

Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen?

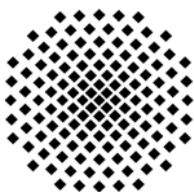
Autoren / Authors:

Markus Friedrich

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart
markus.friedrich@isv.uni-stuttgart.de

Veröffentlicht in / Published in:

Friedrich, M. (2011): Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen? *Tagungsbericht Heureka 11*, FGSV Verlag, Köln.



Universität Stuttgart
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik
www.uni-stuttgart.de/isv/vuv/

Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen?

Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Lehrstuhl Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 7, D-70569 Stuttgart, Tel. +49-711-68582480, Fax. +49-711-68572480, E-Mail: markus.friedrich@isv.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Verkehrsnachfragemodelle sind ein wichtiges Werkzeug der Verkehrsplanung und dienen der Vorbereitung verkehrspolitischer Entscheidungen. Sie sollen die Wirklichkeit sowohl quantitativ als auch von den Abläufen und Wirkungszusammenhängen her realitätsnah abbilden. Der Beitrag erläutert, was ein Verkehrsnachfragemodell ist und welche Einflussgrößen die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells bestimmen. Es werden allgemeine Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle formuliert und dargestellt, welche Entscheidungen bei der Modellbildung getroffen werden müssen.

1 Einleitung

Verkehringenieure haben die Aufgabe, bestehende Zustände zu untersuchen und die Wirkungen von Maßnahmen zu ermitteln. Zur Lösung dieser Aufgabe stehen grundsätzlich die empirische Erhebung und die modellbasierte Berechnung zur Verfügung. Erhebungen versprechen auf den ersten Blick die besten Daten zur Beschreibung des bestehenden Zustandes. Bedenkt man jedoch, dass viele Daten nicht direkt oder nur sehr aufwändig über Befragungen, Beobachtungen oder Messungen erfasst werden können, dann erkennt man das ergänzende Modellrechnungen unumgänglich sind. Zudem können mit Erhebungen nur Daten für den Ist-Zustand und nicht für zukünftige Zustände ermittelt werden. Um diese Einschränkungen zu überwinden, bildet man Modelle, die die Wirklichkeit beschreiben. Verkehrsmodelle stellen wie alle Modelle eine zweckbezogene Abstraktion der realen Welt dar. Ziel der Modellierung ist die modellgestützte Vorbereitung von Entscheidungen, die in der realen Welt getroffen werden.

Im Verkehrswesen kommt eine Vielzahl von Modellen zum Einsatz. Zentrale Modelle sind Verkehrsnachfragemodelle und Verkehrsflussmodelle:

- *Verkehrsnachfragemodelle* bilden die Entscheidungen Aktivitätenwahl, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl, Abfahrtszeitwahl und Routenwahl im Personenverkehr nach.
- *Verkehrsflussmodelle* bilden die Geschwindigkeitswahl, die Fahrstreifenwahl und das Abstandswahlverhalten im Straßenverkehr nach.

Da die Modelle von Verkehringenieuren für die Planung des Verkehrsangebots und von politischen Institutionen für die Entscheidungsfindung eingesetzt werden, müssen die Modellergebnisse gewissen Ansprüchen genügen. Das Modell muss den Ist-Zustand und zukünftige Zustände sowohl quantitativ als auch von den Wirkungszusammenhängen realitätsnah abbilden. In diesem Beitrag werden Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle

formuliert und es wird dargestellt, welche Einflussgrößen die Qualität eines makroskopischen Verkehrsnachfragemodells bestimmen.

2 Verkehrsnachfragemodelle

Ein Verkehrsnachfragemodell ist ein Modell, das alle relevanten Entscheidungsprozesse der Menschen nachbildet, die zu Ortsveränderungen führen. Im Personenverkehr umfassen diese Entscheidungen die Aktivitätenwahl, die Zielwahl, die Verkehrsmittelwahl, die Abfahrtszeitwahl und die Routenwahl. In Tabelle 1 sind personenbezogene und externe Einflussfaktoren dieser Entscheidungen dargestellt, die in die Modellierung einbezogen werden müssen.

Art der Entscheidung	Personenbezogene Einflussfaktoren	Externe Einflussfaktoren
Aktivitätenwahl	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensphase (Alter, Berufstätigkeit) • Haushaltsstruktur • durchzuführende Aktivitäten 	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilung der Nutzungen (Aktivitätenorte) im Raum • Attraktivität der Aktivitätenorte • Erreichbarkeit der Aktivitätenorte
Zielwahl	<ul style="list-style-type: none"> • Zweck der Aktivität • Kenntnis über mögliche Aktivitätenorte und ihrer Eigenschaften • Pkw-Verfügbarkeit • Führerscheinbesitz • Zahlungsbereitschaft und Präferenzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilung der Nutzungen (Aktivitätenorte) im Raum • Attraktivität der Aktivitätenorte • Erreichbarkeit der Aktivitätenorte
Verkehrsmittelwahl	<ul style="list-style-type: none"> • Zweck der Aktivität • Pkw-Verfügbarkeit • Führerscheinbesitz • Zeitpunkt der Fahrt • Kenntnis über mögliche Verkehrsmittel und ihrer Eigenschaften • Zahlungsbereitschaft und Präferenzen 	<ul style="list-style-type: none"> • verfügbare Verkehrsmittel • Parkplatzverfügbarkeit am Zielort • Eigenschaften der Verkehrsmittel (Reisezeit, Kosten, Umsteighäufigkeit, Komfort, Sicherheit, etc.)
Abfahrtszeitwahl	<ul style="list-style-type: none"> • gewünschte Ankunftszeit • Kenntnis über die zeitabhängigen Eigenschaften einer Ortsveränderung • zeitliche Flexibilität 	<ul style="list-style-type: none"> • zeitabhängige Reisezeit • zeitabhängige Kosten
Routenwahl	<ul style="list-style-type: none"> • Kenntnis über mögliche Routen und ihrer Eigenschaften • Zahlungsbereitschaft und Präferenzen 	<ul style="list-style-type: none"> • verfügbare Routen • Eigenschaften der Routen (Reisezeit, Kosten, Umsteighäufigkeit, etc.) • Verfügbarkeit von Informationssystemen über die aktuellen Eigenschaften der Routen

Tabelle 1: Mobilitätsrelevante Entscheidungen, die in einem Verkehrsnachfragemodell abgebildet werden und zugehörige Einflussfaktoren

Ein Verkehrsnachfragemodell ist Teil eines umfassenderen Verkehrsplanungsmodells. Im engeren Sinne entspricht das Verkehrsnachfragemodell dem in Bild 1 dargestellten *Wirkungsmodell Ortsveränderungen*. Im weiteren Sinne sind auch die Datenmodelle Bestandteil des Verkehrsnachfragemodells. Bild 1 zeigt die Teilmodelle eines Verkehrsplanungsmodells:

- Das *Datenmodell Mobilitätsverhalten* umfasst alle Daten, die das Mobilitätsverhalten der Bevölkerung beschreiben. Sie stammen in der Regel aus Haushaltsbefragungen (Welche Personengruppe fährt wie häufig, zu welchem Zweck, mit welchem Verkehrsmittel?).
- Das *Datenmodell Verkehrsangebot*, oft als Netzmodell bezeichnet, enthält die Daten des Verkehrsangebotes einschließlich der Kosten für die Benutzung des Verkehrsangebots. Es besteht u.a. aus Knoten bzw. Haltestellen, den Strecken des Straßen- und Schienennetzes und aus den ÖV-Linien mit ihren Fahrplänen. Aber auch Steuerungseinrichtungen wie Lichtsignalanlagen oder Fahrzeuge mit ihren spezifischen Eigenschaften (Kapazität, Kraftstoffverbrauch) können Bestandteil des Verkehrsangebots sein.
- Das *Datenmodell Siedlungsstruktur* umfasst alle Daten, die die Zahl und die Verteilung der Nutzungen (Wohnungen, Arbeitsplätze, Schulen, Einkaufsgelegenheiten, Freizeitmöglichkeiten) beschreiben. Diese Daten können in Form von Gebäudedaten oder in der Form von Verkehrszellen vorliegen.
- Das *Wirkungsmodell Ortsveränderungen* ermittelt aus den Strukturdaten, den Verhaltensdaten und aus den Daten des Verkehrsangebots die Ortsveränderungen für Personengruppen oder einzelne Personen. Es bildet dazu die mobilitäts- bzw. verkehrsrelevanten Entscheidungsprozesse der Menschen nach.
- Das *Wirkungsmodell Verkehrsauswirkungen* ermittelt die Wirkungen, die sich direkt als Folge der Ortsveränderungen ergeben oder die indirekt dadurch entstehen, dass das Verkehrsangebot in Form von Verkehrswegen oder Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden muss.
- Die Ergebnisse der Wirkungsmodelle sind die Eingangsdaten für die *Bewertungsmodelle*. Die Bewertungsmodelle bewerten zum einen die Qualität des Verkehrsangebots aus Sicht der Nutzer. Zum anderen bewerten sie die Auswirkungen des Verkehrs auf die Betreiber des Verkehrsangebots, auf die Gesellschaft, die Wirtschaft und die Umwelt.

