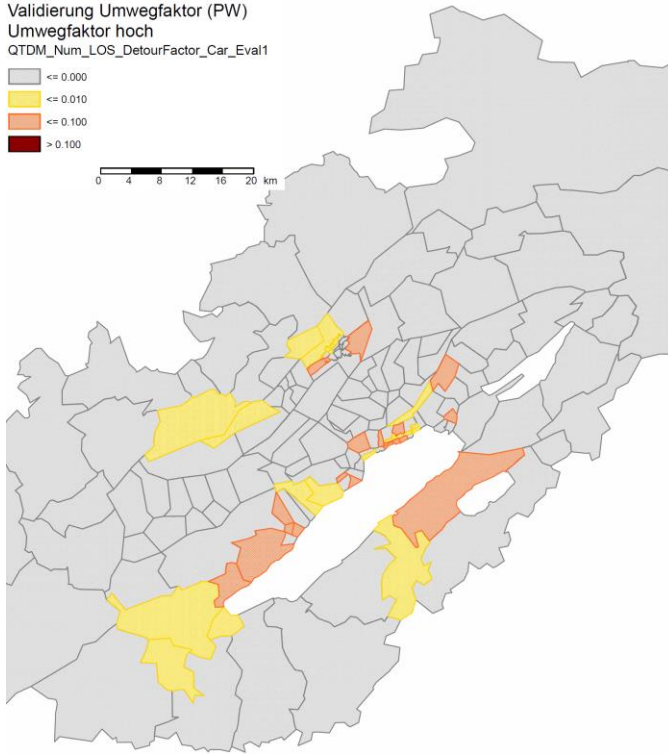


Validierung Umwegfaktor (PW)
Umwegfaktor hoch

QTDM_Num_LOS_DetourFactor_Car_Eval1



0 4 8 12 16 20 km



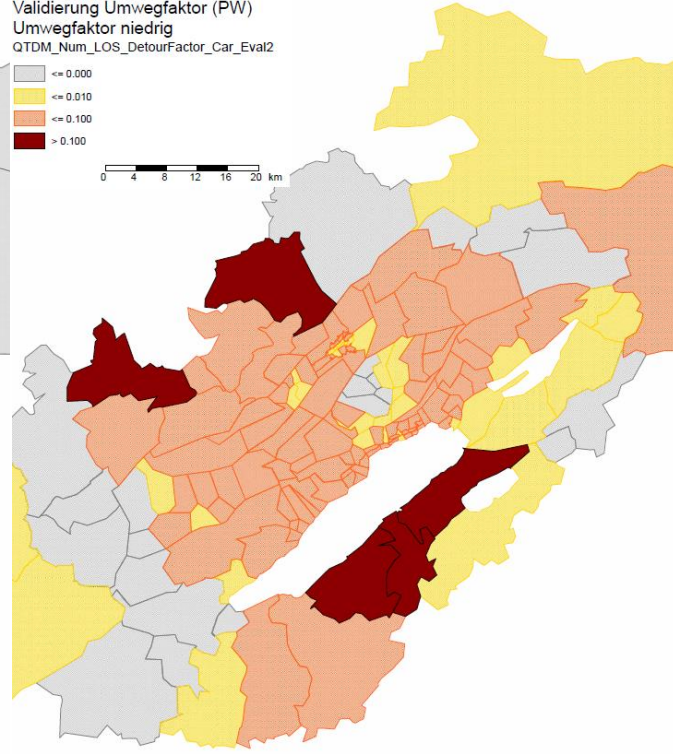
Validierung Umwegfaktor (PW)

Umwegfaktor niedrig

QTDM_Num_LOS_DetourFactor_Car_Eval2



0 4 8 12 16 20 km



Impressum

Datum

08.11.2019

Version

1.0

Grundlagen

SVI 2015/001

Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen

EBP Schweiz AG

Dr. Nadine Rieser, Bence Tasnády, Nicolaas de Vries,
Marco Rothenfluh, Remo Fischer

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik,
Institut für Strassen- und Verkehrswesen (ISV), Universi-
tät Stuttgart

Prof. Dr. Markus Friedrich, Eric Pestel

Herausgeber

SVI Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure
und Verkehrsexperten

www.svi.ch

Verfassende des Leitfadens

EBP Schweiz AG

Dr. Nadine Rieser, Bence Tasnády

ISV Universität Stuttgart

Prof. Dr. Markus Friedrich, Eric Pestel

Dieser Leitfaden wurde am 22.11.2019 durch den Vor-
stand der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsinge-
nieure und Verkehrsexperten genehmigt und zur Veröf-
fentlichung frei gegeben.

Der Leitfaden darf unter Angabe der Quelle vollständig
oder auszugsweise kopiert und in Unterlagen sowie Be-
richte eingefügt werden.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Vorgehensweise bei der Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen	2
1.3	Ziele des Leitfadens	3
1.4	Aufbau des Leitfadens	3

2.	Hinweise zur Erstellung einer Modellspezifikation	4
2.1	Modelle für die Planung des Verkehrs	4
2.2	Einsatzbereiche eines Verkehrsnachfragemodells	4
2.3	Modelltypen	6
2.4	Planungsraum und Untersuchungsraum	15
2.5	Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur	16
2.6	Abbildung des Verkehrsangebots	19
2.7	Abbildung der Verkehrsnachfrage	23
2.8	Eventverkehr, Wirtschaftsverkehr und externer Verkehr	25
2.9	Prognose	26
2.10	Datenquellen	28

3.	Hinweise zur Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen	30
3.1	Gütemasse für die Überprüfung der Modellergebnisse	30
3.2	Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung	35
3.3	Überprüfung der Eingangsdaten	36
3.4	Kalibrierung und Validierung	38

4.	Literatur	43
----	-----------	----

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Für die Planung und Bewertung von Verkehrsprojekten sowie für die Beantwortung anderer komplexer verkehrlicher Fragestellungen werden sowohl von der Politik als auch von der Bevölkerung verlässliche Grundlagen gefordert. Dadurch werden Verkehrsnachfragemodelle zu einem immer wichtigeren Werkzeug in der Verkehrsplanung. Sie werden eingesetzt, um die Wirkungen zukünftiger Entwicklungen (z.B. Demografie, Treibstoffpreise) oder geplanter verkehrlicher Massnahmen (z.B. Einrichtung einer neuen ÖV-Linie) abzuschätzen. Auf diese Weise dienen Verkehrsnachfragemodelle der Vorbereitung verkehrsplanerischer, betriebsplanerischer, verkehrstechnischer und verkehrspolitischer Entscheidungen. Darüber hinaus können sie als Input für weitere Modellrechnungen genutzt werden, wie beispielsweise für Lärm- und Schadstoffemissionsberechnungen oder für die Quantifizierung der Erlöse aus Fahrkarten.

Da Verkehrsnachfragemodelle eine wesentliche Grundlage für Entscheidungen über kostenintensive Investitionen darstellen, sind die Anforderungen an ihre Qualität hoch. Qualität beschreibt das Mass, in dem ein Produkt die gestellten Anforderungen erfüllt. Fasst man ein Verkehrsnachfragemodell als ein Produkt auf, das von einem Lieferanten (=Verkehrsmodellersteller) an einen Kunden (Modellnutzer, z.B. Verkehrsingenieur, Verwaltung) geliefert wird, lassen sich verschiedene Arten von Anforderungen unterscheiden. In erster Linie muss ein Verkehrsnachfragemodell die Realität möglichst gut abbilden und realistische Vorhersagen über die Auswirkungen der zu untersuchenden Veränderungen machen können.

Welche Aspekte eines Verkehrsnachfragemodells dabei im Fokus stehen und somit hohe Anforderungen an die Qualität stellen, ist vom Verwendungszweck des Modells abhängig. Häufig soll ein Modell für verschiedene Fragestellungen eingesetzt werden, die nicht immer bereits bei der Modellerstellung bekannt sind. Dies kann dazu führen, dass Modellersteller und Anwender ein Modell bezüglich Qualität unterschiedlich einschätzen. Darüber hinaus werden Verkehrsnachfragemodelle von Anwendern oft als „Blackbox“ empfunden und die Grenzen des Modells von den Modellerstellern nicht ausreichend klar kommuniziert. Dies kann zu unterschiedlichen Bewertungen der Qualität des Modells führen.

