker Verkehrsbelastung kaum unterscheiden (Vrtic, 2003).

Tabelle 10: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei der SUE-Umlegung mit Rechtecksverteilung der empfundenen Kosten, mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	7.6	18.8	16.9
2	7.6	18.8	16.9
3	7.3	17.0	17.4
4	7.3	17.1	17.5
5	6.7	16.1	17.6
6	6.7	16.2	17.6
7	7.7	18.8	16.9
8	7.7	18.8	17.0
9	7.4	17.1	17.5
10	7.4	17.1	17.6
11	6.8	16.2	17.6
12	6.8	16.2	17.7

In der obigen Tabelle fällt auf, dass nicht alle Routen-Kosten bei sehr starker Belastung grösser sind als im Fall mit nur starker Belastung (Routen 1, 2, 7 und 8 weisen im Fall "starke Belastung" grössere Kosten auf als im Fall "sehr starke Belastung"). Dies scheint auf den ersten Blick nicht plausibel zu sein. Die Überprüfung der Gesamtkos-

ten¹ im Netz ergibt aber, dass diese im Fall des sehr stark belasteten Netzes um 23% grösser sind als im Fall mit nur starker Belastung. Das scheinbar unplausible Phänomen beschränkt sich also auf die erwähnten Routen und ist auf die in der SUE-Umlegung zufällige Variation der Link-Kosten zurückzuführen.

Weiter zeigt die Tabelle, dass die Umlegung nicht in einem Wardrop-Gleichgewichtszustand resultiert. (Zur Erinnerung: Für die SUE-Umlegung wird in den Testbeispielen die MSA-Methode und nicht der Frank-Wolfe-Algorithmus angewendet). Am ehesten wird dieses Gleichgewicht im Fall der sehr starken Auslastung des Netzes erreicht.

b) SUE mit Normalverteilung der Kosten

Die Belastungsbilder für die drei betrachteten Auslastungsgrade des Netzes unterscheiden sich nur in Nuancen von jenen der SUE-Umlegung mit rechteckiger Wahrscheinlichkeitsverteilung der empfundenen Kosten.

Tabelle 11: Resultierende "Kosten" (Zeit) auf den Routen von Zone 1 nach Zone 2 bei der SUE-Umlegung mit Normalverteilung der empfundenen Kosten, mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Route	Auslastung des Netzes		
	Mittlere Belastung	Starke Belastung	Sehr starke Belastung
1	7.2	13.6	15.9
2	7.2	13.7	16.0
3	6.9	15.0	17.0
4	6.9	15.0	17.0
5	7.1	15.6	16.9
6	7.1	15.6	17.0
7	7.4	13.8	16.2
8	7.4	13.8	16.2
9	7.0	15.2	17.3
10	7.1	15.2	17.3
11	7.2	15.8	17.2
12	7.3	15.8	17.2

Das oben beobachtete Phänomen der höheren Kosten auf einzelnen Routen bei weniger stark belastetem Netz tritt hier nicht auf. Hingegen fällt auf, dass die Kosten auf den einzelnen Routen in der Regel kleiner sind als im Testbeispiel mit der gleichmässigen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Linkkosten. Der Vergleich der berechneten Summe der im Netz verbrachten Reisezeit ergibt, dass auch diese etwas kleiner ist (um 9% bei starker Belastung und um 3% bei sehr starker Belastung des Netzes), wenn eine Normalverteilung der empfundenen Kosten angenommen wird statt einer Rechteckverteilung. Die Annahme einer Normalverteilung bewirkt also offenbar eine "bessere" Verteilung der Verkehrsströme, was sich in ausgeglicheneren Routen-Kosten und insgesamt kleineren Gesamtkosten äussert (natürlich kann hier nicht gesagt werden, welche Annahme die "richtigeren" Umlegungsergebnisse liefert).

¹ In den Testbeispielen entsprechen diese der Summe der im Netz verbrachten Reisezeit aller Verkehrsteilnehmer (Fz*s).

3.3.5 "Quasi"-dynamische Umlegung

Die Prüfung der mit den bisher beschriebenen Umlegungsmethoden berechneten Belastungsplots zeigt, dass vor allem im Fall der sehr starken Netzauslastung auf einzelnen Links Belastungen über der Kapazitätsgrenze resultierten. Dies ist eine Folge einerseits der Vernachlässigung dynamischer Effekte (vgl. Kapitel 2.3) und andererseits der Vernachlässigung der Nachfrage-Elastizität (vgl. Kapitel 2.4). Mit der "quasi"-dynamischen Umlegungsmethode wird das erste Problem angegangen. Dazu wird die Zeitabhängigkeit des Verkehrsaufkommens berücksichtigt, indem es nicht als konstant über den ganzen Modellierungszeitraum, sondern unterteilt in Zeitscheiben angenommen. Das Fortschreiten des Verkehrs der einzelnen Zeitscheiben durch das Netz wird kontrolliert und am stromabwärts liegenden Knoten wird immer nur mit jenem Verkehr gerechnet, welcher den stromaufwärts liegenden Knoten passieren konnte. Trifft der Verkehr einer Zeitscheibe auf einen Rückstau aus der vorangegangenen Zeitscheibe, muss er "hinten anstehen". Bei Rückstau bis in den stromaufwärts liegenden Knoten wird bei diesem die Kapazität der betroffenen Knotenströme entsprechend reduziert. Für die Demonstration des Effektes der "quasi"-dynamischen Umlegung an einem möglichst einfachen Beispiel verwenden wir die gleiche deterministische Gleichgewichtsmethode (UE) und die gleichen stochastischen Methoden (SUE) wie oben, wobei die Verkehrsnachfrage in 2 Zeitscheiben von je 30 Minuten Dauer mit je gleich grosser Verkehrsnachfrage unterteilt wird.

Die Auswirkungen der Berücksichtigung dynamischer Effekte zeigen die Belastungsplots im Anhang 2. Auch im Netz mit sehr starker Auslastung treten keine über der Link- resp. Knotenkapazität liegende Belastungen mehr auf. Bildlich gesprochen schaffte der Verkehr, welcher auf den Belastungsplots nicht mehr erscheint (d.h. die Differenz zwischen der Verkehrsnachfrage und der tatsächlich "verarbeitbaren" Verkehrsmenge) die Durchfahrt durch das Netz innerhalb der modellierten Zeitperiode (hier 1 Stunde) nicht und steckt nun in Staus vor den verschiedenen Knoten¹.

Am Beispiel der Verkehrsnachfrage von der Zone 1 in die Zone 2, welche 500 Fahrzeuge pro Stunde beträgt, zeigt sich für die verschiedenen Gleichgewichts-Umlegungen:

Tabelle 12: UE: Angekommene und gestaute Fahrzeuge am Schluss der Modell-Periode (infolge Berücksichtigung dynamischer Effekte)

Netzauslastung	Ankunft in der Zone 2 bis Abschluss der modellierten Zeitperiode	Am Schluss der modellierten Zeitperiode in Staus aufgehalten
Mittlere Belastung	410 Fahrzeuge	90 Fahrzeuge
Starke Belastung	322 Fahrzeuge	178 Fahrzeuge
Sehr starke Belastung	301 Fahrzeuge	199 Fahrzeuge

¹ Bei der Modellierung einer ausreichend langen Zeitperiode würde sich zeigen, dass, sobald die Nachfrage genügend lang kleiner als die Kapazität ist, alle Staus abgebaut werden und der vom Modell dargestellte Verkehr auf dem Netz der Nachfrage entsprechen wird.

Tabelle 13: SUE mit rechteckiger Wahrscheinlichkeitsverteilung: Angekommene und gestaute Fahrzeuge am Schluss der Modell-Periode (infolge Berücksichtigung dynamischer Effekte)

Netzauslastung	Ankunft in der Zone 2 bis Abschluss der modellierten Zeitperiode	Am Schluss der modellierten Zeitperiode in Staus aufgehalten
Mittlere Belastung	378 Fahrzeuge	122 Fahrzeuge
Starke Belastung	219 Fahrzeuge	281 Fahrzeuge
Sehr starke Belastung	40 Fahrzeuge	460 Fahrzeuge

Tabelle 14: SUE mit Normalverteilung: Angekommene und gestaute Fahrzeuge am Schluss der Modell-Periode (infolge Berücksichtigung dynamischer Effekte)

Netzauslastung	Ankunft in der Zone 2 bis Abschluss der modellierten Zeitperiode	Am Schluss der modellierten Zeitperiode in Staus aufgehalten
Mittlere Belastung	407 Fahrzeuge	93 Fahrzeuge
Starke Belastung	290 Fahrzeuge	210 Fahrzeuge
Sehr starke Belastung	265 Fahrzeuge	235 Fahrzeuge

Während für den betrachteten Verkehrsstrom von der Zone 1 in die Zone 2 die UE- und die SUE-Methode mit Normalverteilung ähnliche und plausible Resultate liefern, ergibt die SUE-Methode mit Rechteckverteilung viel tiefere (weniger plausible) Werte für den ankommenden resp. viel höhere für den gestauten Verkehr. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die hier untersuchte Gruppe von SUE-Methoden sensitiv auf die angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung reagiert und dass diesem Umstand in der Praxis durch entsprechend eingehende Beobachtungen des Verkehrsverhaltens und eine sorgfältige Kalibration Rechnung getragen werden muss.