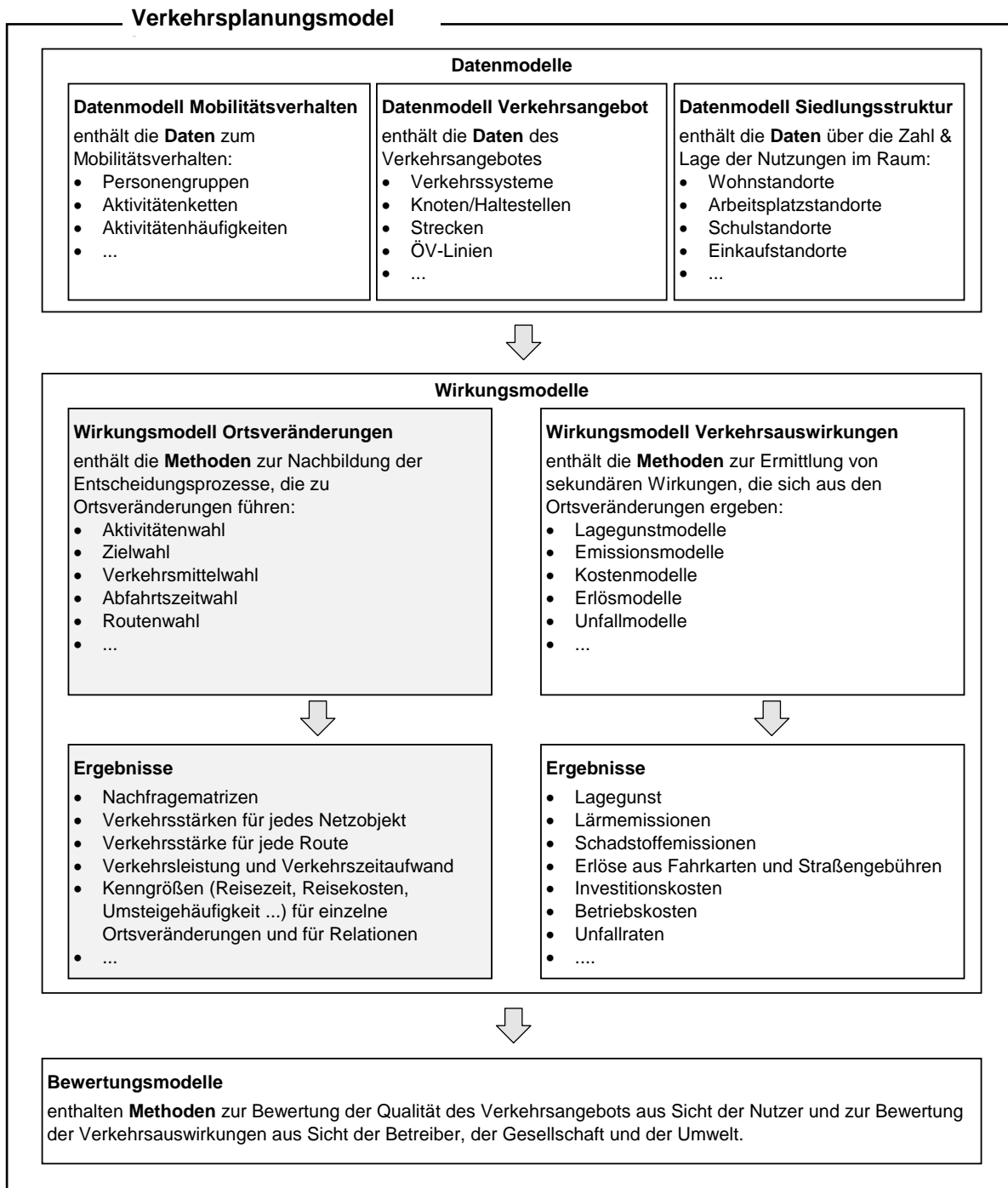


Bild 1: Das Verkehrsnachfragemodell im Personenverkehr ist als *Wirkungsmodell Ortsveränderungen* (grau dargestellt) Bestandteil eines Verkehrsplanungsmodells

Bild 2 zeigt die formalen Berechnungsvorschriften eines einfachen Nachfragemodells¹ mit vier Stufen. Es soll das Zusammenspiel zwischen den Modellparametern (in griechischen Buchstaben dargestellt) und den Modellvariablen veranschaulichen.

¹ Das dargestellte Nachfragemodell basiert für die Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl auf Entscheidungsmodellen vom Typ Logit. Die Widerstandsermittlung ist beispielhaft für den motorisierten Straßenverkehr dargestellt. Sie erfolgt mit einer Capacity Restraint Funktion. Der Widerstand umfasst im dargestellten Modell nur den Zeitaufwand.

<p>Verkehrserzeugung</p> <ul style="list-style-type: none"> • von der Gruppe g in Zelle i erzeugte Ortsveränderungen P • von der Gruppe g in Zelle j angezogene Ortsveränderungen A 	$P_{g,i} = \sum_{k=1}^K \mu_{g,k} \cdot Z_{i,k}$ $A_{g,j} = \sum_{k=1}^K \eta_{g,k} \cdot Z_{j,k}$
<p>Zielwahl</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zahl der Ortsveränderungen in Gruppe g von der Quellzelle i in die Zielzelle j 	$F_{g,i,j} = P_{g,i} \frac{A_{g,j} \cdot \exp(\alpha_g \cdot w_{i,j})}{\sum_{j=1}^J A_{g,z} \cdot \exp(\alpha_g \cdot w_{i,j})}$
<p>Verkehrsmittelwahl</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zahl der Ortsveränderungen in Gruppe g von der Quellzelle i in die Zielzelle j mit dem Verkehrsmittel m 	$F_{g,i,j,m} = F_{g,i,j} \cdot \frac{\exp(\beta_g + \gamma_g \cdot w_{i,j,m})}{\sum_{m=1}^M \exp(\beta_g + \gamma_g \cdot w_{i,j,m})}$
<p>Routenwahl</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zahl der Ortsveränderungen in Gruppe g von der Quellzelle i in die Zielzelle j mit dem Verkehrsmittel m auf der Route r 	$F_{g,i,j,m,r} = F_{g,i,j,m} \cdot \frac{\exp(\delta_g \cdot w_{i,j,m,r})}{\sum_{r=1}^R \exp(\delta_g \cdot w_{i,j,m,r})}$
<p>Verkehrsstärke</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsstärke auf der Strecke s 	$q_s = \sum_g \sum_i \sum_j \sum_m \sum_r \sum_{s \in r} F_{g,i,j,m,r}$
<p>Widerstand einer Strecke</p> <ul style="list-style-type: none"> • Widerstand auf der Strecke s 	$w_s = t_{0,s} \cdot \left(1 + \lambda \cdot \left(q_s / q_{\max,s}\right)^\varphi\right)$
<p>Widerstand einer Route</p> <ul style="list-style-type: none"> • Widerstand zwischen Zelle i und Zelle j mit Verkehrsmittel m auf der r. Route aller Routen R, die zwischen i und j existieren 	$w_{i,j,m,r} = \sum_{s=1}^S w_s \quad \forall s \in R_{i,j,m,r}$
<p>Parameter Mobilitätsverhalten</p> <p>G</p> <p>$\mu_{g,k}, \eta_{g,k}$</p> <p>$\alpha_g, \beta_g, \gamma_g, \delta_g$</p>	<p>Anzahl der Nachfragesegmente (g = 1 ... G)</p> <p>Erzeugungs- bzw. Anziehungsrate in der Gruppe g für die k. Strukturgröße</p> <p>Widerstandsparameter der Gruppe g bei der Ziel-, Verkehrsmittel- und der Routenwahl</p>
<p>Parameter Verkehrsangebot</p> <p>λ, φ</p>	<p>Parameter der Capacity Restraint Funktion im mIV</p>
<p>Parameter Siedlungsstruktur</p> <p>J</p>	<p>Anzahl Verkehrszellen (j = 1 ... J)</p>
<p>Variablen Verkehrsangebot</p> <p>M</p> <p>S</p> <p>$q_{\max,s}$</p> <p>$t_{0,s}$</p>	<p>Anzahl Verkehrsmittel (m= 1 ... M)</p> <p>Anzahl der Strecken (Netzelemente) (s = 1 ... S)</p> <p>Kapazität der Strecke s</p> <p>Fahrzeit auf Strecke s im unbelasteten Zustand</p>
<p>Variablen Siedlungsstruktur</p> <p>$Z_{i,k}$</p>	<p>k. Strukturgröße in der Verkehrszelle i</p>

Bild 2: Parameter und Variablen eines einfachen Verkehrsnachfragemodells

2.1 Modellparameter

Einige Modellparameter, insbesondere die Zahl der Verkehrszellen J werden bei der Modellbildung festgelegt. Alle anderen Modellparameter ergeben sich aus der Modellkalibrierung, d.h. es ist Aufgabe des Modellerstellers, die Parameter zu ermitteln:

- Zahl der Nachfragesegmente G : Ein Nachfragesegment g beschreibt einen Teil der Nachfrage mit vergleichbarem Verhalten bei den Wahlentscheidungen. Typische Nachfragesegmente sind Fahrtzwecke, ggf. differenziert nach Personengruppen. Mit Clusteranalysen kann man die Nachfrage in geeignete Gruppen unterteilen. Häufig werden aber auch Personengruppen oder Fahrtzwecke aus anderen Untersuchungen oder aus der Literatur übernommen (siehe zum Beispiel LOHSE [7], Seite 162 ff).
- Erzeugungs- und Anziehungsraten: Die Erzeugungs- und Anziehungsraten bestimmen das Verkehrsaufkommen im Modellgebiet. Datenquelle sind Wegetagebücher einer Haushaltsbefragung.
- Widerstandsparameter Zielwahl: Dieser Parameter bestimmt die Reiseweite. Er ergibt sich aus einem Vergleich der mit Wegetagebüchern ermittelten Reiseweitenverteilungen mit den modellierten Reiseweitenverteilungen.
- Widerstandsparameter Verkehrsmittelwahl: Diese Parameter beeinflussen den Modal-Split. Sie können aus den mit Wegetagebüchern beobachteten Verkehrsmittelwahlentscheidungen mit einer Maximum-Likelihood Schätzung (siehe hierfür zum Beispiel TRAIN [9], Seite 60 ff) abgeleitet werden.
- Widerstandsparameter Routenwahl: Dieser Parameter bestimmt die Verteilung der Nachfrage auf die verfügbaren Routen. Im Wesentlichen geht es bei der Parameterermittlung darum, in welchem Umfang der Widerstand außer von der Fahrzeit von weiteren Komponenten beeinflusst wird. Im Kfz-Verkehr sind das u.a. Länge, Steigung, Straßenklasse oder Straßenbenutzungsgebühren. Im ÖV geht es um die Komponenten Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit, Verkehrsmittel und Fahrpreis. Beobachtungen der Routenwahl stehen zumindest im Straßenverkehr bis heute kaum zur Verfügung. Die Parameter der Routenwahl können deshalb in der Regel nicht mit statistischen Verfahren geschätzt werden. Sie werden aus diesem Grunde häufig ausgehend von Erfahrungswerten so angepasst, dass gemessene und modellierte Verkehrsstärken möglichst gut übereinstimmen.
- Parameter der Capacity Restraint Funktion: Diese Parameter definieren den Zusammenhang zwischen der Auslastung und der auslastungsbedingten Verlustzeit im Straßenverkehr. Sie können aus verkehrstechnischen Überlegungen (z.B. durch einen Vergleich mit dem HBS [6]) oder aus Fahrzeitmessungen auf Netzabschnitten in der Schwachverkehrszeit und in der Hauptverkehrszeit abgeleitet werden.

2.2 Modellvariablen

Modellvariablen umfassen die Eingangsgrößen, die sich aufgrund geplanter Maßnahmen (z.B. eine neue Straße, ein neues Siedlungsgebiet, Straßenbenutzungsgebühren) oder aufgrund externer Entwicklungen (z.B. Preissteigerungen, Bevölkerungsentwicklung) verändern:

- Variablen des Verkehrsangebots: Wesentliche Variablen des Verkehrsangebots sind die Netzelemente mit ihren jeweiligen Eigenschaften (Fahrzeit, Kapazität, Nutzungskosten). Sie beeinflussen die Widerstände für Ortsveränderungen und damit die Verkehrsnachfrage.
- Variablen der Siedlungsstruktur: Wesentliche Variablen der Siedlungsstruktur sind die Einwohner und die sonstigen Nutzungen, die den Einwohnern als Aktivitätenorte dienen. Bei den Einwohnern ist die Anzahl und der Wohnort von Bedeutung. Um die Einwohner einer Personengruppe zuordnen zu können, sind außerdem das Alter und soziodemografische Eigenschaften wichtig.

Die Variablen des Ist-Zustands müssen auf geeignete Weise erfasst werden. Bei geplanten Maßnahmen sind die Variablen für zukünftige Zustände das Ergebnis des Planungsprozesses. Änderungen bei den Variablen, die sich aus externen Entwicklungen ergeben, müssen prognostiziert werden.

2.3 Modellbildung

Modelle werden zu einem bestimmten Zweck erstellt. Ein wesentlicher Bestandteil der Modellbildung ist die Abstraktion. Dabei wird das abzubildende System auf die für eine Verkehrsuntersuchung wesentlichen Eigenschaften reduziert. Die Aufgabe der Modellbildung besteht darin, die modelltechnischen und die fachlichen Anforderungen an das Modell festzulegen. Für die Nachfragemodellierung müssen u.a. die folgenden Entscheidungen getroffen werden:

- Räumliche Segmentierung: Die räumliche Segmentierung legt die Zahl der Verkehrszellen und den Detailierungsgrad des Verkehrsnetzes fest. Dazu gehören u.a. Entscheidungen, ob und wie Abbiegerwiderstände an Knotenpunkten modelliert werden.
- Zeitliche Segmentierung: Die zeitliche Segmentierung bestimmt den Zeitraum, für den die Nachfrage modelliert wird. Unter der Annahme, dass der Großteil der Einwohner die Nacht am Wohnort verbringt, ist bei der Verkehrsnachfragemodellierung eine Ganztagesbetrachtung sinnvoll. Um die Dynamik der Verkehrsnachfrage innerhalb eines Tages zu abbilden, ist eine zusätzliche Segmentierung in feinere Zeitscheiben erforderlich. Die Segmentierung kann kontinuierlich, z.B. für jede Stunde des Tages oder für ausgewählte Zeiträume, z.B. die Spitzenstunde erfolgen.
- Verhaltensannahmen: Mit den Verhaltensannahmen werden in einem Nachfragemodell grundlegende Annahmen zum mobilitätsrelevanten Verhalten der Menschen unterstellt. Welche Entscheidungen sollen modelliert werden? Werden die Entscheidungen der Zielwahl und der Verkehrsmittelwahl sequentiell oder simultan getroffen? Genügt es einzelne Wege zu modellieren oder liefert die Kenntnis ganzer Wegeketten realistischere Ergebnisse? Ist es notwendig Abstimmungsprozesse innerhalb eines Haushalts zu modellieren? Stehen die einzelnen Aktivitäten gleichberechtigt nebeneinander oder werden zuerst die Pflichtaktivitäten (Arbeiten, Ausbildung) geplant und dann die sonstigen Aktivitäten (Einkaufen, Freizeit) einbezogen? Haben die Verkehrsteilnehmer vollständige oder unvollständige Informationen über die verfügbaren Alternativen?

- Wahl der Funktionsform: Für die in einem Nachfragemodell verwendeten Entscheidungsmodelle und Capacity Restraint Funktionen stehen unterschiedliche Funktionstypen zur Verfügung.

3 Anforderungen an Nachfragemodelle

Verkehrsnachfragemodelle dienen in vielen Fällen der Vorbereitung verkehrstechnischer oder verkehrspolitischer Entscheidungen. Die Anforderungen an Nachfragemodelle kommen deshalb nicht von den Modellerstellern, sondern von Verkehrsingenieuren oder politischen Entscheidern. Aufgrund mangelnder Hintergrundkenntnisse werden in der Praxis oft keine konkreten Anforderungen vor der Modellerstellung formuliert. Nachträgliche Fragestellungen stellen häufig unrealistische Anforderungen. Gleichzeitig fehlen klare Vorgaben oder Empfehlungen, wie die Aussagegenauigkeit der Modellergebnisse überprüft werden können.

3.1 Anforderungen an die Einsatzbereiche

Verkehrsnachfragemodelle werden eingesetzt, um vorhandene Zustände in einem Verkehrsnetz zu rekonstruieren und die Wirkungen zukünftiger Entwicklungen (z.B. Bevölkerung oder Preise) und geplanter verkehrlicher Maßnahmen abzuschätzen. Bild 3 zeigt typische Maßnahmen und Entwicklungen, deren Wirkungen mit Verkehrsnachfragemodellen nachgebildet werden. Um die Wirkungen zu quantifizieren und zu bewerten, werden Kenngrößen berechnet. Typische Kenngrößen sind in Tabelle 2 dargestellt. Sie werden von Verkehrsingenieuren und Politikern für eine große Bandbreite von Einsatzbereichen benötigt. Aus den Einsatzbereichen ergeben sich dann Anforderungen an die Modellbildung und damit auch an den Aufwand für die Modellerstellung. Hier einige Beispiele für Anforderungen, die aus speziellen Fragestellungen bzw. Einsatzbereichen resultieren:

- Ein Verkehrsnachfragemodell, das die Wirkungen von Straßenbenutzungsgebühren oder Kraftstoffpreisen abbilden soll, benötigt ein Teilmodell zur Kostenermittlung und eine Nutzenfunktion mit einer Preiskomponente.
- Sollen die Zugangswege im ÖV durch eine Haltestellenplanung optimiert werden, muss das Modell ein Fußwegenetz enthalten. Die Verkehrszellen dürfen dann nicht an die Haltestellen, sondern müssen an das Fußwegenetz angebunden werden.
- Sind Aussagen zur stündlichen Verkehrsstärke für einzelne Tageszeiten gefordert, dann müssen mit Hilfe von fahrtzweckspezifischen Ganglinien die Abfahrtszeiten einzelner Wege bestimmt werden. Soll zusätzlich ein Peak-Spreading nachgebildet werden, dann muss die Abfahrtszeitwahl modelliert werden.
- Aussagen zur Verkehrsstärke auf einzelnen Abbiegern sind mit Verkehrsnachfragemodellen nur eingeschränkt möglich. Sollen solche Aussagen gemacht werden, müssen auf alle Fälle die Knotenpunktwidestände detailliert modelliert und eine feine Verkehrszelleneinteilung gewählt werden.