Bis anhin fehlen in der Schweiz – wie in den meisten europäischen Ländern – allgemein gültige Richtlinien zur Sicherstellung der Qualität von Verkehrsnachfragemodellen. Modellersteller sind zwar im Allgemeinen aufgefordert, die Qualität ihrer Modelle nachzuweisen. Ein standardisiertes Vorgehen oder Richtlinien im Hinblick auf die anzuwendenden Kriterien oder Gütemassen existieren jedoch nicht. Entsprechend gross ist die Bandbreite der in der Praxis verwendeten Kenngrössen und Methoden.

Im Rahmen der Forschungsarbeit «Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen (SVI 2015/001)» wurde daher ein breit abgestütztes System von Kenngrössen und Methoden zur Validierung von Verkehrsnachfragemodellen und der damit erstellten Modellberechnungen zusammengestellt. Damit stehen den Bestellern von Verkehrsmodellen Richtlinien und Standards zur Verfügung, welche sie in Ausschreibungen und bei der Abnahme von Verkehrsmodellen und deren Berechnungen zugrunde legen können.

1.2 Vorgehensweise bei der Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen

Die Qualitätssicherung bei der Nachfragemodellierung ist kein einmaliger Verfahrensschritt, sondern ist ein Prozess, der in alle Stufen der Modellerstellung eingebunden werden sollte. Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells.

Der erste Schritt ist die Erstellung der Modellspezifikation. Mit der Modellspezifikation legt der Besteller eines Verkehrsmodells (z.B. ein Kanton oder eine Region) die Grundlage für den gesamten Qualitätssicherungsprozess. Ausgangspunkt für die Erstellung der Modellspezifikation sind die geplanten Einsatzbereiche des Verkehrsnachfragemodells. Darauf aufbauend kann definiert werden, wie ein Verkehrsnachfragemodell aufgebaut werden soll, welchen Detaillierungsgrad die Raum- und Siedlungsstruktur sowie das Verkehrsangebot haben soll und welche Zustände das Modell abbilden soll. Ein wichtiger Teil der Modellspezifizierung ist die Festlegung der Anforderungen an das Vorgehen und der Kenngrößen, die für die Validierung des Modells zum Einsatz kommen.

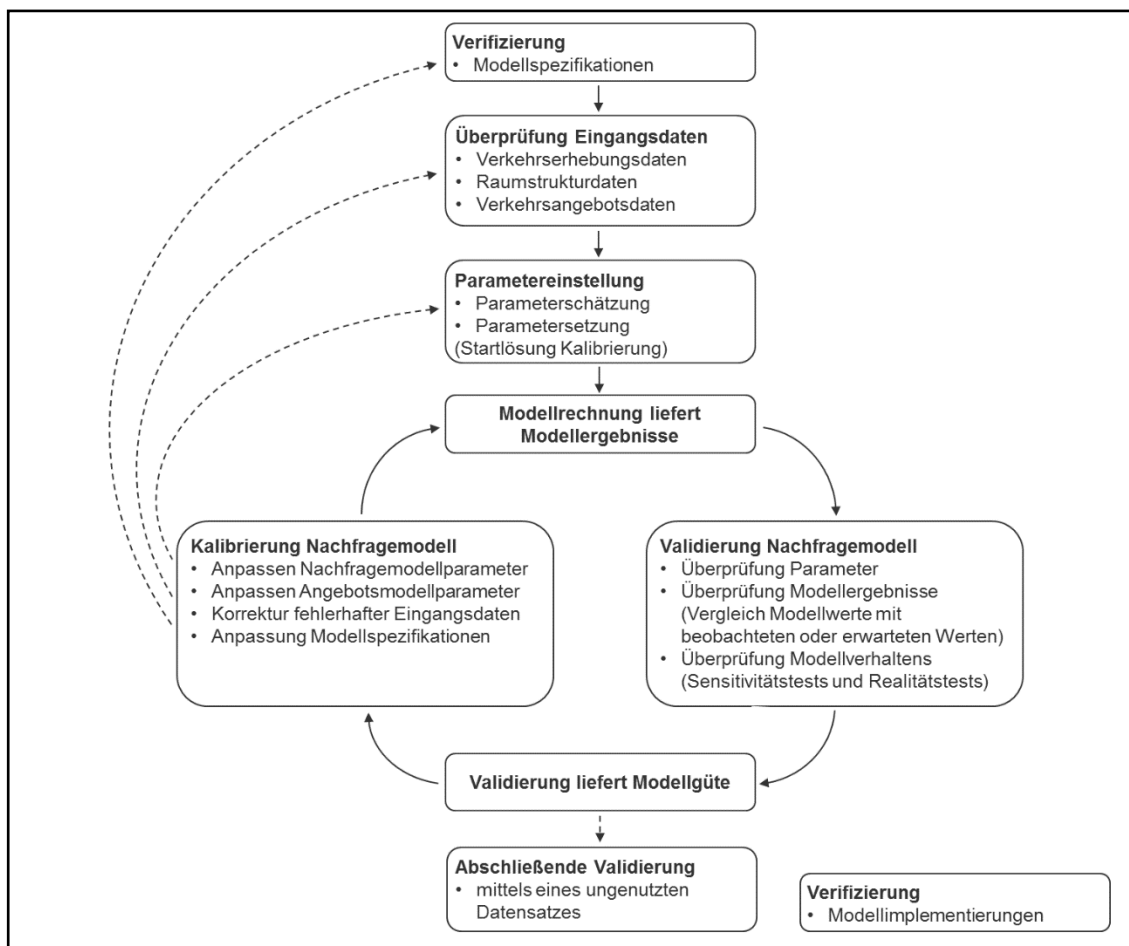


Abbildung 1 Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells

Die Qualitätssicherung während der Modellerstellung liegt vor allem beim Modellersteller und umfasst die Prüfung der Eingangsdaten, die Einstellung der Modellparameter, die Überprüfung der Modellergebnisse, die Überprüfung des Modellverhaltens und die abschliessende Validierung des Modells.

1.3 Ziele des Leitfadens

Die SVI-Leitfäden sind Arbeitsinstrumente, die einen Beitrag für den Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis ermöglichen. Dieser Leitfaden stellt eine Synthese des Forschungsberichtes «Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen (SVI 2015/001)» dar.

Das Ziel dieses Leitfadens ist es, Modellbesteller und Modellersteller in zwei wichtigen Schritten bei der Beschaffung eines Verkehrsnachfragenmodells unterstützen: Bei der Erstellung der Modellspezifikation und bei der Qualitätssicherung während der Modellerstellung.

1.4 Aufbau des Leitfadens

In Übereinstimmung mit den Zielen des Leitfadens besteht der Leitfaden aus zwei Teilbereichen.

Kapitel 2 beinhaltet Hinweise für die Erstellung einer Modellspezifikation. Dabei werden die folgenden Aspekte behandelt:

- Einsatzbereiche des Modells und Kenngrössen, die mit dem Modell ermittelt werden sollen,
- Modelltypen, Modellstufen und Abbildung von Wahlentscheidungen,
- Planungsraum und Untersuchungsraum,
- Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur,
- Abbildung Verkehrsangebot,
- Abbildung Verkehrsnachfrage,
- externer Verkehr und Wirtschaftsverkehr,
- Prognose und
- verfügbare und erforderliche Daten.

In Kapitel 3 wird eine Vorgehensweise für die Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen beschrieben und Gütemasse für die Überprüfung der Modellergebnisse benannt. Anschliessend werden die Schritte Verifizierung der Modellspezifikation und der Modellimplementierung, Überprüfung der Eingangsdaten, Kalibrierung und Validierung beschrieben.