3.3.6 Elastische Umlegung

Als Anwendungsbeispiel für die elastische Umlegung wählten wir einen Ansatz mit konstanter Elastizität (siehe Kapitel 2.4.2). Diesen wendeten wir zusammen mit der UE-Umlegung, einmal unter Vernachlässigung dynamischer Effekte und einmal mit deren Berücksichtigung, an.

Da wir im Testbeispiel über keine Angaben zum Verlauf der Nachfragekurve resp. zu den Elastizitäten verfügen, nahmen wir - willkürlich - eine konstante, für alle Verkehrsbeziehungen einheitliche, Kosten-Elastizität von -0.5 an. Weiter nahmen wir an, der Belastungszustand "mittlere Belastung" stelle die heutige Nachfrage mit bekannter Quelle-Ziel-Matrix und bekannten Pfad-Kosten dar, während es sich bei der "starken Belastung" und bei der "sehr starken Belastung" um zukünftige Zustände handle, deren Quelle-Ziel-Matrizen mit zugehörigen Aufwertungsfaktoren geschätzt worden seien.

Wie die Belastungsplots im Anhang 2 zeigen, ergibt die statische elastische UE-Umlegung deutlich kleinere Linkbelastungen als jene ohne Berücksichtigung der Nachfrage-Elastizität. Werden die dynamischen Effekte ebenfalls berücksichtigt, ergeben sich bei der elastischen Umlegung ebenfalls kleinere Linkbelastungen als bei einer unelastischen Umlegung. Die Unterschiede sind aber nicht sehr ausgeprägt.

Eine Analyse der Quelle-Ziel-Matrizen mit/ohne Berücksichtigung der Elastizität ergibt folgendes Bild:

Tabelle 15: Einfluss der Nachfrage-Elastizität

	Anzahl Fahrten in der Prognose-Matrix	
	Zustand 1 "starke Belastung"	Zustand 2 "sehr starke Belastung"
Ohne Berücksichtigung der Nachfrage-Elastizität	9'300	10'300
Mit Berücksichtigung der Nachfrage-Elastizität	8'010	8'654
Differenz absolut	1'290	1'646
Differenz prozentual	16.1%	19.0%

Auch die prognostizierten 500 Fahrten von der Zone 1 in die Zone 2 sind natürlich von den steigenden Kosten betroffen: im Zustand 1 sind es nur 410, im Zustand 2 407, welche auf das Strassennetz umgelegt werden.

Wie im Kapitel 2.4. erwähnt, wird davon ausgegangen, dass es sich bei der Reduktion infolge Nachfrageelastizität um 1'290 Fahrten im Zustand 1 resp. um 1'646 Fahrten im Zustand 2 um Fahrten handelt, welche

- in eine Zeitperiode ausserhalb der modellierten verlegt werden (peak spreading)
- mit einem anderen Verkehrsmittel durchgeführt werden
- oder gar nicht durchgeführt werden.

Die in der Praxis oft angewandte einfache Prognose-Methode, mit einem Satz geschätzter Aufwertungsfaktoren die heutige Nachfragematrix ohne Berücksichtigung der Elastizitäten hochzurechnen, würde also in unserem Fallbeispiel zu einer Überschätzung der Nachfrage auf dem Strassennetz im Zustand 1 um 16.1% und im Zustand 2 um 19% führen. Mit einer elastischen Umlegungsmethode kann dieser "Fehler" korrigiert und ein realitätsgetreueres Umlegungsergebnis für den Strassenverkehr erzielt werden.

Dass dieses Ergebnis tatsächlich realitätsgetreuer sein dürfte, zeigt auch der Einfluss der Berücksichtigung dynamischer Effekte bei der Umlegung: Die Unterschiede zwischen den Netzbelastungen ohne/mit Berücksichtigung der dynamischen Effekte sind deutlich kleiner als jene, welche wir im Kapitel 3.3.5 festgestellt haben. Die Menge der in Staus im Netz zurückgehaltenen Fahrzeuge erscheint nun wesentlich plausibler. Zudem stellen wir fest, dass alle 410 resp. 407 Fahrten von der Zone 1 innerhalb der modellierten Zeitperiode in der Zone 2 ankommen.

4 BEURTEILUNG DER UMLEGUNGSMETHODEN

4.1.1 Einleitung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es bei der Beurteilung der Umlegungsmethoden 4 Ebenen zu unterscheiden gilt, nämlich:

- Umlegungs-Algorithmen
- Umlegung mit/ohne Modellierung der Knotenwiderstände
- Umlegung mit/ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte
- Umlegung mit/ohne Berücksichtigung der Nachfrage-Elastizität

Selbstverständlich müssen die Beurteilung der Methoden und die Wahl der bestgeeigneten Methode auch die Situation, für welche eine Verkehrsumlegung durchgeführt werden soll, berücksichtigen. Wie eingangs erwähnt, interessieren in dieser Studie stark belastete Netze, wie sie vor allem in Städten und Agglomerationen auftreten. Auch sei daran erinnert, dass es hier um die Verkehrsumlegung als eigenständigen Modellschritt geht und die Kombination mit anderen Modellschritten resp. die – anzustrebende, oft aber nicht mögliche – Integration in ein Gesamtmodell nicht behandelt wird.

4.1.2 Umlegungs-Algorithmen

Für die Situationen "mittlere Belastung" und "sehr starke Belastung" sind in den folgenden Tabellen für eine Auswahl von Links die mit den getesteten Umlegungs-Algorithmen (ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte und der Elastizität) berechneten Belastungen zusammengestellt.

Tabelle 16: Umlegungsergebnisse für die Situation "mittlere Belastung", ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Link	Umlegungsalgorithmus			SUE (Normalverteilung)
	Inkrementweise	Volume-Averaging	UE	
107 - 141	1000	1000	1000	nicht ge- rechnet
141 - 142	1625	1642	1640	
142 - 124	925	942	940	
124 - 125	800	750	750	
124 - 130	700	750	750	

Tabelle 17: Umlegungsergebnisse für die Situation "sehr starke Belastung", ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Link	Umlegungsalgorithmus			SUE (Normalverteilung)
	Inkrementweise	Volume-Averaging	UE	
107 - 141	1350	1080	1083	nicht ge- rechnet
141 - 142	2550	2380	2383	
142 - 124	1300	1400	1400	
124 - 125	1200	1150	1149	
124 - 130	1100	1150	1151	

Tabelle 18: Umlegungsergebnisse für die Situation "mittlere Belastung", mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Link	Umlegungsalgorithmus			
	Inkrementweise	Volume-Averaging	UE	SUE (Normalverteilung)
107 - 112	950	950	1000	967
113 - 115	1500	1489	1605	1600
115 - 124	850	884	903	900
124 - 125	800	736	957	717
124 - 130	700	764	543	783

Tabelle 19: Umlegungsergebnisse für die Situation "sehr starke Belastung", mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

Link	Umlegungsalgorithmus			
	Inkrementweise	Volume-Averaging	UE	SUE (Normalverteilung)
107 - 112	1300	1098	1164	1120
113 - 115	2545	2400	2268	2280
115 - 124	1345	1402	1203	1260
124 - 125	1150	1031	1400	1167
124 - 130	1150	1268	900	1133

Die Tabellen zeigen:

- Ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände ergeben die inkrementweise-, die Volume-Averaging- und die UE-Methode beim Zustand "mittlere Belastung" praktisch die gleichen Linkbelastungen. Bei grösserer Netzbelastung ("sehr starke Belastung") sind die Ergebnisse der Volume-Averaging- und der UE-Methode identisch, jene der inkrementweisen Methode weichen von diesen ab (es kann davon ausgegangen werden, dass mit einer Unterteilung der Wunschlinienmatrix in deutlich mehr und kleinere Inkremente diese Abweichungen kleiner würden.)
- Bei den Umlegungen mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände sind für den Zustand "mittlere Belastung" die Ergebnisse der inkrementweisen und der Volume-Averaging-Methode auf der einen und der UE- und SUE-Methode auf der anderen Seite je ähnlich. Es sei daran erinnert, dass für die beiden Gruppen unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Knotenwiderstände verwendet wurden und die Unterschiede also darauf zurückzuführen sein könnten. Beim Zustand "sehr starke Belastung" geben die 4 Methoden unterschiedliche Resultate. Zwar sind die Linkbelastungen mindestens von der gleichen Grössenordnung, die Abweichungen auf einzelnen Links betragen aber doch bis zu 40%. Am ähnlichsten sind die Ergebnisse bei der UE- und SUE-Methode, mindestens für die drei ersten der betrachteten Links¹.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass alle hier untersuchten Umlegungsmethoden, wenn die Modellparameter sorgfältig gewählt werden, plausible Resultate liefern. Für den Anwender von Modellsoftware-Paketen bestehen auch kaum Unter-

¹ Die genauere Analyse der Output-Listings der UE- und SUE-Methode zeigt, dass bei der Aufteilung des Verkehrs auf die Links 124 - 125 und 124 - 130 Konvergenzprobleme auftreten. Im Rahmen dieser Studie konnten diese aber nicht weiter untersucht resp. gelöst werden.

schiede bezüglich des Aufwandes zwischen den Methoden: Der grösste Aufwand entsteht bei der Kodierung des Netzes und beim Kalibrieren der Modellparameter - und dieser ist bei allen Methoden etwa gleich gross. Die Anwendung des Umlegungsalgorithmus erfolgt nach der Netzcodierung und Kalibration dann sozusagen auf Knopfdruck.

Die Frage, welche der Umlegungsmethoden die "richtigen" oder "richtigeren" Resultate liefert, kann anhand der hier betrachteten fiktiven Test-Beispiele nicht beantwortet werden. In Anbetracht der Unsicherheiten bei der Netzkodierung (welches ist die zutreffende Widerstandsfunktion, welche Sättigungsflüsse sind bei den Knoten einzusetzen?) und der unten folgenden grundlegenden Aspekte ist diese Frage indessen auch nicht von so grosser Bedeutung.

4.1.3 Umlegung mit/ohne Modellierung der Knotenwiderstände?

Wenn es um mehr als ganz grobe Abschätzungen geht, kann für den Fall stark belasteter Strassennetze in Städten und Agglomerationen die Antwort auf diese Frage nur heissen: in jedem Fall mit Modellierung (oder mindestens grober Abschätzung) der Knotenwiderstände. Begründung:

- Auch die Testbeispiele zeigen, dass die Routenwahl stark von den Wartezeiten an den Knoten beeinflusst wird. Entsprechend unterschiedlich fallen die berechneten Linkbelastungen aus, wenn mit oder ohne Knotenwiderstände gerechnet wird.
- Bei Beurteilungen von Varianten – wozu in der Regel die Resultate von Verkehrsmodellen benötigt werden – interessieren neben den Linkbelastungen auch die Reisezeiten. Ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände würde ein substantieller resp. sogar der grösste Teil derselben vernachlässigt (vgl. z.B. die Tabellen 8 und 9 im Kapitel 3.3.3).

Sollen auch dynamische Effekte, d.h. z.B. Entstehung und Abbau von Rückstau, berücksichtigt werden, führt kein Weg an der Modellierung der Knotenwiderstände vorbei.

4.1.4 Umlegung mit/ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte?

Die in dieser Studie durchgeführten Testanwendungen zeigen, dass ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte mit den folgenden Problemen und unrealistischen Resultaten zu rechnen ist:

- Linkbelastungen deutlich über der Kapazitätsgrenze
- Mit unrealistisch hohen Belastungen berechnete Knotenwiderstände
- Vernachlässigung von Rückstau in stromaufwärts liegende Knoten

Mit der heuristischen Methode des "matrix capping" oder der im Kapitel 2.2.6 beschriebenen kapazitätsbegrenzten Gleichgewichtsumlegung könnten diese Probleme auch ohne Simulation dynamischer Effekte - mindestens teilweise - behoben werden. Eher nachvollziehbare Resultate liefert aber sicher die Simulation der Fortschreitung des Verkehrs durch das Netz, wie sie im Kapitel 3.3.5 zur Anwendung gelangt ist.

4.1.5 Umlegung mit/ohne Berücksichtigung der Nachfrage-Elastizität?

Mit der "quasi"-dynamischen Umlegung (vgl. Kapitel 3.3.5) ergeben sich plausible Linkbelastungen und Reisezeiten. Bei sehr starker Netzauslastung werden aber die im Netz "zurückgehaltenen" Verkehrsmengen unrealistisch gross. Eher plausibel ist, dass mindestens ein Teil dieses Verkehrs nicht mehr innerhalb der modellierten Zeitperiode auf das Strassennetz gelangt, sondern andere Alternativen wählt. Dieses Verhalten kann mit einer elastischen Umlegung nachgebildet werden. Die Antwort auf die in der Abschnittsüberschrift gestellte Frage muss daher lauten: je stärker das Strassennetz ausgelastet ist resp. je grössere Zuwachsraten die umzulegende Nachfragematrix aufweist, desto eher muss neben der Dynamik auch die Elastizität der Verkehrsnachfrage modelliert werden. Ohne Berücksichtigung der Nachfrageelastizität wäre es auch kaum möglich, die Verkehrsmodell-Resultate sinnvoll in einer Variantenbeurteilung einzusetzen.

Wie die Testbeispiele gezeigt haben, können auch trotz der Berücksichtigung der Nachfrage-Elastizität bei der Umlegungsberechnung Belastungen über der Kapazität resultieren, wenn die dynamischen Effekte, d.h. die zeitabhängige Bewegung des Verkehrs durch das Netz, ausser Acht gelassen werden.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Bei den Umlegungs-Algorithmen stehen heute die deterministischen und die stochastischen Nutzergleichgewichts-Ansätze (UE und SUE) im Vordergrund. Den SUE-Ansätzen wird in der neueren Literatur, z.B. Ortúzar und Willumsen (2001), Vrtic (2003) oder Vrtic et al. (2004), der Vorzug gegeben, da sie auf realistischeren Annahmen bezüglich des Routenwahlverhaltens beruhen. Allerdings wird auch darauf hingewiesen (z.B. Vrtic, 2003), dass bei grosser Netzauslastung (Stausituation) die Unterschiede zwischen UE und SUE klein sind. Van Vliet (2002) verwendet als Mass für die Auslastung den Wert ε und empfiehlt, für $\varepsilon < 25\%$ einen SUE-Ansatz zu wählen und in den übrigen Fällen mit UE zu rechnen. Der Wert ε ist wie folgt definiert:

$$\varepsilon = \frac{\sum C_a - \sum C_a^*}{\sum C_a^*}$$

mit

C_a = "Kosten" bei Stau

C_a^* = "Kosten" bei freiem Verkehrsfluss

Während bei schwacher Verkehrsnachfrage die Wahl der anzuwendenden Umlegungs-Algorithmen eine wichtige Rolle für die Zuverlässigkeit der Resultate spielen kann, treten mit zunehmender Auslastung des Strassennetzes die Fragen der Kapazitäten, der Widerstandsfunktionen, der Dynamik und der Elastizität der Verkehrsnachfrage in den Vordergrund. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass diese Einflüsse sogar eine dominierende Bedeutung annehmen und die Frage nach dem "besten" Umlegungs-Algorithmus in den Hintergrund tritt.

Die in dieser Studie vorgestellten und in den Testbeispielen angewendeten Methoden zur Berücksichtigung der dynamischen Effekte und der Nachfrage-Elastizität sind für Fälle gedacht, wo eine "extern" geschätzte resp. aufgewertete Quelle-Ziel-Matrix auf das Strassennetz umgelegt werden soll und keine Nachfrage-, Verteilungs- und Modal Split-Modelle, weder als Teilmodelle noch als kombinierte Modelle, zur Verfügung stehen. Solche Fälle treten heute in der Praxis häufig auf und es wird sie – angesichts der knappen Finanzmittel – auch in Zukunft geben.

Empfehlungen, welches Umlegungsverfahren für Situationen mit starker Netzbelastung gewählt werden soll, müssen natürlich auch die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Resultate sowie die Art des zu untersuchenden Strassennetzes berücksichtigen.

Für erste Abschätzungen im Sinne von "quick and dirty"-Analysen mag im Fall von regionalen Strassennetzen mit grossen Knotenabständen eine einfache inkrementweise Umlegung ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände genügen.