Die Beispiele zeigen, dass Anforderungen an die Einsatzbereiche bereits bei der Modellbildung berücksichtigt werden müssen. Bei einer Vergabe eines Verkehrsnachfragemodells sollten die Auftraggeber deshalb ihre Anforderungen bereits in den Ausschreibungen formulieren und die Auftragnehmer klar definierte Anforderungen einfordern.

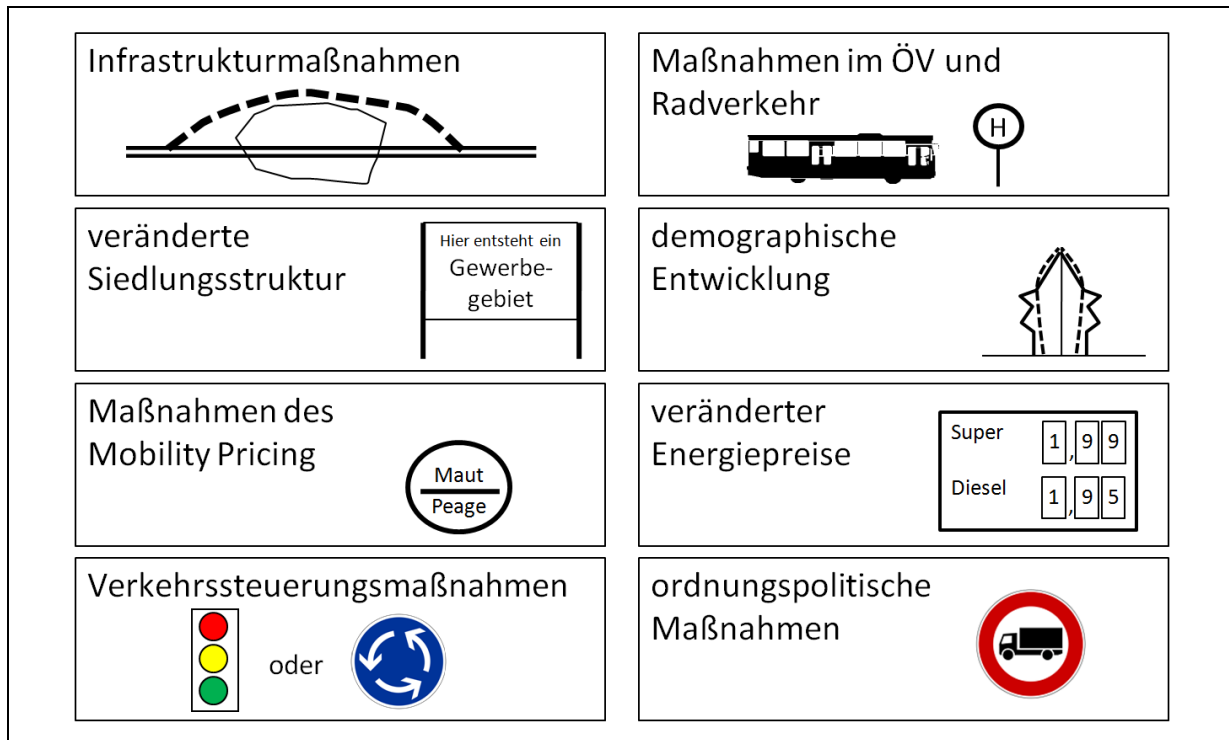


Bild 3: Typische Maßnahmen und Entwicklungen, deren Wirkungen mit Verkehrsnachfragemodellen ermittelt werden

Kenngröße	Einsatzbereich
Verkehrsstärke (DTVw) auf Straßen	Straßenplanung
Verkehrsstärke auf ÖV-Linien	ÖV-Planung
Reisezeiten Pkw	Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen
relationsfeine Kenngrößen Pkw und ÖV	Standardisierte Bewertung Nachfrageberechnung
Modal Split	Verkehrsplanung
Verkehrsstärke in der HVZ auf Abbiegern	verkehrstechnische Bemessung
Verkehrsstärke in der HVZ auf ÖV-Linien	Dimensionierung Platzangebot
Verkehrsstärke differenziert nach Pkw, Lkw < 7,5t, Lkw < 12t, Lkw > 12t	Planung von Durchfahrtsverboten

Tabelle 2: Typische Kenngrößen zur Quantifizierung von Wirkungen, die von Verkehrsingenieuren für verschiedene Einsatzbereiche in der strategischen und technischen Verkehrsplanung benötigt werden

3.2 Anforderungen an die Konsistenz

Ein Modell ist dann konsistent, wenn es die Wirklichkeit sowohl quantitativ als auch von den Abläufen und Wirkungszusammenhängen realitätsnah abbildet. Bei der Überprüfung der quantitativen Aussagegenauigkeit werden in der Realität erfasste Werte mit berechneten Modellwerten verglichen. Für die quantitative Überprüfung können bei der Verkehrsnachfragemodellierung folgende Werte verglichen werden:

- berechnete mittlere Wegezahl je Personengruppe mit den Werten aus einer Haushaltsbefragung,
- berechnete Reiseweiten- oder Reisezeitverteilung der Verkehrsverteilung mit Reiseweiten- oder Reisezeitverteilung, die aus Befragungen abgeleitet werden,
- berechnete Mittelwerte des Modal-Split der Verkehrsmittelwahl mit mittleren Modal-Split Anteilen aus Befragungen,
- berechnete Fahrzeiten mit gemessenen Fahrzeiten für ausgewählte Netzabschnitte,
- berechnete Verkehrsstärken der Umlegung mit gezählten Verkehrsstärken an ausgewählten Zählstellen oder an Screenlines. Eine Screenline umfasst eine Menge von Strecken, die durch eine Polygonlinie definiert werden. Alle Strecken, die durch die Polygonlinie geschnitten werden, gehören zur Screenline. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer Screenline werden zu einer Screenline-Verkehrsstärke aufsummiert.

In der Modellierungspraxis steht meist der Vergleich der Verkehrsstärken an ausgewählten Querschnitten im Vordergrund. Das erklärt sich wohl zum einen aus der Tatsache, dass Verkehrsstärken vergleichsweise einfach zu erheben sind. Zum anderen ist die Verkehrsstärke bei vielen Planungen die maßgebende Größe, an der sich Entscheider orientieren, um die verkehrlichen Auswirkungen eines Zustandes zu erfassen. Gleichzeitig ist die Verkehrsstärke Eingangsgröße für nachgeordnete Modelle (z.B. Lärm, Kraftstoffverbrauch). Bei einer Fokussierung auf die Verkehrsstärke wird jedoch übersehen oder bewusst verdrängt, dass es für eine Menge von Zählwerten eine sehr große Anzahl möglicher Nachfragematrizen geben kann.

Um Prognosen zu erstellen, ist zusätzlich zur qualitativen Übereinstimmung der Modellwerte eine realitätsnahe, logische Abbildung der Abläufe und Wirkungszusammenhänge erforderlich. Der Modellaufbau darf nicht zu inneren Widersprüchen führen. Nachfolgend sind einige Beispiele für derartige Anforderungen an die Konsistenz von Verkehrsnachfragemodellen formuliert:

- Bilanzierung der Ortsveränderungen:
Die Zahl der Ortsveränderungen, die eine Zelle im Laufe eines Tages verlassen, muss mit der Zahl der ankommenden Ortsveränderungen übereinstimmen. Das gilt sowohl für den gesamten Verkehr der Verkehrszelle als auch für Teilmengen (Ortsveränderungen einer Personengruppe oder Ortsveränderungen der Pkw). Dieses Konsistenzkriterium wird von Aktivitätenkettenmodellen implizit erfüllt, da bei dieser Modellklasse ganze Aktivitätenketten modelliert werden, die immer am Wohnort beginnen und enden. Bei einfachen wegebasierten Modellen sind zusätzliche Vorkehrungen erforderlich. LOHSE ([7] Seite 166) führt zur Korrektur der Bilanz hierfür ein eigenes Nachfragesegment "Sonstiges" ein.
- Bilanzierung der Nachfrage mit den Strukturdaten:
Bei Pflichtaktivitäten (z.B. Arbeiten) unterliegt die Zielwahl der Akteure (z.B. Beschäftigte) zusätzlicher Randbedingungen. Jeder Arbeitsplatz muss von genau einer Person belegt werden. Arbeitsorte mit einer guten Erreichbarkeit dürfen nicht mehr Ortsveränderungen anziehen als Arbeitsorte mit einer schlechteren Erreichbarkeit. Mit sogenannten zwei-seitig-gekoppelten Zielwahlmodellen können diese Randbedingungen eingehalten werden. Für Fälle, bei denen die Zahl der angezogenen Ortsveränderungen zwischen einem unteren und einem oberen Wert liegen soll, bietet SCHILLER [8] eine Lösung an.