Der Leitfaden gibt Empfehlungen für zwei Arten von Verkehrsnachfragemodellen:

Modellart 1 (städtisch / regional): Der in dieser Modellart abgebildete Untersuchungsraum deckt maximal ein Gebiet von 100 km x 100 km ab. Der Anteil des Fernverkehrs an der Verkehrsleistung ist dementsprechend gering. Die Dauer der meisten Wege ist kürzer als 60 Minuten. Das Verkehrsnetz ist dicht, die Auslastung in vielen Bereichen hoch. In der Regel gibt es im Untersuchungsraum einen Ort mit hoher Zentralität. Modellart 1 ist typisch für städtische und regionale Verkehrsnachfragemodelle.

Modellart 2 (grossräumig / national): Der in dieser Modellart abgebildete Untersuchungsraum umfasst einen Grossraum mit mehreren Zentren von nationaler Bedeutung oder ein ganzes Staatsgebiet. Der Anteil des Fernverkehrs an der Verkehrsleistung ist hoch. Ein signifikanter Anteil der Wege dauert länger als 60 Minuten. Das Verkehrsnetz umfasst viele Ausserortsstrassen und ist weniger dicht. In der Regel gibt es im Untersuchungsraum mehrere Orte mit hoher Zentralität. Modellart 2 ist typisch für Grossräumige / nationale Modelle.

2. Hinweise zur Erstellung einer Modellspezifikation

2.1 Modelle für die Planung des Verkehrs

Davon ausgehend, dass der Verkehr im Verkehrsnetz das Ergebnis vielfältiger individueller Entscheidungen ist, bilden Verkehrsmodelle die Entscheidungsprozesse der Menschen nach, die letztendlich zu Verkehr im Verkehrsnetz führen. Die Entscheidungen reichen von langfristigen Entscheidungen bis hin zu kurzfristigen und spontanen Entscheidungen. Langfristige Entscheidungen betreffen beispielsweise die Wahl des Wohnorts und die Wahl des Arbeitsplatzes. Diese Entscheidungen beeinflussen nachfolgende Entscheidungen bzgl. der Beschaffung von Fahrzeugen oder ÖV-Abonnements, die dann ihrerseits auf die Zielwahl und die Verkehrsmoduswahl wirken. Entscheidungen über die Aktivitätenfolge und die Aktivitätenorte eines Tages, über die Wahl der Abfahrtszeit und der Fahrtroute werden mittel- bis kurzfristig getroffen. In noch kürzeren Zeitabständen wird über die Wahl der Fahrgeschwindigkeit, die Wahl des Fahrstreifens auf der Autobahn und die Wahl des Abstands zum Vorderfahrzeug entschieden.

Für die Zwecke der Verkehrsplanung existieren verschiedene Modelle, die für bestimmte Planungsaufgaben entwickelt wurden und dementsprechend bestimmte Entscheidungsprozesse in den Mittelpunkt der Modellierung stellen:

Flächennutzungsmodelle bilden Standortentscheidungen nach und prognostizieren so die Verteilung der Bevölkerung und der Aktivitätenorte in einem Untersuchungsraum.

Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle bestimmen den Anteil der Personen, denen ein PW oder ein ÖV-Abonnement zur Verfügung steht.

Verkehrsnachfragemodelle bestimmen die Anzahl der Ortsveränderungen, die die Verkehrsteilnehmer im Verkehrsnetz durchführen. Sie bilden hierfür im Personenverkehr Entscheidungen zur Aktivitätenwahl, Zielwahl, Verkehrsmoduswahl, Abfahrtszeitwahl und zur Routenwahl nach.

Verkehrsflussmodelle simulieren die Interaktion zwischen Fahrzeugen bzw. Fussgängern, die im Strassenraum oder auf Schienenverkehrswegen auftreten. Verkehrsflussmodelle für den MIV bilden die Geschwindigkeitswahl, die Fahrstreifenwahl und das Abstandswahlverhalten nach.

Gegenstand dieses Leitfadens sind Verkehrsnachfragemodelle.

2.2 Einsatzbereiche eines Verkehrsnachfragemodells

Die Anforderungen an die Verkehrsnachfragemodellierung ergeben sich aus den geplanten Einsatzbereichen des Modells. Tabelle 1 zeigt typische Entwicklungen und Massnahmen, deren Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage für die Verkehrsplanung von Bedeutung sind. Aus den Einsatzbereichen leiten sich dann die Anforderungen an die Kenngrössen ab, die mit dem Modell ermittelt werden sollen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über Kenngrössen, die sich direkt aus der Verkehrsnachfrage (z.B. Zahl der Wege, Verkehrsstärke) ergeben oder die sich aus der Verkehrsnachfrage ableiten lassen (z.B. Emissionen). Je nach Einsatzbereich können oder müssen die Kenngrössen nach Modus Tageszeit, Wegezweck, Teilräumen und bestimmten Netzobjekten (Strecke, Abbieger, ÖV-Linie) differenziert werden.

Einsatzbereiche	Entwicklungen und Massnahmen
Siedlungsstruktur	Demografische Effekte
	Erweiterung/Planung von Wohn-, Gewerbe- und Industriegebieten
	Singuläre Verkehrserzeuger z.B. Flughafen, Messe, Freizeitpark, Fussballstadien
Infrastruktur	Strassenneubau, -ausbau, -rückbau
	Liniennetzplanung ÖV
	Bau von Park&Ride Verknüpfungspunkten
	Bau von Radverkehrsanlagen
	Bau von Fussverkehrsanlagen*
Mobilitätswerkzeuge	Änderung Motorisierungsgrad und ÖV-Abobesitz
Ordnungspolitisch	Änderungen der zulässigen Geschwindigkeit
	Umweltzonen
	Parkraummanagement
	Durchfahrtsverbote
Kostenbeeinflussend	Fahrpreise
	Treibstoffpreise
	Strassenbenutzungsgebühren
	Parkraumbewirtschaftung
ÖV-Betrieb	Taktveränderung
	Differenzierte Fahrplanänderung
	Fahrzeugeinsatz
Verkehrstechnisch	Dimensionierung von Knotenpunkten und Verflechtungen
	Verkehrsleitsysteme*
	Verkehrsmanagement*
Fahrzeugtechnisch	Änderung der Fahrzeugflottenzusammensetzung
Bewusstseinsbildend	Marketing*
Events	Planung besonderer Events
* Massnahmen, die mit einem Verkehrsnachfragemodell nicht, nur eingeschränkt oder nur mit besonderen Annahmen abbildbar sind.	

Tabelle 1 Checkliste Einsatzbereiche: Welche Entwicklungen und Massnahmen sollen berücksichtigt werden?

	Differenzierung				
	Modus	Wegezzweck	Tageszeit	Teilräume	Netzobjekte
Kenngröße					
Anzahl der Wege	●	○	○	○	
Verkehrsstärke	●	○	○		●
Personenkilometer	●	○	○	○	○
Fahrzeugkilometer	●	○	○	○	○
Zeitaufwand	●	○	○	○	○
Auslastung	●		○		●
Umsteigehäufigkeit					○
Linienbeförderungsfälle		○		○	○
Betriebskosten ÖV				○	○
Erlöse ÖV		○		○	○
Einnahmen MIV		○		○	
Treibstoffverbrauch				○	○
Schadstoffemission			○	○	○
Lärmemission			●		○
Eine Differenzierung ist ● für alle Einsatzbereiche üblich ○ für spezielle Einsatzbereiche üblich ○ bei Bedarf möglich eine Differenzierung ist nicht üblich					

Tabelle 2 Checkliste Kenngrößen: Welche Kenngrößen soll das Modell liefern und in welcher Differenzierung?