Für stark ausgelastete Strassennetze mit relativ enger Knotenfolge, bei denen die Warte- und Durchfahrtszeiten an den Knoten einen grossen Teil der gesamten Reisezeit

ausmachen¹ und wie sie heute in den meisten Städten und Agglomerationen vorkommen, ergeben sich aus der Studie die folgenden Empfehlungen:

- Auch für grobe Abschätzungen sollte nicht auf die Modellierung der verkehrsabhängigen Knotenwiderstände (Simulation) verzichtet werden.
- Steigen die Ansprüche an die Zuverlässigkeit der Resultate, weil diese beispielsweise in Bewertungsverfahren als Grundlage für die Berechnung von Nutzen (Zeitkosten), Lärm- und Luftschadstoff-Emissionen usw. benötigt werden, sollen in erster Priorität mindestens die dynamischen Effekte und in zweiter Priorität wenn möglich auch die Nachfrage-Elastizität berücksichtigt werden. Dies setzt voraus, dass entsprechende Erhebungsergebnisse resp. Erfahrungswerte als Grundlage für die Modellkalibrationen zur Verfügung stehen.

Die Komplexität der Zusammenhänge und Wechselwirkungen in stark belasteten Strassennetzen in Städten und Agglomerationen ruft natürlich nach dem Einsatz integrierter dynamischer Gesamtverkehrsmodelle. Die Weiterentwicklung solcher Modelle ist Gegenstand laufender Verkehrsforschungen. Ihre Anwendung ist mit einem grösseren Aufwand für die Grundlagenenerhebung und die Modelletablierung verbunden. In kommerziellen Verkehrsmodell-Paketen und damit der Praxis stehen sie noch kaum zur Verfügung.

Die Arbeiten an der vorliegenden Studie haben in den folgenden Bereichen Unsicherheiten resp. Wissenslücken aufgedeckt, welche mit entsprechenden SVI-Forschungsarbeiten geschlossen werden sollten:

- Herleitung repräsentativer Widerstandsfunktionen für städtische Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten, welche neben geometrischen Elementen auch die Einflüsse betrieblicher Elemente wie Strassenrandparkierung, Anlieferung, Fussgängerquerungen, ÖV-Linien und -Haltestellen, Verkehrszusammensetzung usw. berücksichtigen.
- Empirische Herleitung für typisierte Situationen der Zusammenhänge zwischen Sättigungsflüssen an Knoten und den relevanten Einflussfaktoren wie Geometrie, Vortrittsregelung, Fussgängerströme, ÖV-Linien und -Haltestellen, Verkehrszusammensetzung usw.
- Kombination von Standard-Mikrosimulationsmodellen und Umlegungsmodellen (Erstellen der entsprechenden Schnittstellen und der Iterationsalgorithmen mit Konvergenzkriterien) sowie Beurteilung der Resultate solcher kombinierter Modelle an Fallbeispielen.

Schliesslich sollte mittels Demonstrationsanwendungen die Praxistauglichkeit integrierter dynamischer Gesamtverkehrsmodelle für überlastete Verkehrssysteme in Städten und Agglomerationen vorangetrieben werden, damit die in dieser Studie vorgestellten, auf heuristischen Ansätzen beruhenden, dynamischen und elastischen Umlegungsmethoden durch konsistentere Ansätze ersetzt werden können.

¹ Die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer wird dann erfahrungsgemäss weitgehend durch die Verhältnisse an den Knoten bestimmt.

LITERATUR

- Al-Azzawi M. (1997) An overview of three techniques designed to aid planners with over-assignment and peak-spreading in traffic modelling studies, *Traffic Engineering and Control*, November 1997, 604 - 606
- Axhausen K. W. (2002) Dynamische Umlegung: Idee und Anwendung, Vorlesungsunterlagen Wintersemester 2002
- Beckmann M, McGuire C. B. und Winston C. B. (1956) *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, Connecticut
- Bliemer M.C.J. (2001) Analytical dynamic traffic assignment with interacting user-classes, theoretical advances and applications using a variational inequality approach, Dissertation, Universität Delft, DUP Science, 2600 MG Delft
- Cheng L. et al. (2003) Alternative Quasi-Newton Methods for Capacitated User Equilibrium Assignment, *Transportation Research Record* 1857, 109 - 116
- FGSV (2001) Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS), Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001
- Horowitz A. J. und Beimborn E. A. (1997) Workshops for Advanced Travel Demand Forecasting Course, Federal Highway Administration, Center for Urban Transportation Studies, University of Wisconsin-Milwaukee, June 1997
- Leutzbach W., Haas M., Papavasiliou V. und Schwerdtfeger TH. (1986) Dynamische Umlegung in Verkehrsnetzen, Forschung, *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 469
- Ortúzar J. D. & Willumsen L. G. (2001) *Modelling Transport*, Third Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- Patriksson M. (1994) *The Traffic Assignment Problem, Models and Methods*, Linköping Institute of Technology, Sweden
- Romph, E. (1994) A dynamic traffic assignment model: theory and applications, Dissertation, Universität Delft, Universitätsdruckerei Delft
- Schnabel W. und Lohse D. (1997) *Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*, Band 2, Verlag für Bauwesen, Berlin 1997
- Sheffi Y. (1985) *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 07632
- Sheffi Y. und Powell W. (1981) A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks. *Transportation Research*, 15B, 53 - 64
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board, Washington D.C., 2000
- Van Vliet D. (2002) SATURN 10.2, User Manual, University of Leeds, Januar 2002
- Van Vuren T. und Davis R. (1992) The use of shadow networks in the determination of limits to traffic growth in heavily-congested networks, *Traffic Engineering and Control*, Juli/August 1992, 425 - 428
- Vortisch P. (2003) Stochastische und Dynamische Umlegung, Vortrag beim 13. ptv vision Anwenderseminar, PTV AG Karlsruhe, Sept. 2003

-
- Vrtic M., Axhausen K.W., Bell M.G.H., Grosso S. und Matthews W. (2004) Methoden zum Erstellen und Aktualisieren von Wunschlinienmatrizen im motorisierten Individualverkehr. Forschungsauftrag SVI 2000/379, ETH Zürich, Imperial College London, PTV Swiss Bern
- Vrtic M. (2003) Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell, Dissertation, Sept. 2003
- Vrtic M. und Axhausen K. W. (2003) Experiment mit einem dynamischen Umlegungsverfahren, *Strassenverkehrstechnik*, 3.2003, 121 – 126
- Willumsen L. G. (2000) Travel Networks, in Hensher D. A. & Button K. J. (Hrsg.) *Handbook of Transport Modelling*, Pergamon, 165 – 180
- Wardrop J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Inst. of Civil Engineers, London, 1952
- Yu Nie, Zhang H. M. und Der-Horng Lee (2004) Models and algorithms for the traffic assignment problem with link capacity constraints, *Transportation Research*, 38B, 285 – 312

ANHANG 1
Beispiele von Widerstandsfunktionen

WIDERSTANDSFUNKTIONEN

STRECKEN

In der Literatur wird eine Vielzahl von Widerstandsfunktionen beschrieben, welche Eingang in die verschiedenen Verkehrsmodelle finden. Im Folgenden sind einige bekannte Beispiele aufgeführt. Dabei bedeuten:

- t = Fahrzeit im belasteten Netz zwischen Anfangs- und Endknoten des Links
- t_0 = Fahrzeit zwischen Anfangs- und Endknoten des Links bei freiem Verkehrsfluss (leeres Netz)
- V = Verkehrsbelastung auf dem Link (Fahrzeuge/Stunde)
- C = Kapazität des Links (Fahrzeuge/Stunde)
- α, β = Modellparameter (benutzerdefiniert)
- q = Zuschlag je Fahrzeug
- S_0 = Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss (leeres Netz)
- S_1 = Geschwindigkeit bei Sättigungs-Verkehrsfluss

Davidson: ("harte" Abbildung der Leistungsfähigkeitsgrenze, d.h. bei $V = C \rightarrow t = \infty$)