Damit können u.a. Ortsveränderungen zu Einkaufsgelegenheiten besser nachgebildet werden.

- **Proportionalität der Routenbelastungen:**
Bei einer deterministischen Gleichgewichtsumlegung (Wardrop'sches Nutzergleichgewicht) wird die Nachfrage so auf das Verkehrsnetz verteilt, dass die objektiv messbare Fahrtdauer auf allen alternativen Routen gleich ist. Diese Aufteilungsregel liefert eine eindeutige Lösung für die Streckenbelastung. Wie Bild 4 zeigt, kann diese Streckenbelastung aber mit unterschiedlichen Lösungen für die Aufteilung der Verkehrsstärke auf die Routen erreicht werden. Daraus ergibt sich, dass alle nachgeschalteten Auswertungen (Verkehrsspinnen, Leistungsfähigkeitsnachweise für Kreuzungen) nur dann konsistente Ergebnisse ergeben, wenn auch Anforderungen für die Aufteilung der Verkehrsstärke auf die Routen formuliert werden. BAR-GERA et al. [2] schlagen hierfür das Kriterium Proportionalität der Routenbelastungen vor. Dieses Kriterium fordert, dass die Nachfrage, die über die betrachtete Netzmasche abgewickelt wird, unabhängig von der Quelle und dem Ziel immer mit einem einheitlichen Verhältnis, d.h. proportional, auf die zwei alternativen Teilrouten der Netzmasche aufgeteilt wird. Im dargestellten Beispiel erfüllen die Lösungen 4 und 5 diese Bedingung. Lösung 4 ergibt die wahrscheinlichste und deshalb logischste Aufteilung der Nachfrage.
- **Konsistente Annahmen über das Entscheidungsverhalten:**
Für die Nachbildung des Entscheidungsverhaltens stehen verschiedene Modellansätze zur Verfügung. Bei deterministischen Entscheidungsmodellen treffen alle Personen einer Personengruppe die Entscheidung auf der Basis gleicher und vollständiger Kenntnis über die verfügbaren Alternativen. Stochastische Entscheidungsmodelle gehen davon aus, dass die Personen einer Personengruppe die Entscheidung auf der Basis unvollständiger Kenntnis und individueller Präferenzen treffen. Aus Sicht der Entscheidungstheorie ist es unlogisch innerhalb eines Nachfragemodells einzelne Entscheidungen auf der Basis unvollständiger und andere auf der Basis vollständiger Information nachzubilden. Das gilt analog für die verwendeten Widerstands- bzw. Nutzenfunktionen (siehe Bild 2). Eigentlich sollte der bei der Routenwahl ermittelte Widerstand bzw. Nutzen auch bei der Modellierung der Verkehrsmittelwahl und Zielwahl verwendet werden. Ein Ansatz hierfür bietet das Konzept der sogenannten Logsums an, das beispielweise in [5] beschrieben wird. Dabei ergibt sich der (bewertete) Nutzen einer übergeordneten Alternative (z.B. der Nutzen des Verkehrsmittels ÖV zwischen i und j) aus der Summe der Nutzen aller nachgeordneten Alternativen (z.B. der Nutzen aller ÖV-Routen zwischen i und j).

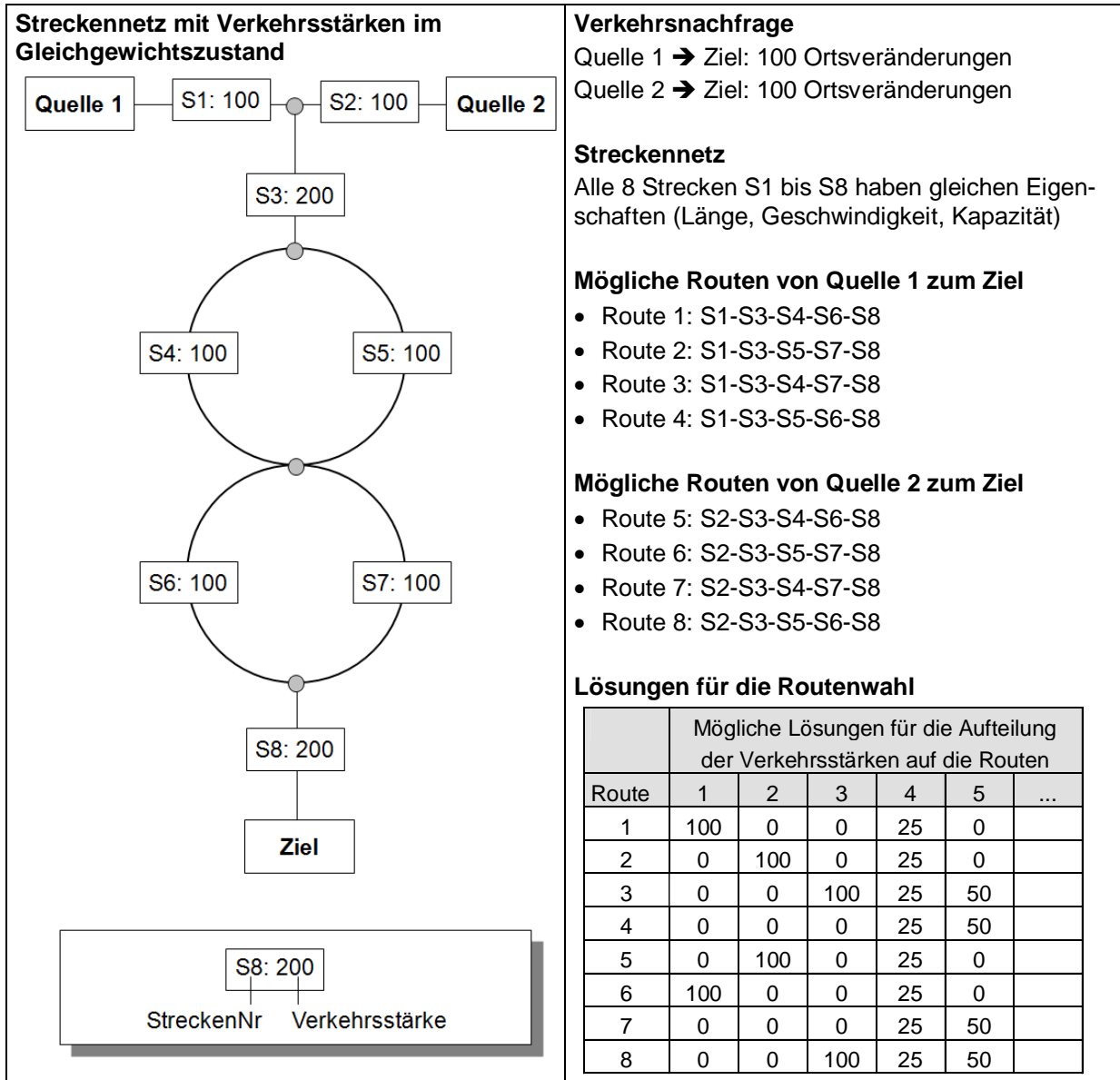


Bild 4: Beispielnetz mit einer eindeutigen Lösung für die Streckenbelastungen, die die Bedingungen des deterministischen Nutzergleichgewichts erfüllen (links). Diese Streckenbelastungen lassen sich aber mit unterschiedlichen Lösungen für die Aufteilung der Verkehrsstärke auf die 8 Routen erreichen (rechts).

4 Qualität von Verkehrsnachfragemodellen

Qualität beschreibt das Maß, in dem ein Produkt die an es gestellten Anforderungen erfüllt. Die Anforderungen an ein Verkehrsnachfragemodell ergeben sich aus den in Kapitel 3 beschriebenen Anforderungen an die Einsatzbereiche des Modells, an die Konsistenz der Ergebnisse und der abgebildeten Wirkungszusammenhänge. Wie zumindest teilweise aus den in Bild 2 dargestellten Berechnungsvorschriften erkennbar ist, wird die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells von mehreren Einflussgrößen bestimmt.

Genauigkeit der Strukturdaten

Die Genauigkeit der Strukturdaten (Einwohnerzahlen, Arbeitsplatzzahlen, etc.) beeinflusst unmittelbar die Menge der Ortsveränderungen und die räumliche Verteilung der Aktivitätenorte.

Genauigkeit der Netzdaten

Netzdaten (Netztopologie, Knotenwiderstände, ÖV-Fahrpläne, Gebühren und Fahrpreise) enthalten Informationen über die Qualität des Verkehrsangebots aus Sicht des Verkehrsteilnehmers, die u.a. durch die Kenngrößen Fahrzeit, Zu- und Abgangszeit, Umsteigewartezeit, Umsteigehäufigkeit und Fahrtkosten beschrieben wird. Damit beeinflusst die Genauigkeit der Netzdaten unmittelbar die Widerstände, die in die Zielwahl, die Verkehrsmittelwahl, die Abfahrtszeitwahl und in die Routenwahl eingehen. Soll der Radverkehr modelliert werden, ist ein erweitertes Netzmodell, das Radwege und Höhendifferenzen umfasst, erforderlich.