2.3 Modelltypen

2.3.1 Modellstufen

Die Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmer werden in einem Verkehrsnachfragemodell in den folgenden Modellstufen mit Teilmodellen abgebildet:

- Aktivitätenwahl- oder Verkehrserzeugungsmodelle bestimmen die Zahl der Ortsveränderungen, die von den Bewohnern des Untersuchungsraums in einem Zeitraum durchgeführt werden. Ergebnis dieses Teilmodells sind die produzierten und angezogenen Ortsveränderungen einer Nachfragegruppe.
- Verkehrszielwahl- oder Verkehrsverteilungsmodelle ermitteln die Quellen und die Ziele der Ortsveränderungen und somit die Ortsveränderungen zwischen den Quell- und der Zielzellen.
- Verkehrsmoduswahl- oder Verkehrsaufteilungsmodelle bilden die Wahl des Verkehrsmodus für die einzelnen Ortsveränderungen nach.
- Abfahrtszeitwahlmodelle bestimmen die Abfahrtszeiträume von Ortsveränderungen durch die Vorgabe von wegezzwecksspezifischen Tagesganglinien oder durch spezifische Entscheidungsmodelle.
- Routenwahl- oder Umlegungsmodelle ermitteln die Routen im Verkehrsnetz und verteilen die Nachfrage auf die Routen und damit auf die Netzelemente (Strecken, Knoten) im Verkehrsnetz.

- Um zu berücksichtigen, dass die einzelnen Wahlentscheidungen i.d.R. nicht sequenziell erfolgen und damit unabhängig voneinander sind, können Modellstufen integriert werden. Bei der Integration erfolgt die Entscheidungsbildung simultan, so dass die Einflussfaktoren aller Teilentscheidungen eingehen.
- Zusammenfassung von Zielwahl- und Verkehrsmoduswahl:
Simultane Verkehrsmodus- und Zielwahlmodelle berücksichtigen, dass die Zielwahl von den verfügbaren Verkehrsmodi abhängt. Personen, die über keinen PW verfügen, werden bei ihrer Zielwahl nur Ziele einbeziehen, die sie zu Fuss, mit dem Rad oder dem ÖV erreichen können.
- Zusammenfassung von Verkehrserzeugung und Verkehrsmoduswahl:
Geht man davon aus, dass die persönlichen Eigenschaften einer Person, insbesondere die PW-Verfügbarkeit, die massgebenden Kriterien für die Verkehrsmoduswahl sind, kann es sinnvoll sein, die Verkehrsmoduswahl in die Verkehrserzeugung zu integrieren. Modelle, die auf diesem Ansatz beruhen, werden Trip-End-Modelle genannt. Sie ermitteln den Anteil jedes Modus an der Verkehrsnachfrage auf der Ebene der Verkehrszellen in Abhängigkeit der modusspezifischen Erreichbarkeit und der PW-Verfügbarkeit der Nachfragegruppe.

2.3.2 Rückkopplungen zwischen Modellstufen

Die Reisezeit kann die Zielwahl, die Moduswahl, die Abfahrtszeitwahl und die Routenwahl beeinflussen. Die Reisezeit im MIV nimmt in Netzen mit einer hohen Auslastung zu. Hohe Auslastungen im MIV können ausserdem zu längeren Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit und zu Verspätungen im ÖV führen. Die Auswirkungen der Reisezeit auf die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer lässt sich durch das Einführen einer Rückkopplung zwischen den Wahlentscheidungen und der Reisezeit abbilden. Die Reisezeit beeinflusst die Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmer, die bestrebt sind, ihren Zeitaufwand zu minimieren. Die Reisezeit wird wiederum massgeblich von der Verkehrsstärke beeinflusst, die sich aus der Verkehrsnachfrage ergibt.

2.3.3 Abbildung von Wahlentscheidungen

Nachfragemodelle basieren auf der Annahme, dass Menschen bei der Planung und der Durchführung einer Ortsveränderung aus einer Menge von Alternativen wählen. Hierfür bewerten die Menschen jede Alternative und entscheiden sich für die Alternative, die aus ihrer Sicht optimal ist, d.h. jeder Mensch maximiert seinen persönlichen Nutzen. Dieser Nutzen wird in einer sog. Nutzenfunktion – bei der Umlegung häufig auch als Widerstandsfunktion – beschrieben. Bei der Modellspezifikation muss festgelegt werden, welche Attribute die Nutzenfunktion umfasst:

- Attribute auf Relationsebene: Fahrzeit im Verkehrsmittel, Zu- und Abgangszeit, Umsteigewartezeiten, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit, Reisekosten, Umsteigehäufigkeit, Reiseweite / Luftlinienentfernung.
- Attribute auf Zellenebene: Parksuchzeit, Parkkosten, Verfügbarkeit PW und ÖV-Abonnement (sofern nicht über Personengruppen berücksichtigt).

Zusätzlich muss bei der Modellierung entschieden werden, wie der mit der Nutzenfunktion berechnete Wert bewertet wird:

- Stochastische Entscheidungsmodelle gehen davon aus, dass die Personen einer Personengruppe die Entscheidung auf der Basis unvollständiger Kenntnis und individueller

Präferenzen treffen. Diese Entscheidungsmodelle eignen sich für die Modellstufen Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl.

- Bei deterministischen Entscheidungsmodellen treffen alle Personen einer Personengruppe die Entscheidung auf der Basis gleicher und vollständiger Kenntnis. Daraus ergeben sich sogenannte deterministische Nutzergleichgewichtsmodelle, die für die Umlegung genutzt werden können.

Die Abbildung der Entscheidungen im Verkehrsnachfragemodell muss so erfolgen, dass neben dem Nutzen zusätzlich Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Bei der Zielwahl von Pflichtaktivitäten (Arbeiten, Ausbildung) darf jeder Platz von nur einer Person benutzt werden.
- 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 PW).

2.3.4 Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle

Das zur Modelltypisierung häufig verwendete Begriffspaar makroskopisch und mikroskopisch dient zur Beschreibung des Abstraktions- und Aggregationsgrads der in einem Modell verwendeten Objekte. Makroskopische Modelle fassen die Objekte der realen Welt in aggregierten Größen (z.B. Verkehrsstärke einer Strecke) zusammen. Mikroskopische Modelle bilden die Objekte der realen Welt direkt ab. Die Eigenschaften eines makroskopischen Objekts oder Zustands sollten sich aus den Eigenschaften der mikroskopischen Objekte oder Zustände erklären lassen:

Personen:

In einem mikroskopischen Nachfragemodell werden die Personen im Untersuchungsgebiet als einzelne Objekte abgebildet. Eine Person, die oft als Agent bezeichnet wird, wird durch eine Reihe von Attributen beschrieben (z.B. Wohnort, Arbeitsort, PW-Besitz). Ein makroskopisches Nachfragemodell differenziert die Nachfrage inhaltlich nach Personengruppen und räumlich nach Verkehrszellen.

Wahlentscheidungen:

In mikroskopischen Nachfragemodellen treffen Agenten Entscheidungen. In einer Entscheidungssituation wählen sie aus einer Menge von Alternativen genau eine Alternative, z.B. einen bestimmten Modus. In makroskopischen Nachfragemodellen werden Alternativen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gewählt. Diese Modelle ermitteln nicht individuelle Ortsveränderungen, sondern die Menge der Ortsveränderungen zwischen Verkehrszellen und Verkehrsstärken auf Routen. Verkehrsstärken eines mikroskopischen Modells sind immer ganzzahlig, Verkehrsstärken eines makroskopischen Modells sind dagegen reelle Zahlen.

Verkehrsangebot:

Netzobjekte, die das Verkehrsangebot definieren, können mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad abgebildet werden. Das Angebot im ÖV kann beispielsweise durch ein vereinfachtes Liniennetz mit Fahrzeiten oder durch den exakten Fahrplan hinterlegt werden. Der gewählte Detaillierungsgrad beeinflusst dann die Qualität der berechneten Beförderungsmöglichkeiten, d.h. die Menge und Realitätsnähe geeigneter Alternativen für die Routen- und Verkehrsmoduswahl. Welcher Detaillierungsgrad angemessen ist, hängt dabei weniger davon ab, ob die Verkehrsnachfrage makroskopisch oder mikroskopisch modelliert wird, sondern vom Einsatzbereich des Modells.