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \frac{V}{C - V} \right)$$

US Bureau of Public Roads (BPR)-Kurve:

$$t = t_0 \left[1 + \alpha (V / C)^\beta \right]$$

Modifizierte BPR-Kurve mit unterschiedlichem Parameter β für den nicht ausgelasteten und den ausgelasteten Zustand:

$$t = t_0 \left[1 + \alpha (V / C)^{\beta_1} \right] \quad V < C$$

$$t = t_0 \left[1 + \alpha (V / C)^{\beta_2} \right] \quad V \geq C$$

Modifizierte BPR-Kurve, bei der im ausgelasteten Zustand ein zusätzlicher Zuschlag q je Fahrzeug angegeben werden kann:

$$t = t_0 \left[1 + \alpha (V / C)^\beta \right] \quad V < C$$

$$t = t_0 + \alpha (V / C)^\beta + (V - C) * q \quad V \geq C$$

UK Department of Transport (DTp)-Kurve:

$$t(V) = d/S(V)$$

$$S(V) = \begin{cases} S_0 & V \leq F \\ S_1 + (S_1 - S_0) * (V - F) / (C - F) & F < V \leq C \\ S_1 / (1 + S_1 (V - C) / 8dC) & V > C \end{cases}$$

UK COBA 10-Kurve:

$$t(V) = d/S(V)$$

$$S(V) = \begin{cases} S_0 + (S_1 - S_0) * (V / F) & V \leq F \\ S_1 + (S_2 - S_1) (V - F) / (C - F) & F < V \leq C \\ S_2 / (1 + S_2 (V - C) / 8dC) & V > C \end{cases}$$

ANHANG 2
Ergebnisse der Testanwendungen

Inkrementweise Umlegung, ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände

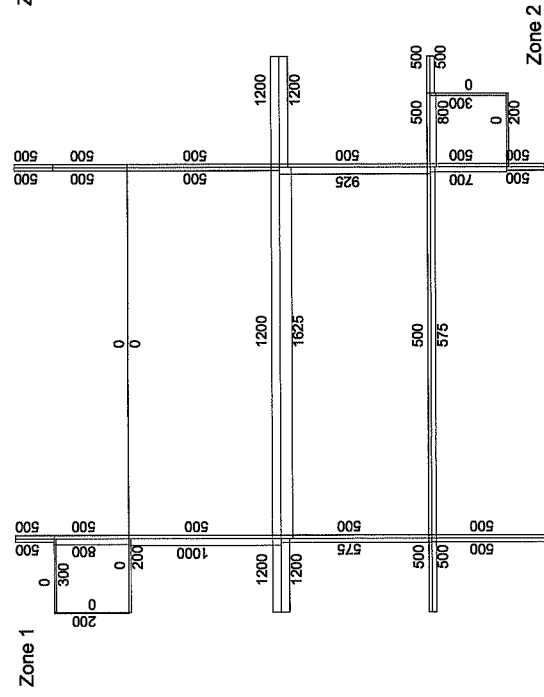


Abbildung 17: Mittlere Belastung

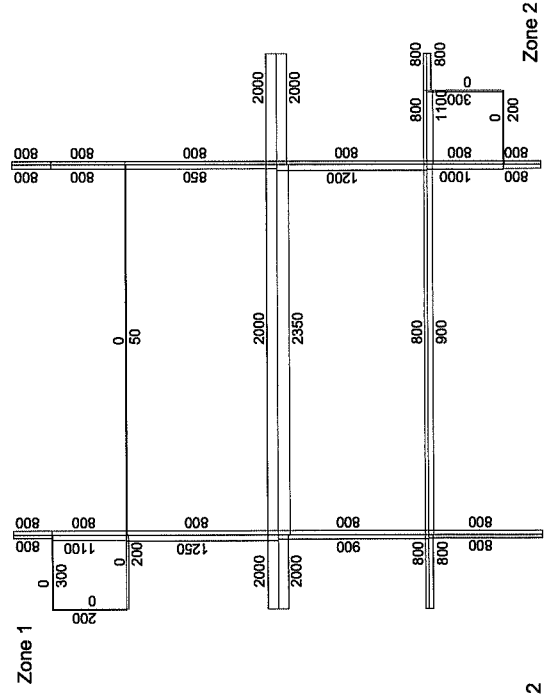


Abbildung 18: Starke Belastung

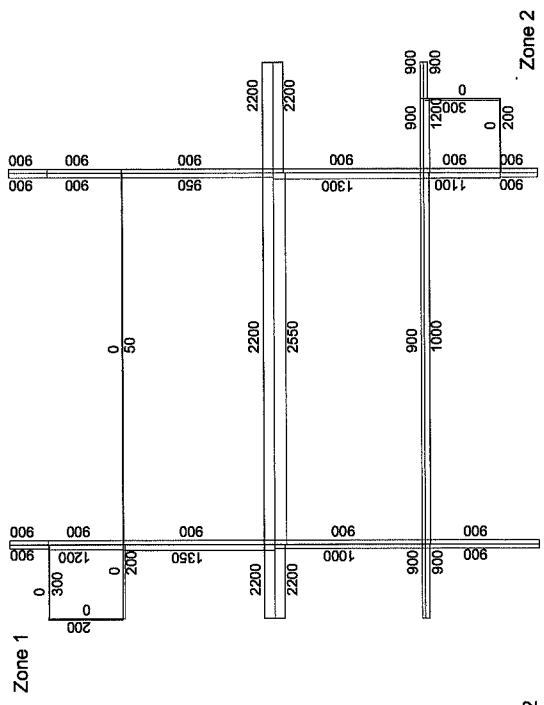


Abbildung 19: sehr starke Belastung

Inkrementweise Umlegung, mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

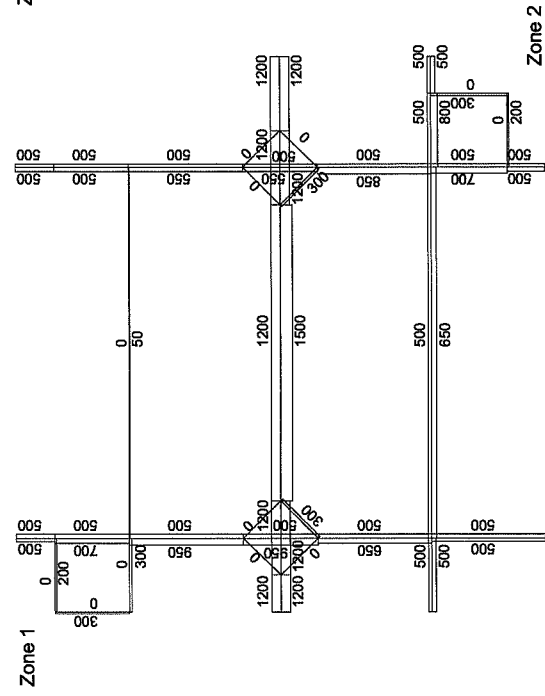


Abbildung 20: Mittlere Belastung

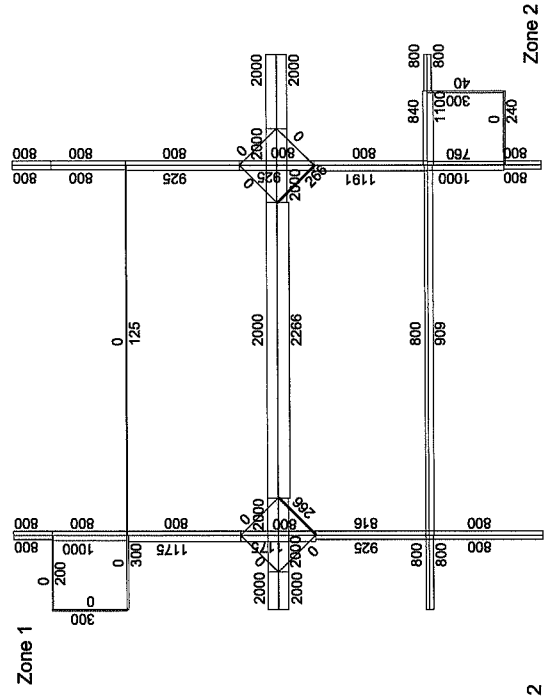


Abbildung 21: Starke Belastung

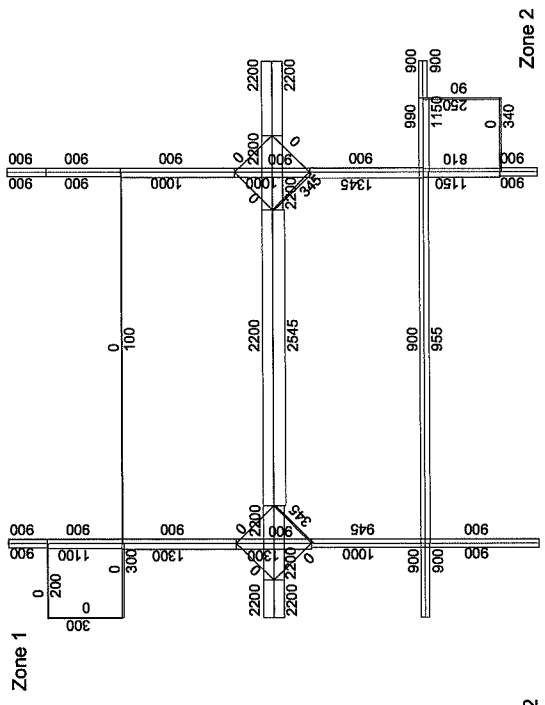


Abbildung 22: sehr starke Belastung

Volume Averaging, ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände

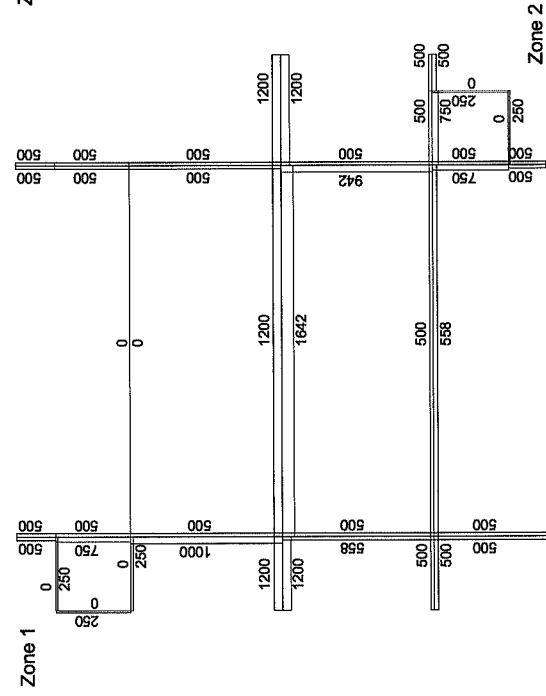


Abbildung 23: Mittlere Belastung

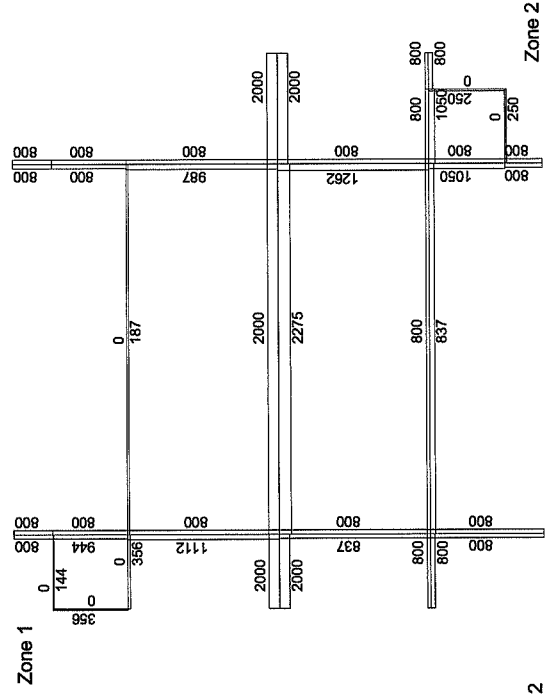


Abbildung 24: Starke Belastung

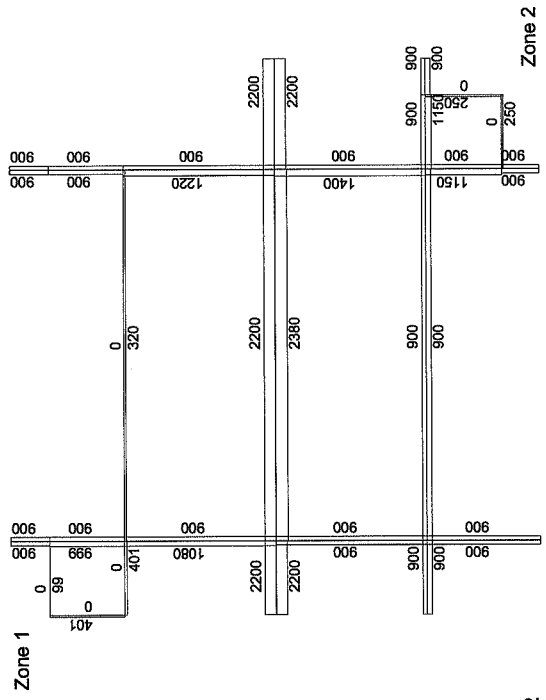


Abbildung 25: sehr starke Belastung

Wardrop-Gleichgewichtsumlegung (UE), ohne Berücksichtigung der Knotenwiderstände

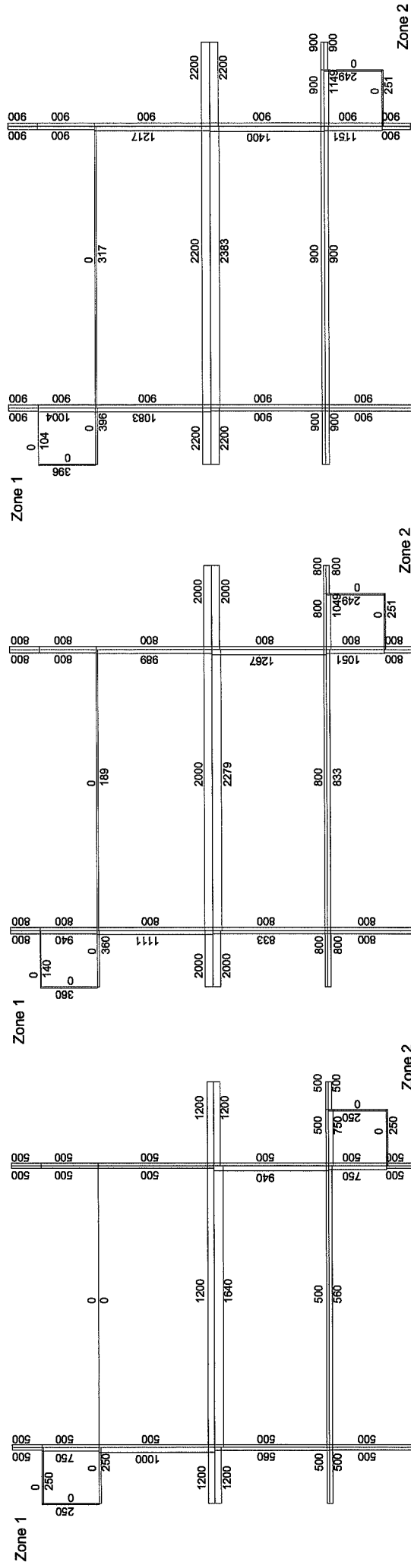


Abbildung 29: Mittlere Belastung

Abbildung 30: Starke Belastung

Abbildung 31: sehr starke Belastung

"Quasi" dynamische Wardrop-Gleichgewichtsumlegung (UE), mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

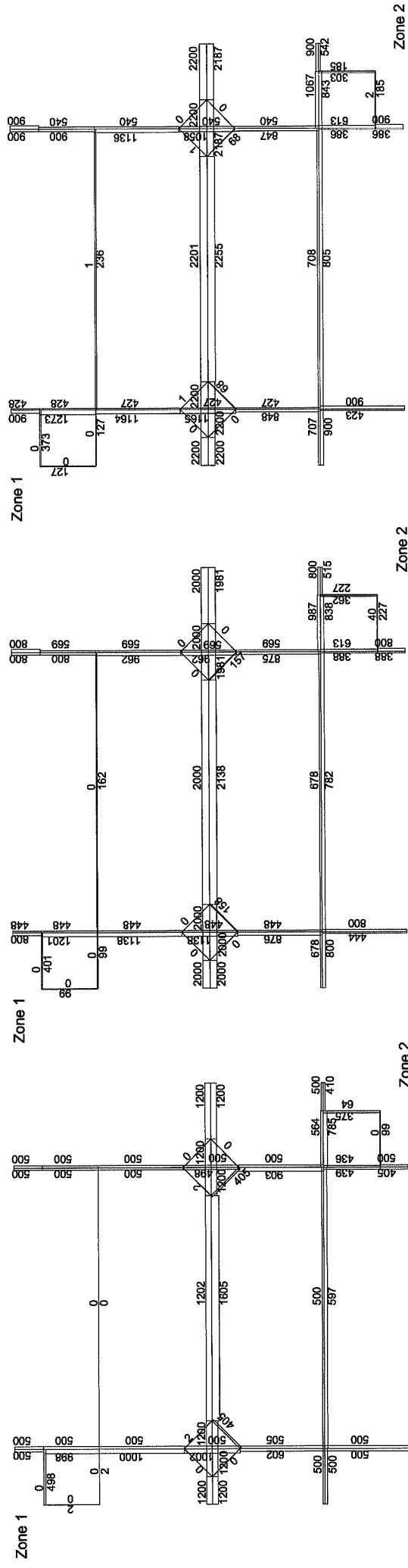


Abbildung 41: Mittlere Belastung

Abbildung 42: Starke Belastung

Abbildung 43: sehr starke Belastung

"Quasi" dynamische stochastische Gleichgewichtsumlegung (SUE), Normalverteilung der wahrgenommenen Kosten, mit Berücksichtigung der Knotenwiderstände