Räumliche Segmentierung

Betrachtet man andererseits den Einfluss der Zellengröße auf die Aussagegenauigkeit relationsbezogener Kenngrößen (z.B. Reisezeit), dann stellt man leicht fest, dass die Aussagegenauigkeit mit zunehmender Zellengröße sinkt. Bild 5 illustriert diesen Zusammenhang beispielhaft. Das gilt gleichermaßen für die Netzbelastungen. Bild 6 zeigt an einem Beispiel, dass die Zellengröße und die Wahl der Anbindungsknoten das Belastungsbild deutlich beeinflusst. Daraus ergibt sich, dass im Nahbereich geplanter Maßnahmen eine kleinräumige Zelleneinteilung und eine sorgfältige Wahl der Anbindungsknoten erforderlich ist. Beim Vergleich von gezählten mit berechneten Verkehrsstärken ist zu prüfen, in welchem Umfang der Zellenbinnenverkehr, der nicht auf das Netz umgelegt wird, zu berücksichtigen ist.

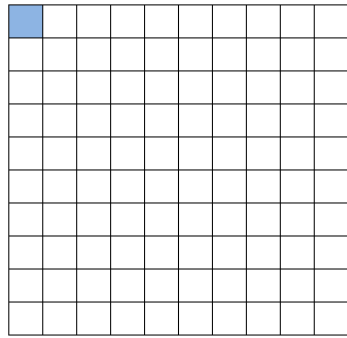
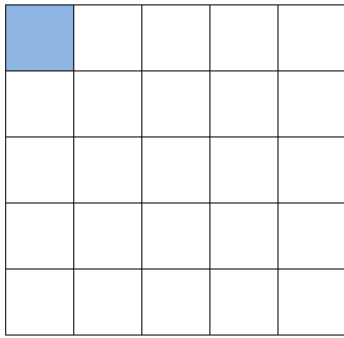
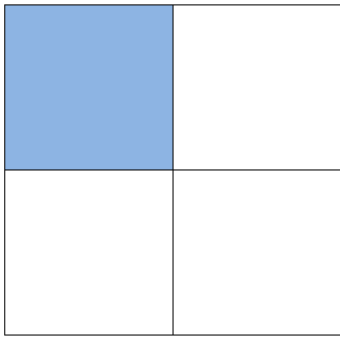
100 Zellen	25 Zellen	4 Zellen
		
mittlere Reisezeit = 100	mittlere Reisezeit = 91	mittlere Reisezeit = 61
Annahmen: <ul style="list-style-type: none"> • Quelle ist Zelle links oben • alle Ziele haben gleiche Anfahrwahrscheinlichkeit • konstante Geschwindigkeit • Anbindung in der Zellenmitte • direkte Verbindung ohne Umwegfaktor • Zeit normiert, so dass mittlere Reisezeit im Bild links = 100 		

Bild 5: Einfluss der Zellengröße auf die Reisezeit

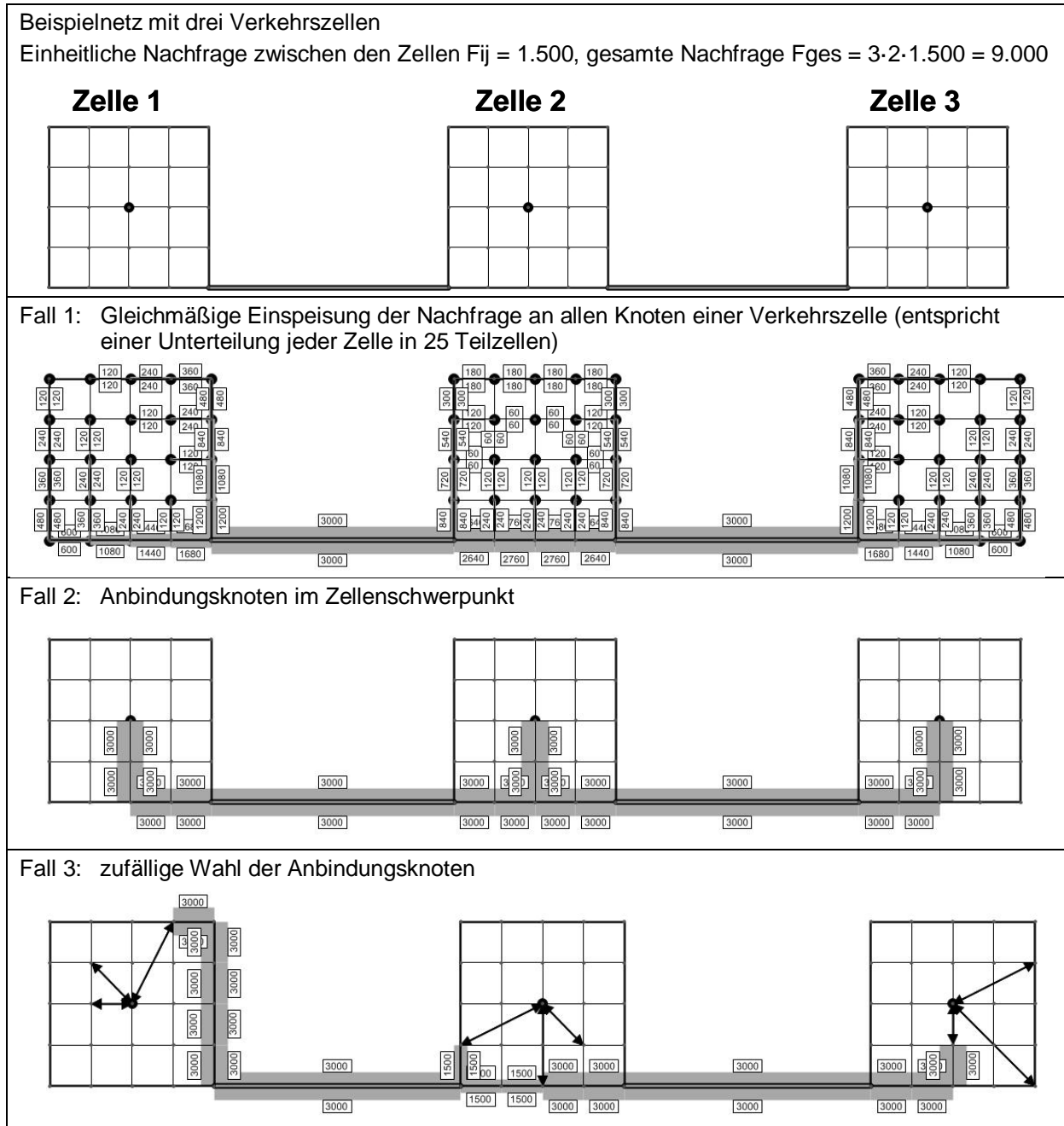


Bild 6: Einfluss der Zellengröße und der Wahl der Anbindungsknoten auf die Netzbelastung

Segmentierung der Nachfrage

Die Segmentierung der Nachfrage in Personengruppen und Fahrtzwecke ermöglicht eine detailliertere Nachbildung der Entscheidungsprozesse. Die Erzeugungsraten (Mobilitätsraten) und Verkehrsmittelpräferenzen werden maßgeblich von den Eigenschaften der Personengruppe (Alter, Tätigkeit, Pkw-Verfügbarkeit) beeinflusst. Mit den Fahrtzwecken sind bestimmte Aktivitätenorte und Reiseweiten verbunden. Soll die Verkehrsbedeutung spezieller Aktivitätenorte (Krankenhäuser, Baumärkte) im Modell berücksichtigt werden, erfordert das eine angepasste Segmentierung und die Kenntnis der segmentspezifischen Verhaltensparameter.