Makroskopische Nachfragemodelle produzieren in einem Berechnungslauf mit Rückkopplungen eine eindeutige Lösung. Das ist ein wichtiger Vorteil gegenüber mikroskopischen Nachfragemodellen. Mikroskopische Modelle erfordern, sofern sie korrekt eingesetzt werden, eine hohe Anzahl von Berechnungsläufen, um ein statistisch abgesichertes Ergebnis zu liefern. Da makroskopische Modelle keine Einzelpersonen modellieren, stehen entscheidungsrelevante Attribute der einzelnen Verkehrsteilnehmer sowie Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer aus vorherigen Modellstufen nicht zur Verfügung, z.B. die Wohnorte der Personen, die über eine Strecke fahren.

2.3.5 Berücksichtigung zeitlicher Veränderlichkeit

Daten in einem Verkehrsnachfragemodell können ohne konkreten Zeitbezug und mit Zeitbezug abgebildet werden:

- Nachfrage: Nachfrage eines ganzen Tages oder Nachfrage differenziert nach Tageszeitintervallen (z.B. Stunden).
- Kapazität einer Verkehrsanlage: mittlere Kapazität des Tages oder Kapazität einer Stunde.
- ÖV-Angebot: mittlere Fahrzeit und Takt in einem Zeitraum oder genauer Fahrplan.
- Reisezeiten: mittlere Reisezeiten eines Tages oder Reisezeiten differenziert nach Tageszeitintervallen.

Verkehrsnachfragemodelle oder Modellstufen, die den Zeitbezug nicht berücksichtigen, werden als statische Modelle bezeichnet, Modelle mit Zeitbezug als dynamische Modelle.

2.3.6 Empfehlungen zur Modellstruktur

Modellart 1 (städtisch / regional)

Empfehlungen

- Modelltyp: makroskopisches Nachfragemodell.
- Modellstufen: Erzeugung, Zielwahl, Moduswahl, Umlegung.
- Simultane Verkehrsmodus- und Zielwahl,
- mit Rückkopplung.
- Attribute der Nutzenfunktion: Fahrzeit im Verkehrsmittel, Zu- und Abgangszeit, Umsteigewartezeiten, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit, Umsteigehäufigkeit.

Optional

- Zusätzlich mikroskopisches Modell.
- Abfahrtszeitwahl, wenn tageszeitabhängige Nachfragekenngrößen erforderlich sind.
- Dynamische Umlegung.
- Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten, Parksuchzeit, Parkkosten.

Modellart 2 (grossräumig / national)

Empfehlungen

- Modelltyp: makroskopisches Nachfragemodell.
- Modellstufen: Erzeugung, Zielwahl, Moduswahl, Umlegung.
- Attribute der Nutzenfunktion: Reisezeit, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit, Umsteigehäufigkeit.

Optional

- Abfahrtszeitwahl, wenn tageszeitabhängige Nachfragekenngrößen erforderlich sind.
- Trip End-Modell (Moduswahl wird bei der Verkehrserzeugung vorgegeben).
- Simultane Verkehrsmodus- und Zielwahl,
- mit Rückkopplung.
- Dynamische Umlegung.
- Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten, Parksuchzeit, Parkkosten, Zu- und Abgangszeit.

2.3.7 Empfehlungen zur Verkehrserzeugung

Hinweise

- Es werden nur Wege abgebildet, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben.
- Die Verkehrserzeugung muss berücksichtigen, dass Zellen am Rand des Untersuchungsraums pro Person weniger Wege erzeugen, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben. Hier entfällt ein grösserer Anteil der Wege, auf Wege in den Ausseraum. Deshalb sind für jede Zelle und für jeden Wegezweck sog. Untersuchungsraumanteile erforderlich.
- Die Zahl der Ortsveränderungen können vom Wohlstand einer Region abhängen und sich mit der Wohlstandsentwicklung in der Prognose ändern. Die Zusammenhänge können durch wohlstandsabhängige Produktionsraten im Modell hinterlegt werden. In der Regel wird dieser Zusammenhang aber besser durch die PW-Verfügbarkeit abgebildet.
- Es ist zu klären, ob dienstliche Wege im Personenverkehrsmodell oder in einem Wirtschaftsverkehrsmodell abgebildet werden.

Modellparameter

- Erzeugungsraten: Erzeugungsraten können aus Mobilitätstagebüchern oder aus dem Mikrozensus MZMV abgeleitet werden.
- Anziehungsraten: Für die Ermittlung der von einem Aktivitätenort angezogenen Wege stehen für ausgewählte Einrichtungen (u.a. Grossmärkte, Einzelhandelsgeschäfte, Kultur- und Freizeiteinrichtungen) spezifische Anziehungsraten zur Verfügung.

Empfehlungen

- Die Verkehrserzeugung sollte differenziert nach Wegezwecken erfolgen.
- Wenn eine Prognose erstellt wird, sollte die Verkehrserzeugung zusätzlich Personengruppen unterscheiden.
- Die gewählten Erzeugungsraten, Anziehungsraten und die Untersuchungsraumanteile sollten für jeden Wegezweck im Modell hinterlegt werden.

2.3.8 Empfehlungen zur Zielwahl

Hinweise

- Bei der Zielwahl stellt jede Zelle ein mögliches Ziel dar. Die Zahl der Alternativen ist deshalb um einen Faktor 100 grösser als bei der Modus- und Routenwahl. Aus diesem Grund sind bei der Zielwahl die grössten Ungenauigkeiten zu erwarten.
- Wenn mehrere Personengruppen die gleichen Aktivitätenorte (z.B. Erwerbstätige mit und ohne PW zur Arbeit) aufsuchen, dann müssen die Aktivitätenorte auf geeignete Weise den Personengruppen zugeordnet werden. Hierzu eignen sich personengruppenübergreifende Randsummenbedingungen.
- Zielwahlmodelle können die Realität nur vereinfacht abbilden. Gewachsene Strukturen können für Arbeitswege durch die Einbeziehung einer Pendlermatrix in die Nutzenfunktion berücksichtigt werden.
- Verwaltungsgrenzen können die Zielwahl im Ausbildungsverkehr einschränken, Landesgrenzen die Zielwahl für Arbeits- und Versorgungswege beeinflussen. Das kann im Modell durch relationsspezifische Zuschläge bei den Aufwänden berücksichtigt werden.

Modellparameter

- Die Modellparameter müssen für jede Nachfragegruppe so geschätzt werden, dass modellierte und gemessene Reiseweiten- und Reisezeitverteilungen übereinstimmen.

Empfehlungen

- Für die Wegezwecke Arbeiten und Ausbildung sind Zielwahlmodelle erforderlich, die harte Randsummenbedingungen einhalten.
- Der Aufwand muss mindestens die Reisezeit berücksichtigen. Bei sequentiellen Modellen sollte die mittlere Reisezeit der modellierten Modi, gewichtet mit den relationsspezifischen Modal Split Anteilen herangezogen werden.
- Modelle mit simultaner Ziel- und Moduswahl sind einfachen Zielwahlmodellen vorzuziehen, da so der Aufwand aller Verkehrsmodi (Reisezeit PW, ÖV, usw.) berücksichtigt werden kann.