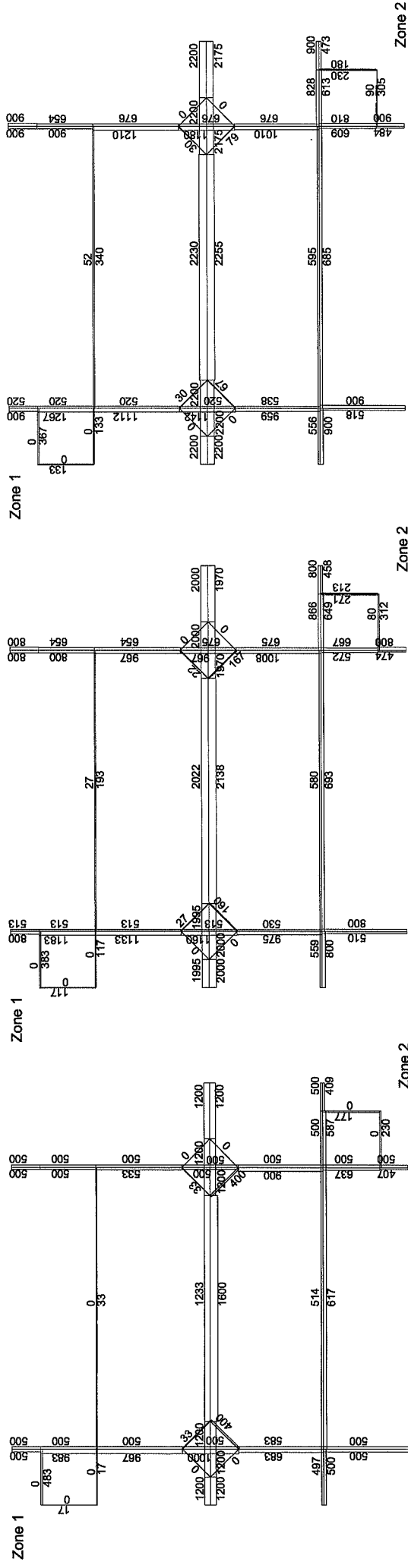


Abbildung 47: Mittlere Belastung

Abbildung 48: Starke Belastung

Abbildung 49: sehr starke Belastung

Forschungsberichte auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure (SVI)
Rapports de recherche sur proposition de l'Association suisse des ingénieurs en transports
(erschienen im Rahmen der Forschungsreihe des UVEK / parus dans le cadre des recherches du DETEC)

- 1980 **Velo- und Mofaverkehr in den Städten**
(*R. Müller*)
- 1980 **Anleitung zur Projektierung einer Lichtsignalanlage**
(*Seiler Niederhauser Zuberbühler*)
- 1981 **Güternahverkehr, Gesetzmässigkeiten**
(*E. Stadtmann*)
- 1981 **Optimale Haltestellenabstände beim öffentlichen Verkehr**
(*Prof. H. Brändli*)
- 1982 **Entwicklung des schweizerischen Strassenverkehrs ***
(*SNZ Ingenieurbüro AG*)
- 1983 **Lichtsignalanlagen mit oder ohne Uebergangssignal Rot-Gelb**
(*Weber Angehrn Meyer*)
- 1983 **Güternahverkehr, Verteilungsmodelle**
(*Emch + Berger AG*)
- 1983 **Parkraumbewirtschaftung als Mittel der Verkehrslenkung ***
(*Glaser + Saxer*)
- 1984 **Le rôle des taxis dans les transports urbains (franz. Ausgabe)**
(*Transitec*)
- 1984 **Park and Ride in Schweizer Städten ***
(*Balzari & Schudel AG*)
- 1986 **Verträglichkeit von Fahrrad, Mofa und Fussgänger auf gemeinsamen Verkehrsflächen ***
(*Weber Angehrn Meyer*)
- 1987 **Verminderung der Umweltbelastungen durch verkehrsorganisatorische und -technische Massnahmen***
(*Metron AG*)
- 1987 **Provisorischer Behelf für die Umweltverträglichkeits-Prüfung von Verkehrsanlagen ***
(*Büro BC, Jenni + Gottardi AG, Scherrer*)
- 1988 **Bestimmungsgrössen der Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr ***
(*Rapp AG*)
- 1988 **EDV-Anwendungen im Verkehrswesen**
(*IVT, ETH Zürich*)
- 1988 **Forschungsvorschläge Umweltverträglichkeitsprüfung von Verkehrsanlagen**
(*Büro BC, Jenni & Gottardi AG, Scherrer*)
- 1989 **Vereinfachte Methode zur raschen Schätzung von Verkehrsbeziehungen ***
(*P. Widmer*)
- 1990 **Planungsverfahren bei Ortsumfahrungen**
(*Toscano-Bernardi-Frey AG*)
- 1990 **Anteil der Fahrzeugkategorien in Abhängigkeit vom Strassentyp**
(*Abay & Meyer*)
- 1991 **Busbuchten, ja oder nein?***
(*Zwicker und Schmid*)
- 1991 **EDV-Anwendung im Verkehrswesen, Katalog 1990**
(*IVT, ETH Zürich*)
- 1991 **Mofa zwischen Velo und Auto**
(*Weber Angehrn Meyer*)
- 1991 **Erhebung zum Güterverkehr**
(*Abay & Meier, Albrecht & Partner AG, Holinger AG, RAPP AG, Sigmoplan AG*)
- 1991 **Mögliche Methoden zur Erstellung einer Gesamtbewertung bei Prüfverfahren***
(*Basler & Partner AG*)
- 1992 **Parkierungsbeschränkungen mit Blauer Zone und Anwohnerparkkarte**
(*Jud AG*)
- 1992 **Einsatzkonzepte und Integrationsprobleme der Elektromobile***
(*U. Schwegler*)
- 1992 **UVP bei Strassenverkehrsanlagen, Anleitung zur Erstellung von UVP-Berichten***
(*Büro BC, Jenni & Gottardi AG, Scherrer*)
erschienen auch als Mitteilungen zur UVP Nr. 7/Mai 1992 des BUWAL
- 1992 **Von Experten zu Beteiligten - Partizipation von Interessierten und Betroffenen beim Entscheiden über Verkehrsvorhaben***
(*J. Dietiker*)