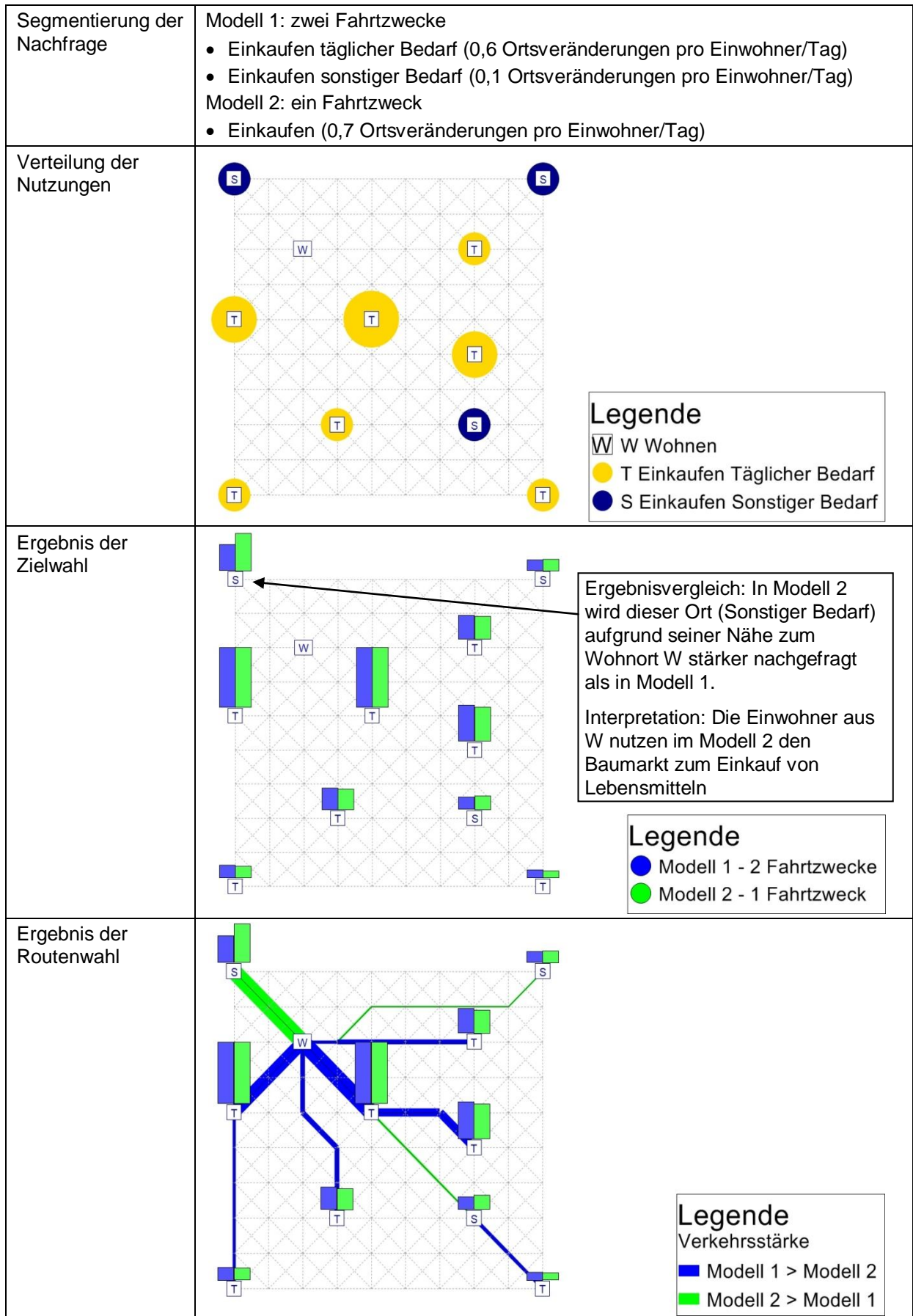


Bild 7: Einfluss der Nachfragesegmentierung auf die Zielwahl und die Netzbelastung

Bild 7 veranschaulicht den Einfluss der Nachfragesegmentierung auf die Zielwahl und die Netzbelastung für den Fahrzweck Einkaufen. Ein aggregierter Modellansatz, der nicht zwischen täglichem und sonstigen Bedarf differenziert, führt zu einer unrealistischen Zielwahl, die die Eigenschaften der Zelle nicht ausreichend berücksichtigt.

Genauigkeit der erfassten Verhaltensdaten

Aus den mit Wegetagebüchern erfassten Verhaltensdaten leiten sich die Erzeugungsraten und die Verhaltensparameter für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl ab. Die Reiseweiten sind ebenso wie der Modal-Split regional unterschiedlich. Vergleichende Erhebungen in Städten (System repräsentativer Verkehrsbefragungen SrV [1]) zeigen, dass der Modal Split in deutschen Städten mit 500.000 bis 700.000 Einwohnern für jedes Verkehrsmittel (Fuß, Rad, ÖV, Pkw) um rund 10 Prozentpunkte variieren kann. Die mittleren Reiseweiten schwanken zwischen 6,3 und 7,1 km.

Besondere Aufmerksamkeit verdient bei der Erfassung von Ortsveränderungen die genaue Geocodierung der Quell- und Zieladressen. Die Länge der Zu- und Abgangswege hat im ÖV einen großen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl und sollte bei der Schätzung der Modellparameter berücksichtigt werden. Eine Geocodierung verbessert auch die Erfassung der Reiseweiten und Reisezeiten, die die Probanden nicht immer ausreichend genau angeben können. Für die Modellerstellung ist außerdem der Anteil der Ortsveränderungen von Bedeutung, der das Modellgebiet verlässt bzw. komplett außerhalb des Modellgebiets stattfindet.

Annahmen über das mobilitätsrelevante Verhalten

Man kann sich gut vorstellen, dass Verkehrsteilnehmer bei der Wahl eines Zieles unmittelbar die für sie verfügbaren Verkehrsmittel berücksichtigen. Es ist ebenfalls einleuchtend, dass an einem Arbeitsplatz nur ein Beschäftigter arbeiten kann. Deshalb kann man davon ausgehen, dass simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodelle die Ergebnisqualität ebenso verbessern, wie die Verwendung von zweiseitig gekoppelten Zielwahlmodellen. Das gilt analog für Umlenungsverfahren, die die oben beschriebene Proportionalität der Routenbelastungen gewährleisten und so zu besseren Verkehrsstärken bei Abbiegeströmen oder bei der Simultanumlegung von Pkw und Lkw führen.

In welchem Umfang die explizite Abbildung der Aktivitätenketten, die Differenzierung nach Pflichtaktivitäten mit einem festen Ort (Arbeit) und Gelegenheitsaktivitäten mit einem frei wählbaren Ort (Einkauf) oder die mikroskopische Modellierung einzelner Verkehrsteilnehmer das Ergebnis eines Verkehrsnachfragemodells verbessern, ist derzeit nicht bekannt.

Abgrenzung des Modellraums

Ein gewisser Anteil des Personenverkehrs in einem Modellgebiet wird nicht durch die Bewohner des Modellgebiets verursacht. Diese Verkehrsströme müssen aus anderen Datenquellen bestimmt werden. Hierfür eignen sich großräumige Verkehrsmodelle oder Kordonbefragungen, die allerdings aufgrund des Aufwands selten zur Verfügung stehen. Existieren keine Kordonbefragungen, sollten an wichtigen Grenzen des Modellgebietes zumindest Verkehrsstärken erfasst werden. Im ÖV bietet sich analog die Erfassung der Fahrgäste (Einsteiger, Aussteiger Durchfahrer) an den Grenzbahnhöfen an. Der externe Verkehr sollte in

eigenen Nachfragesegmenten verwaltet werden, um eine getrennte Validierung des externen und des modellierten Verkehrs zu ermöglichen.

Konvergenz

Verkehrsnachfragemodelle basieren auf iterativen Berechnungsverfahren. Iterationen sind notwendig um die Rückkopplungen zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage abzubilden, die sich aus der im folgenden Bild dargestellten Kausalitätskette ergeben.

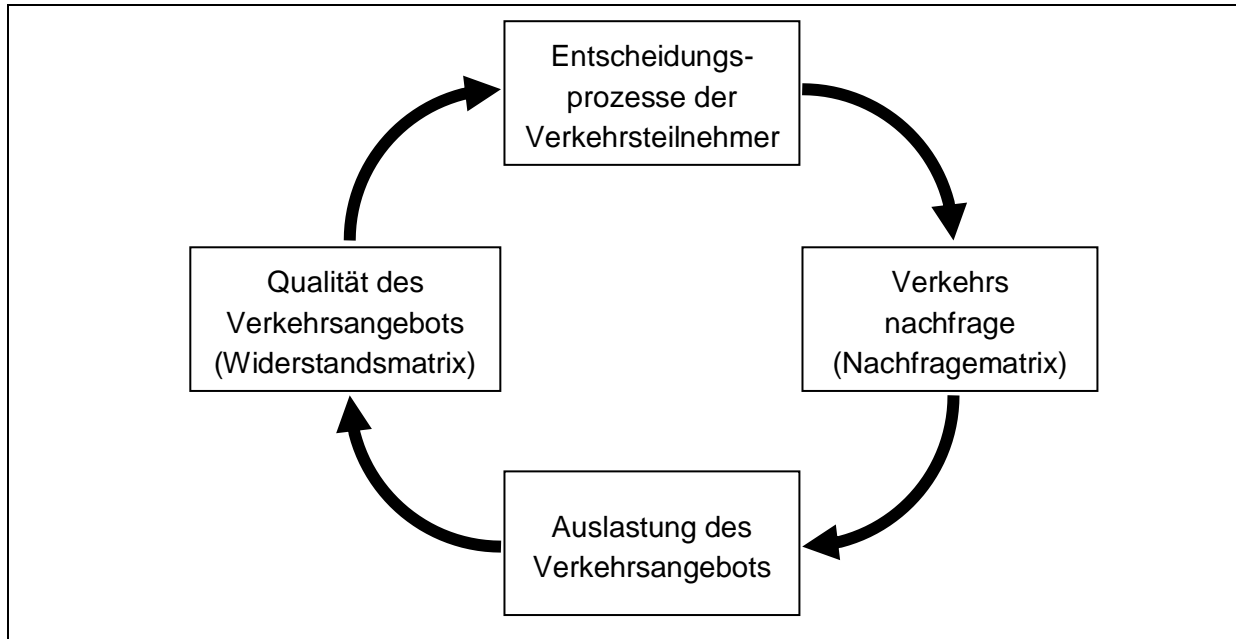


Bild 8: Rückkopplungen zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage

Das System von Angebot und Nachfrage befindet sich dann in einem Gleichgewichtszustand, wenn sich die Struktur der Nachfrage (Nachfragematrix) und die Angebotsqualität (Widerstandsmatrix) zwischen zwei Iterationsschritten n und $n-1$ nicht mehr ändert. Konvergenz beschreibt in welchem Maß ein System vom Gleichgewichtszustand abweicht. Auch wenn im Verkehr in der Realität weder stabile noch perfekte Gleichgewichtszustände existieren, ist ein Gleichgewichtszustand aus Sicht des Planungsprozesses erstrebenswert. Nur so lassen sich konkurrierende Maßnahmen miteinander vergleichen. Untersuchungen von BOYCE et al. [3] zeigen, dass für einen Maßnahmenvergleich eine hohe Konvergenz erforderlich ist. Danach können die Verkehrsstärken eines Modells mit einer niedrigen Konvergenz um bis zu 10% von den Verkehrsstärken eines Modells mit einer hohen Konvergenz abweichen.