2.3.9 Empfehlungen zur Moduswahl

<p>Allgemein</p> <p><u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Entfernungsabhängige Verkehrsmittleignung: ÖV kann für kurze Wege häufig nicht sinnvoll genutzt werden. Das kann über eine nichtlineare, entfernungsabhängige Nutzenkomponente berücksichtigt werden, z.B. mit einer logarithmischen Bewertungsfunktion.— Besetzungsgrad: Der Besetzungsgrad kann durch einen eigenständigen Modus PW-Mitfahrer abgebildet werden oder durch wegezweckspezifische Werte vorgegeben werden.— Bedienungshäufigkeit: Der Einfluss der Bedienungshäufigkeit kann über die Startwartezeit (z.B. halbe Fahrzeugfolgezeit) oder über die Anpassungszeit (Differenz zwischen Wunschabfahrtszeit und verfügbarer Abfahrtszeit) in die Moduswahl eingehen. <p><u>Modellparameter</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Die Modellparameter müssen für jede Nachfragegruppe so geschätzt werden, dass modellierte und gemessene Modusanteile im Mittel und entfernungsabhängig übereinstimmen. Hierfür kommt in der Regel die Maximum-Likelihood Methode zum Einsatz.— Wichtige Parameter der Nutzenfunktion können mit Daten aus Mobilitätstagebüchern oder mit den Daten des Mikrozensus MZMV geschätzt werden.— Die Bewertung der Kosten hängt von der Kostenart und der Reiseweite ab.
<p>Modellart 1 (städtisch / regional)</p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Attribute der Nutzenfunktion: Fahrzeit im Verkehrsmittel, Zu- und Abgangszeit, Umsteigewartezeit, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit, Umsteigehäufigkeit.— Verkehrsmittelverfügbarkeit: Verfügbarkeit von ÖV-Abonnement und PW als Teil der Nutzenfunktion über zellenspezifische Faktoren oder über Personengruppen. <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten (Fahrpreise, Treibstoffkosten, Strassen- und Parkplatznutzungsgebühren), Parksuchzeit.
<p>Modellart 2 (grossräumige / nationale)</p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Attribute der Nutzenfunktion: Reisezeit, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit, Umsteigehäufigkeit.— Verkehrsmittelverfügbarkeit: wie Modellart 1 <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten (Fahrpreise, Treibstoffkosten, Strassen- und Parkplatznutzungsgebühren), Parksuchzeit, Zu- und Abgangszeit.

2.3.10 Empfehlungen zur IV-Umlegung

Hinweise

- Einfache Umlegungsmodelle (z.B. Sukzessivverfahren), die nach einer vorgegebenen Anzahl von Iterationen und nicht aufgrund eines Konvergenzkriteriums abbrechen, sind für die Untersuchung von Massnahmen nicht geeignet.
- Mit dem derzeitigen Wissensstand können keine eindeutigen Empfehlungen für deterministische oder stochastische Umlegungsmodelle gegeben werden. Deterministische Verfahren liefern mathematisch eindeutige Lösungen und sind etablierter. Stochastische Verfahren basieren auf den gleichen Entscheidungsmodellen wie die Ziel- und Moduswahl und bieten deshalb aus Sicht der Modelltheorie ein konsistenteres Gesamtmodell.
- Für die Berechnung des deterministischen Nutzergleichgewichts gibt es mehrere Verfahren. Diese Verfahren liefern eindeutige Verkehrsstärken auf den Strecken, können aber zu unterschiedlichen Routen führen. Bei der Wahl eines Umlegungsmodells sollte überprüft werden, ob die Umlegung das Kriterium "Proportionality of Routes" erfüllt.
- Deterministische Gleichgewichtsumlegungen generieren aufgrund der Annahme perfekter Information in Teilräumen oder in Zeiten mit geringer Auslastung für viele Relationen nur eine Route. Das kann besonders in feinmaschigen Netzen zu nicht symmetrischen Netzbelastungen führen, wenn sich die kürzesten Routen im unbelasteten Netz in Hin- und Rückrichtung unterscheiden.
- Höhere Anforderungen an die Konvergenz erhöhen die Rechenzeiten. Bei nicht ausreichender Konvergenz können die Verkehrsstärkedifferenzen zwischen Referenzfall und Planfall grösser sein als die Massnahmenwirkungen. Deshalb ist für alle Modellläufe immer eine vorgegebene Konvergenz einzuhalten. Welche Konvergenz angemessen ist, kann bei der Modelvalidierung überprüft werden.
- Umlegungsmodelle können die Routenwahl besser abbilden, wenn die Unterschiede zwischen der Fahrtzeit im unbelasteten und im belasteten Zustand gross sind (> +20%). Deshalb kann es in der Hauptverkehrszeit sinnvoll sein, nicht den Median der Fahrtzeit abzubilden, sondern einen Zustand, der der Bemessungsstunde des HBS entspricht (80. oder 90. Perzentil der Fahrtzeit).
- Statische Tagesumlegungen ermitteln einen Zustand, den es in der Wirklichkeit nicht gibt, da Fahrtzeiten und Routenwahl tageszeitabhängig sind.

Modellparameter

- Modellparameter, die bei der Kalibrierung angepasst werden können, sind neben den Parametern der Nutzenfunktion die Art der CR-Funktion und die Kapazität.
- Parameter der CR-Funktion: Anpassung über beobachtete Fahrtzeiten.
- Parameter für die Kosten. [7]

Empfehlungen

- Umlegungsmodelle Kfz: Deterministisches oder stochastisches Nutzergleichgewicht, keine Sukzessivumlegung.
- Umlegungsmodelle Rad: Stochastische Umlegung.
- Konvergenz beim deterministischen Nutzergleichgewicht: Duality Gap < 0.0001.
- Konvergenz beim stochastischen Nutzergleichgewicht: Für jede Route soll die Nutzenänderung zwischen zwei Iterationsschritten < 0.001 sein.
- Zeitachse: Quasidynamische Umlegungen oder Umlegungen für ausgewählte Tageszeiten.
- Knotenwiderstände: städtische Netzmodelle sollten immer Fahrtzeiten für Abbiegevorgänge enthalten.

Optional

- Dynamische Umlegung.

2.3.11 Empfehlungen zur ÖV-Umlegung

Hinweise

- Taktbasierte Modelle ermitteln häufig eine zu grosse Umsteigewartezeit. Deshalb sollte der Parameter für die Bewertung der Umsteigewartezeit eher klein gewählt werden.
- Bei fahrplanbasierten Modellen hat die Zeitdifferenz zwischen angebotener Abfahrtszeit und Wunschabfahrtszeit einen grossen Einfluss auf die Wahl. Deshalb sollten die Zeitintervalle klein sein ($\Delta t \leq$ typischer Takt), auch wenn die Nachfrageganglinien nicht in dieser Auflösung vorliegen.

Modellparameter

- Modellparameter, die bei der Kalibrierung angepasst werden können, sind die β -Parametern der Nutzenfunktion. Sie können aus Fahrgastbefragungen, die die Fahrtroute erfassen, oder aus anderen Modellen abgeleitet werden.
- Parameter für die Kosten. [7]

Empfehlungen

- Umlegungsmodelle: Fahrplanbasiert, in städtischen Modellen auch taktbasiert.

Optional

Auslastungsabhängige Umlegung.

2.4 Planungsraum und Untersuchungsraum

Der Planungsraum umfasst den Raum, in dem Massnahmen untersucht werden. Der Untersuchungsraum beinhaltet neben dem Planungsraum den Raum, in dem die Massnahmen Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben. Der Aussenraum dient zur Abbildung der verkehrlichen Interaktion des Untersuchungsraums mit dem „Rest der Welt“.

In einem Verkehrsnachfragemodell wird die Binnenverkehrsnachfrage im Untersuchungsraum modelliert. Ortsveränderungen, die Quelle und / oder Ziel im Aussenraum haben, müssen aus anderen Quellen, z.B. einem nationalen Modell zugespielt werden. Bei diesen Ortsveränderungen sind Quelle, Ziel und Modus vorgegeben, so dass nur die Routenwahl modelliert wird.

2.4.1 Empfehlungen zum Untersuchungsraum

<p>Allgemein <u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Verkehrszellen im Aussenraum sollten nicht direkt an den Grenzen des Untersuchungsraums, sondern an ein vereinfachtes Verkehrswegenetz im Aussenraum angebunden werden.
<p>Modellart 1 (städtisch / regional) <u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Die Abgrenzung des Untersuchungsraums kann über die Pendlerströme erfolgen. Der Untersuchungsraum sollte so gross gewählt werden, dass etwa 70-80% der täglichen Pendlerbeziehungen (ohne Wochenendpendler), die im Planungsraum enden, ihre Quelle im Untersuchungsraum haben. Dabei sind auch grenzüberschreitende Pendlerbeziehungen zu berücksichtigen.
<p>Modellart 2 (grossräumig / national) <u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Bei nationalen Modellen können Planungsraum und Untersuchungsraum der Staatsfläche entsprechen. <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Bei grossräumigen Modellen sollte der Untersuchungsraum sollte so gross gewählt werden, dass etwa 90% der täglichen Pendlerbeziehungen, die im Planungsraum enden, ihre Quelle im Untersuchungsraum haben. Dabei sind auch grenzüberschreitende Pendlerbeziehungen zu berücksichtigen.