- 1992 **Fehlerrechnung und Sensitivitätsanalyse für Fragen der Luftreinhaltung: Verkehr - Emissionen – Immissionen ***
(INFRAS)
- 1993 **Indikatoren im Fussgängerverkehr ***
(RAPP AG)1993
- 1993 **Velofahren in Fussgängerzonen***
(P. Ott)
- 1993 **Vernetztes bzw. ganzheitliches Denken bei Verkehrsvorhaben**
(Jauslin + Stebler, Rudolf Keller AG)
- 1993 **Untersuchung des Zusammenhanges von Verkehrs- und Wandermobilität**
(synergo, Jenni + Gottardi AG)
- 1993 **Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von flexiblen Nutzungen im Strassenraum**
(Sigmoplan AG)
- 1993 **EIE et infrastructures routières, Guide pour l'établissement de rapports d'impact ***
(Büro BC, Jenni + Gottardi AG, Scherrer)
erschieden als Mitteilungen zur UVP Nr. 7(93) / Juli 1993 des BUWAL/parus comme informations concernant l'étude de l'impact sur l'environnement EIE No. 7(93) / juillet 1993 de l'OFEFP
- 1993 **Handlungsanleitung für die Zweckmässigkeitsprüfung von Verkehrsinfrastrukturprojekten, Vorstudie**
(Jenni + Gottardi AG)
- 1994 **Leistungsfähigkeit beim Fahrstreifenabbau auf Hochleistungsstrassen**
(Rutishauser, Mögerle, Keller)
- 1994 **Perspektiven des Freizeitverkehrs, Teil 1: Determinanten und Entwicklungen***
(R + R Burger AG, Büro Z)
- 1995 **Verkehrsentwicklungen in Europa, Vergleich mit den schweizerischen Verkehrsperspektiven**
(Prognos AG / Rudolf Keller AG)
erschieden als GVF-Auftrag Nr. 267 des GS EVED Dienst für Gesamtverkehrsfragen / paru au SG DFTCE Service d'étude des transports No. 267
- 1996 **Einfluss von Strassenkapazitätsänderungen auf das Verkehrsgeschehen**
(SNZ Ingenieurbüro AG)
- 1997 **Zweckmässigkeitsbeurteilung von Strassenverkehrsanlagen ***
(Jenni + Gottardi AG)
- 1997 **Verkehrsgrundlagen für Umwelt- und Verkehrsuntersuchungen**
(Ernst Basler + Partner AG)
- 1998 **Entwicklungsindices des Schweizerischen Strassenverkehrs ***
(Abay + Meier)
- 1998 **Kennzahlen des Strassengüterverkehrs in Anlehnung an die Gütertransportstatistik 1993**
(Albrecht & Partner AG / Symplan Map AG)
- 1998 **Was Menschen bewegt. Motive und Fahrzwecke der Verkehrsteilnahme**
(J. Dietiker)
- 1998 **Das spezifische Verkehrspotential bei beschränktem Parkplatzangebot ***
(SNZ Ingenieurbüro AG)
- 1998 **La banque de données routières STRADA-DB somme base de modèles de trafic**
(Robert-Grandpierre et Rapp SA / INSER SA / Rosenthaler & Partner AG)
- 1998 **Perspektiven des Freizeitverkehrs. Teil 2: Strategien zur Problemlösung**
(R + R Burger und Partner, Büro Z)
- 1998 **Kombinierte Unter- und Überführung für FussgängerInnen und VelofahrerInnen**
(Büro BC / Pestalozzi & Stäheli)
- 1998 **Kostenwirksamkeit von Umweltschutzmassnahmen**
(INFRAS)
- 1998 **Abgrenzung zwischen Personen- und Güterverkehr**
(Prognos AG)
- 1999 **Gesetzmässigkeiten im Strassengüterverkehr und seine modellmässige Behandlung**
(Abay & Meier / Ernst Basler + Partner AG)
- 1999 **Aktualisierung der Modal Split-Ansätze**
(P. Widmer)
- 1999 **Management du trafic dans les grands ensembles**
(Transportplan SA)
- 1999 **Technology Assessment im Verkehrswesen : Vorstudie**
(RAPP AG Ing. + Planer Zürich)
- 1999 **Verkehrstelematik im Management des Verkehrs in Tourismusgebieten**
(ASIT / IC Infraconsult AG)
- 1999 **„Kernfahrbahnen“ Optimierte Führung des Veloverkehrs an engen Strassenquerschnitten ***
(Metron Verkehrsplanung und Ingenieurbüro AG)
- 2000 **Sensitivitäten von Angebots- und Preisänderungen im Personenverkehr**
(Prognos AG)

- 2000 **Dephi-Umfrage Zukunft des Verkehrs in der Schweiz**
(P. Widmer / IPSO Sozial-, Marketing- und Personalforschung)
- 2000 **Der Wert der Zeit im Güterverkehr**
(Jenni + Gottardi AG)
- 2000 **Floating Car Data in der Verkehrsplanung**
(Rudolf Keller & Partner Verkehrsingenieure AG + Rosenthaler + Partner AG)
- 2000 **Verlässlichkeit als Entscheidungsvariable: Experimente mit verschiedenen Befragungssätzen**
(IVT - ETHZ)
- 2001 **Aktivitätenorientierte Personenverkehrsmodelle, Vorstudie**
(P. Widmer und K.W. Axhausen)
- 2001 **Zeitkostenansätze im Personenverkehr**
(G. Abay und K.W. Axhausen)
- 2001 **Véhicules électriques et nouvelles formes de mobilité**
(Transitec Ingénieurs-Conseils SA)
- 2001 **Besetzungsgrad von Personenwagen: Analyse von Bestimmungsgrößen und Beurteilung von Massnahmen zu dessen Erhöhung**
(RAPP AG Ingenieure + Planer)
- 2001 **Grobkonzept zum Aufbau einer multimodalen Verkehrsdatenbank**
(INFRAS)
- 2001 **Ermittlung der Gesamtleistungsfähigkeit (MIV + OEV) bei lichtsignalgeregelten Knoten**
(büro S-ce Simon-consulting-engineering)
- 2001 **Besteuerung von Autos mit einem Bonus/Malus-System im Kanton Tessin**
(U. Schwegler Büro für Verkehrsplanung)
- 2001 **GIS als Hilfsmittel in der Verkehrsplanung**
(büro widmer)
- 2001 **Umgestaltung von Strassen im Zuge von Erneuerungen**
(Infraconsult AG + Zeltner + Maurer AG)
- 2001 **Piloterhebung zum Dienstleistungsverkehr und zum Gütertransport mit Personenwagen**
(Prognos AG, Emch+Berger AG, IVU Traffic Technologies AG)
- 2002 **Parkplatzbewirtschaftung bei publikumsintensiven Einrichtungen - Auswirkungsanalyse**
(Metron AG, Neosys AG, Hochschule Rapperswil)
- 2002 **Probleme bei der Einführung und Durchsetzung der im Transportwesen geltenden Umweltschutzbestimmungen; unter besonderer Berücksichtigung des Vollzugs beim Strassenverkehrslärm**
(B+S Ingenieur AG)
- 2002 **Nachhaltigkeit und Koexistenz in der Strassenraumplanung**
(Berz Hafner + Partner AG)
- 2002 **Warum steht P. Müller lieber im Stau als im Tram?**
(Planungsbüro Jürg Dietiker / MOVE RAUM P. Regli / Landert Farago Davatz & Partner / Dr. A. Zeyer)
- 2002 **Nachhaltigkeit im Verkehr**
(Jenni + Gottardi AG)
- 2002 **Massnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz längerer Fuss- und Velostrecken**
(Arbeitsgemeinschaft Büro für Mobilität / V. Häberli / A. Blumenstein / M. Wälti)
- 2002 **Carreiseverkehr: Grundlagen und Perspektiven**
(B+S Ingenieur AG / Gare Routière de Genève)
- 2002 **Potentielle Gefahrenstellen**
(Basler & Hofmann / Psychologisches Institut der Universität Zürich)
- 2003 **Evaluation kurzfristiger Benzinpreiserhöhungen**
(Infras / M. Peter / N. Schmidt / M. Maibach)
- 2002 **Verlässlichkeit als Entscheidungsvariable, Vorstudie**
(ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT)
- 2002 **Mischverkehr MIV / ÖV auf stark befahrenen Strassen**
(Verkehrsingenieurbüro TEAMverkehr)
- 2003 **Vorstudie zu den Wechselwirkungen Individualverkehr – öffentlicher Verkehr infolge von Verkehrstelematik-Systemen**
(Abay & Meier, Zürich)
- 2003 **Strassen mit Gemischtverkehr: Anforderungen aus der Sicht der Zweiradfahrer**
(WAM Partner, Planer und Ingenieure, Solothurn)
- 2003 **Erfolgskontrolle von Umweltschutzmassnahmen bei Verkehrsvorhaben**
(Metron Landschaft AG, Brugg / Quadra GmbH, Zürich / Metron Verkehrsplanung AG, Brugg)
- 2004 **Perspektiven für kurze Autos**
(Ingenieur- und Planungsbüro Bühlmann, Zollikon)
- 2005 **Lange Planungsprozesse im Verkehr**
(BINARIO TRE, Windisch)
- 2004 **Auswirkungen von Personal Travel Assistance (PTA) auf das Verkehrsverhalten**
(Ernst Basler und Partner AG, Zürich)

- 2004 **Methoden zum Erstellen und Aktualisieren von Wunschlinienmatrizen im motorisierten Individualverkehr**
(ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT)
- 2004 **Zeitkostenansätze im Personenverkehr**
(ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT / Rapp Trans AG, Zürich)
- 2004 **Determinanten des Freizeitverkehrs: Modellierung und empirische Befunde**
(ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT)
- 2004 **Verfahren von Technology Assessment im Verkehrswesen**
(Rapp Trans AG, Zürich / IKAÖ, Bern / Interface, Luzern)

** vergriffen: Diese Exemplare können auf Wunsch nachkopiert werden*
**épuisé: Selon désir, ces rapports peuvent être copiés*

Die Berichte können bezogen werden bei / Les rapports peuvent être commandés au:
VSS, Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich,
Tel. 01 269 40 20, Fax. 01 / 252 31 30, info@vss.ch