5 Fazit

5.1 Was ein Verkehrsnachfragemodell leisten kann

Von David BOYCE [4] stammt folgendes Zitat zur Verkehrsnachfragemodellierung: "This is not rocket science. No, it is harder!" Mit seiner Aussage fordert er eine bessere Ausbildung

sowohl für die Ersteller und Anwender von Verkehrsnachfragemodellen als auch für die Softwarehersteller. Verkehrsmodellierung ist kein Gelegenheitsjob oder eine Nebentätigkeit. Gute Verkehrsmodelle benötigen erfahrene Modellersteller und Modellanwender, die die Ergebnisse einschätzen können. Dabei darf eine zentrale Eigenschaft von Verkehrsnachfragemodellen nicht vergessen werden: Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle modellieren das durchschnittliche Verhalten der Bevölkerung. Wenn die Personen einer betrachteten Personengruppe an einem Werktag im Mittel 3,5 Wege durchführen, dann wird im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell jede Person dieser Gruppe exakt 3,5 Wege erzeugen. In der Realität treten aber innerhalb einer Personengruppe Schwankungen auf. Vergleicht man die Wegeanzahl, die die Personen einer Verkehrszelle in der Realität erzeugen mit den Modellwerten, dann werden sich mehr oder weniger deutliche Abweichungen ergeben. Die relative Abweichung nimmt dabei mit abnehmender Personenzahl zu. Tabelle 3 illustriert das beispielhaft an Zellen mit unterschiedlicher Einwohnerzahl.

Personenzahl in der Zelle	Modellwert	Minimum Realität	Maximum Realität	max. relative Abweichung	absolute Abweichung
[Personen]	[Wege/Tag]	[Wege/Tag]	[Wege/Tag]	[%]	[Wege/Tag]
1	3,5	0,6	6,4	84	3
10	35	26	44	27	9
100	350	321	379	8	29
1.000	3.500	3.407	3.593	3	93
10.000	35.000	34.706	35.294	1	294

Annahmen:

- Mittelwert 3,5 Wege/Tag
- Standardabweichung 1,5 Wege/Tag
- Normalverteilung
- alle Personen „verhalten“ sich innerhalb eines Konfidenzlevel von 95%

Tabelle 3: Relative und absolute Abweichung der erzeugten Wege in Abhängigkeit der Größe der betrachteten Grundgesamtheit

Dieses Beispiel soll Folgendes verdeutlichen: Auch wenn eine feinere, disaggregierte Modellierung (Zahl der Personengruppen, Zellengröße, Abbildung von Knotenwiderständen, Abbildung von Aktivitätenketten) die Aussagegenauigkeit in der Regel erhöht, sind abgesicherte Aussagen trotzdem nur auf einer aggregierten Ebene möglich. Die Aussagegenauigkeit steigt dabei mit zunehmender Aggregation. Die Tatsache, dass ein Nachfragemodell Aktivitäten- und Wegeketten nachbildet, darf also nicht zu der Annahme (ver-) führen, dass das Modell statistisch abgesicherte Aussagen zu den Aktivitätenorten der Personen einer Verkehrszelle machen kann. Das "perfekte" Nachfragemodell kann "nur" Folgendes leisten:

- das Modell zeigt den Mittelwert des Verhaltens,
- die Realität zeigt die Abweichungen vom Mittelwert,
- Mittelwert und mittlere Realität stimmen für verschiedene Grundgesamtheiten (z.B. alle Personen einer Personengruppe oder alle Personen in einem größeren Gebiet) überein.

5.2 Anforderungen an die Beteiligten

Um eine angemessene Qualität des Produktes Verkehrsnachfragemodell sicherzustellen, sind alle Beteiligten vom Softwarehersteller über den Modellierer bis zum Nutzer der Modell-ergebnisse gefordert.

Die Nutzer des Verkehrsnachfragemodells

- sind in der Regel die Verkehrsingenieure und Politiker in Kommunen und Kreisen,
- vergeben die Erstellung und die Fortschreibung des Verkehrsnachfragemodell intern oder extern,
- müssen die Einsatzbereiche des Modells z.B. in der Ausschreibung festlegen und angemessene Aussagegenauigkeiten fordern,
- sollten zusätzliche Messwerte für die Validierung erheben bzw. erheben lassen,
- können externe Reviewer mit der Überprüfung des Modells beauftragen.

Die Modellersteller

- sind in der Regel Angestellte des Modellnutzers oder externe Büros,
- sind für die Modellerstellung einschließlich der Kalibrierung und Validierung verantwortlich,
- müssen die Modellerstellung dokumentieren,
- müssen die Aussagegenauigkeit quantifizieren und den Nutzer auf Grenzen der Modellierung hinweisen,
- sollten Kunden auf die Notwendigkeit guter Inputdaten hinweisen,
- sollten sich regelmäßig fortbilden.

Die Softwarehersteller

- müssen Sorge tragen, dass die Software die Wirkungszusammenhänge formal und numerisch richtig berechnet,
- müssen durch eine bedienungsfreundliche Oberfläche und geeignete Daten- und Programmierschnittstellen dem Modellierer eine effiziente Modellerstellung ermöglichen,
- sollten Methoden zur Kalibrierung und Validierung in die Software integrieren,
- müssen die Verfahren gut dokumentieren.

Forschungsgesellschaften und Forschungseinrichtungen:

- sollten Empfehlungen zur Verkehrsnachfragemodellierung entwickeln,
- Aussagen machen, was eine angemessene Aussagegenauigkeit ist,
- könnten die Softwaresysteme testen,
- sind für die Ausbildung der Modellierer verantwortlich.

6 Literatur

- [1] Ahrens, G.-A., Ließke, F., Wittwer, R., Hubrich, S. (2009):
Sonderauswertung zur Verkehrserhebung "Mobilität in Städten – SrV 2008" -
Städtevergleich, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verkehrs- und
Infrastrukturplanung, <[http://www.tu-dresden.de/srv/SrV_Web/2008/download/
Staedtevergleich_SrV2008.pdf](http://www.tu-dresden.de/srv/SrV_Web/2008/download/Staedtevergleich_SrV2008.pdf)> (abgerufen am 05.01.2011).
- [2] Bar-Gera, H., Boyce, D., Hu, Y., Nie, Y., Liu, Y. (2010):
Field Test of a Method for Finding Consistent Route Flows and Multiple-Class Link Flows
in Road Traffic Assignments, Report,
<<https://transportation.northwestern.edu/docs/2010/2010.IM-Boyce.pdf>>
(abgerufen am 05.01.2011).
- [3] Boyce, D., Ralevik-Dekic, B., Bar-Gera, H. (2004):
Convergence of Traffic Assignments: How much is enough?, National Institute of
Statistical Sciences, USA, Technical Report Number 155,
< <http://nisl05.niss.org/technicalreports/tr155.pdf>> (abgerufen am 05.01.2011).
- [4] Boyce, D. (2002):
Is the Sequential Travel Forecasting Paradigm Counterproductive?, Journal of Urban
Planning and Development, Vol. 128.
< http://www.civil.northwestern.edu/docs/Boyce/sequential_travel_forecasting.pdf>
(abgerufen am 05.01.2011).
- [5] De Jong, G., Marits, P., Daly, A., Graafland, I., Kroes, E., Koopmans, C. (2005):
Using the Logsum as an Evaluation Measure - Literature and Case Study, Working
Paper, RAND Europe,
<http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/working_papers/2005/RAND_WR275.pdf>
(abgerufen am 05.01.2011).
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001):
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Ausgabe 2001.
- [7] Lohse, D. (1997):
Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und Verkehrsplanung, Band 2
Verkehrsplanung, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [8] Schiller, C. (2007):
Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und
Infrastrukturplanung, Habilitation an der TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften
"Friedrich List".
- [9] Train, K. E. (2009):
Discrete Choice Methods with Simulation, Second Edition, Cambridge University Press.