2.5 Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur

In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden Daten der Raum- und Siedlungsstruktur (Einwohner nach Alters- oder Personengruppen, Art und Grösse von Aktivitätenorten) auf der Ebene von Verkehrszellen gespeichert. Sie sind Grundlage für die Ermittlung des Verkehrsaufkommens und repräsentieren die Start- und Zielorte von Ortveränderungen. Die Zahl und die Grösse der Verkehrszellen hängen dabei von der Grösse des Untersuchungsraums und vom Einsatzbereich ab. Typische städtische und regionale Verkehrsmodelle haben 500 bis 2'000 Verkehrszellen, grossräumige und nationale Verkehrsmodelle können 10'000 und mehr Zellen haben. Bei nationalen Modellen sind Gemeinden und Stadtteile übliche Einheiten für Verkehrszellen. Eine Verkehrszelle repräsentiert dann im Mittel zwischen 5'000 und 20'000 Einwohner. Bei regionalen und städtischen Modellen sind Verkehrszellen auf der Ebene von Teilgemeinden, Stadtbezirken oder Baublöcken üblich, so dass auf eine Verkehrszelle 500 bis 5'000 Einwohner entfallen.

Verkehrszellen können an einen oder mehrere Netzknoten bzw. Haltestellen angebunden werden. Eine Mehrfachanbindung ist dann erforderlich, wenn eine Zelle mehr als einen Siedlungsschwerpunkt umfasst, wenn es mehrere «Strassenausfahrten» aus der Zelle oder mehrere Haltestellen im Umfeld der Zelle gibt. Bei mehr als einem angebundenen Knoten muss bei der Verkehrsumlegung entschieden werden, über welchen Knoten die Verkehrsnachfrage eingespeist wird. Bei einigen Umlegungsverfahren gibt es die Möglichkeiten, die Wahl der Knoten durch die Vorgabe von Anbindungsanteilen über sog. prozentuale Anbindungen festzulegen.

Die Umlegungsverfahren splitten dann entweder die Nachfragematrix während der Umlegung in eine Zelle pro Anbindungsknoten auf oder arbeiten mit Widerstandszuschlägen. Aus Sicht der Modelltheorie stellen derartige Aufteilungsvorgaben potenzielle Schwachstellen im Modell dar, da Entscheidungen nicht modelliert, sondern vorgegeben werden. Bei der Abwägung zwischen der Zahl der Verkehrszellen und prozentualen Mehrfachanbindungen sollte deshalb geprüft werden, ob prozentuale Anbindungen nicht durch zusätzliche Verkehrszellen vermieden werden können. Die Nutzung von mehreren Anbindungen ohne vorgegebene Anteile erscheint dagegen unproblematisch, führt aber dazu, dass die Verkehrsteilnehmer den für sie günstigsten Netzknoten auswählen.

Verkehrszellen stellen bei der Zielwahl die Menge der Alternativen dar, aus denen die Verkehrsteilnehmer wählen können. Damit die Alternativen möglichst homogene Eigenschaften aufweisen, sind Verkehrszellen mit ähnlichen Grössenordnungen bei den Einwohner- und Arbeitsplatzzahlen wünschenswert. Die Grösse der Verkehrszellen kann im Planungsraum kleiner sein als im restlichen Untersuchungsraum, Sprünge in der Zellengrösse zwischen Planungsraum und restlichem Untersuchungsraum sollten jedoch vermieden werden.

Die Strukturdaten einer Verkehrszelle sind Grundlage für die Verkehrserzeugungsrechnungen. Alle relevanten Strukturdaten (z.B. Einwohner nach Personengruppen, Arbeitsplätze, Einkaufsgelegenheiten) sollten deshalb als Attribute bei den Verkehrszellen hinterlegt werden. Um die Transparenz bei den Strukturdaten zu erhöhen, können singuläre Verkehrserzeuger (z.B. Schulen, Einkaufsgelegenheiten, Freizeitgelegenheiten) als Point of Interest Objekte im Netzmodell abgebildet werden. Die Daten dieser Objekte werden dann vor der Verkehrserzeugungsrechnung der Zelle zugeordnet, in der die Objekte liegen. Bei der Verwaltung der Strukturdaten sollten die Anforderungen der Prognose berücksichtigt werden.

2.5.1 Empfehlungen zur Abbildung Raumstruktur

Allgemein

Hinweise

- Die Zahl der Zellen beeinflusst die Rechenzeit, insbesondere bei der Umlegung. Bei Modellen mit mehr als 1'000 Zellen können die Rechenzeiten für einen kompletten Modelldurchlauf eine Berechnung über Nacht erfordern.
- Bei der Nutzung prozentualer Anbindungen sollte geprüft werden, ob die verwendete Software dafür ein einheitliches Konzept für alle Umlegungsverfahren (IV, ÖV) anbietet, das auch die Kenngrössenermittlung einbezieht.

Empfehlungen

- Die Abgrenzung der Zellen sollte sich an den verfügbaren Strukturdaten orientieren.
- Verkehrszellen sollen im Planungs- und Untersuchungsraum ähnliche Grössenordnungen bei den Einwohner- und Arbeitsplatzzahlen haben. Verkehrszellen können mit zunehmender Entfernung vom Planungsraum nach aussen grösser werden. Sprünge in der Zellengrösse zwischen Planungsraum und restlichem Untersuchungsraum sollten vermieden werden.
- Für jede Verkehrszelle sollte neben den Zellgrenzen die Siedlungsflächen als Polygonobjekte eingepflegt werden.
- Für Flächen, die im Prognosezeitraum entwickelt werden sollen, sind bereits im Analysezustand Verkehrszellen vorzusehen.
- Im Planungsraum sollte die Einspeisung nicht direkt in das Hauptstrassennetz erfolgen.

Modellart 1 (städtisch / regional)

Empfehlungen

- Zellenanzahl: 500 bis 2'000.
- Zellengrösse im Planungsraum:
Siedlungsfläche < 0.5 km²,
Einwohnerzahl < 2'000.
- IV-Anbindungen: Die Anbindungsknoten sollten im Planungsraum innerhalb der Siedlungsfläche liegen. Jeder Siedlungsschwerpunkt soll angebunden werden.
- ÖV-Anbindungen: Es sollten alle Haltestellen in der Zelle angebunden werden und zusätzlich alle Haltestellen, deren Haltestelleneinzugsbereich das Zellenpolygon schneidet.

Optional

- Singuläre Verkehrserzeuger als Point of Interest Objekte abbilden.
- Zellen im Planungsraum auf Baublockebene.
- Eine Zelle für jeden Siedlungsschwerpunkt, so dass im IV eine Anbindung pro Zelle ausreichend ist.

Modellart 2 (grossräumig / national)

Empfehlungen

- Zellenanzahl: 2'000 bis 10'000.
- Zellengrösse im Planungsraum:
nicht grösser als eine Gemeinde,
- mindestens eine Zelle für jeden Bahnhof (Fernbahn, Regionalbahn).
- IV-Anbindungen: Die Anbindungsknoten sollten in der Verkehrszelle liegen. Siedlungsschwerpunkte sollen angebunden werden.
- ÖV-Anbindungen: Haltestellen des ÖV, die ausserhalb der Verkehrszelle liegen, sollten dann angebunden werden, wenn sie höherrangig sind und ihr Haltestelleneinzugsbereichs das Zellenpolygon schneidet.

Optional

- Grosse Singuläre Verkehrserzeuger (Flughäfen, grosse Arbeitgeber, Hochschulen, Freizeitparks) als Point of Interest Objekte oder als eigene Zellen abbilden.

2.6 Abbildung des Verkehrsangebots

Das Verkehrsangebot bietet den Verkehrsteilnehmern Beförderungsmöglichkeiten mit Verkehrsmitteln in Form von Routen oder tageszeitabhängigen Verbindungen. Die Menge der Beförderungsmöglichkeiten wird im Verkehrsnachfragemodell ermittelt. Jede Beförderungsmöglichkeit wird durch Attribute (u.a. Modus, Reisezeit, Kosten, Umsteigehäufigkeit) beschrieben. Dazu wird das Verkehrsangebot in einem sog. Netzmodell, das Teil des Nachfragemodells ist, abgebildet.

2.6.1 Verkehrsmittel und Verkehrsmodi

Die Menge der im Netzmodell abgebildeten Verkehrsmittel und Modi (= Menge von Verkehrsmitteln) bestimmt die Menge der Beförderungsmöglichkeiten, die den Verkehrsteilnehmern zur Verfügung stehen. Modi, für die mit einer Umlegung die Verkehrsstärke im Netz ermittelt werden soll, müssen im Netzmodell mit dem zugehörigen Verkehrswegenetz kodiert werden. Für Modi, die nicht umgelegt werden sollen (z.B. Fuss), kann eine vereinfachte Ermittlung der Reisezeiten über die Luftlinien- oder Strassennetzentfernung und typische Geschwindigkeiten erfolgen.

- Ein grossräumiges Nachfragemodell wird in der Regel die Modi PW und ÖV-Schiene abbilden, bei Bedarf auch den Modus Flugzeug.
- Ein regionales Model sollte mindestens die Modi PW, ÖV, Rad und Fuss unterscheiden.

Die Aufteilung des Modus PW in PW-Selbstfahrer und PW-Mitfahrer ermöglicht eine bessere Berücksichtigung der Führerscheinverfügbarkeit. Ausserdem müssen dann Personenfahrten nicht in Fahrzeugfahren umgerechnet werden. Der Modus PW-Mitfahrer ist jedoch nur eingeschränkt geeignet, Wirkungen von Ridesharing abzubilden, da sich PW-Mitfahrer in der Regel auf Familienmitglieder oder Bekannte beziehen. Um Ridesharing abzubilden, ist ein eigener Sharingmodus mit differenzierten Preisen sinnvoller.

2.6.2 Strassennetz

Die Bedeutung einer Strasse ergibt sich aus der Funktion der Strasse im Netzzusammenhang. Da sich die Funktion einer Strasse nicht immer ausreichend aus den Zuständigkeiten (Nationalstrassen, Kantonsstrassen, Gemeindestrassen) oder aus dem Ausbauzustand ableiten lassen, nutzen Datenmodelle den Begriff der Strassenfunktionsklasse (Functional Road Class). Das Netzmodell sollte im Untersuchungsraum immer mindestens eine Strassenfunktionsklasse mehr abbilden als das Netz, das Gegenstand der Planung ist. Soll das Modell für die Planung von Radwegenetzen eingesetzt werden, müssen ausserdem alle für den Radverkehr geeigneten Strecken in das Netzmodell integriert werden. Strassen mit Radverkehrsanlagen müssen durch geeignete Attribute gekennzeichnet werden.

Die Knoten und Strecken eines Strassennetzes können mit einem einfachen oder komplexen Netzmodell abgebildet werden:

Einfache Netzmodelle:

Richtungsfahrbahnen von Strassen werden als eine Kante mit Hin- und Rückrichtung dargestellt. Alle Knotenpunkte im Verkehrsnetz werden durch einen Modellknoten abgebildet. Rampenstrecken sind nicht oder nur bei Hochleistungsstrassen im Netzmodell enthalten.

Komplexe Netzmodelle:

Komplexe Netzmodelle sind so konzipiert, dass sie für Navigationszwecke genutzt werden können. Deshalb werden bei Strassen mit getrennten Richtungsfahrbahnen die Hin- und Rückrichtung als räumlich getrennte Kanten modelliert. Grosse Knotenpunkte werden in Teilknoten unterteilt und planfreien Knoten werden mit ihren Rampen abgebildet.

Für die Zwecke der Verkehrsnachfragemodellierung bieten einfache Netzmodelle Vorteile, da sie eine einfachere Abbildung von Knotenpunkten, Haltestellen und Radwegen ermöglichen. Sie benötigen ausserdem weniger Rechenzeit und Speicherplatz. Da Fahrzeitmessungen meist nur auf Navigationsnetzen verfügbar sind, kann für die Validierung von Fahrzeiten ein Netzmatching erforderlich sein. Komplexe Netzmodelle erfordern für die Abbildung von Knotenwiderständen besondere Lösungen, bei denen die Teilknoten zu einem Hauptknoten aggregiert werden. Auch für die Lärmberechnung, die Verkehrsstärken aus Hin- und Rückrichtung benötigt, sind bei komplexen Netzen zusätzliche Attribute erforderlich, die die Hin- und Rückrichtung miteinander verknüpfen.

Zeitaufwände an Knoten, die sich aus der Art der Steuerung ergeben (z.B. Grundwartezeit einer Lichtsignalanlage) oder aufgrund von Kapazitätsbegrenzungen (Reststauwartezeit) können in Verkehrsnachfragemodellen durch konstante oder auslastungsabhängige Abbiegewiderstände nachgebildet werden. Abbiegewiderstände beeinflussen die Routenwahl und sind deshalb für die Abbildung der Routenwahl in engmaschigen Netzen erforderlich. Deshalb sollten in engmaschigen Netzen mindestens konstante Abbiegewiderstände vorgesehen werden. Soll das Modell zur Ermittlung von Verkehrsstärken für die Bemessung von Knotenpunkten verwendet werden, müssen Abbiegewiderstände kapazitätsabhängig ermittelt werden. Das erfordert die Angabe von Fahrstreifenzahl, Fahrstreifenaufweitungen und Grünzeitanteilen.

Die Eigenschaften der Strasse müssen durch geeignete Attribute (Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss differenziert nach PW und LW, Stundenkapazität, Tageskapazität, ggf. Steigung und Menge der zugelassenen Verkehrsmittel) beschrieben werden.

SFK	Beschreibung
0	Fernstrassen zur Verbindung von Metropolregionen (i.d.R. Autobahnen)
1	Fernstrassen zur Verbindung von grossstädtischen Zentren
2	Überregionale Strassen zur Verbindung mittelstädtischer Zentren
3	Regionale Strassen zur Verbindung von Kleinzentren
4	Nahräumige Strassen zur Verbindung von Orten ohne Zentralität
5	innerörtliche Hauptsammelstrassen
6	innerörtliche Sammelstrassen
7	innerörtliche Anliegerstrassen
>7	Forstwege, Radfahrstrassen, Fusswege

Tabelle 3: Unterteilung von Strassen in Strassenfunktionsklassen (SFK)

2.6.3 ÖV-Angebot

Das ÖV-Angebot wird durch eine Menge von Haltestellen und Linien abgebildet. Eine Linie umfasst den Linienweg, die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und das Fahrtenangebot. Das Fahrtenangebot kann vereinfacht durch die Angabe eines Taktes oder durch die genauen Abfahrtszeiten beschrieben werden. Bei der Übernahme der ÖV-Daten aus einem Fahrplanauskunftssystem muss ein repräsentativer Tag für den Fahrplan ausgewählt werden.

Ein städtisches / regionales Verkehrsnachfragemodell sollte im Untersuchungsraum das komplette ÖV-Angebot eines typischen Werktages abbilden. Beim Fahrplan kann die Angabe eines Taktes genügen, da in Städten die Fahrzeugfolgezeiten kurz sind und Umsteigewartezeiten deshalb geringere Bedeutung haben. Verkehrszellen können direkt an die Haltestellen oder für die Zwecke der Haltestellenplanung an das Fusswegenetz angebunden werden.

In einem grossräumigen / nationalen Modell genügt es, das Angebot im Bahnverkehr (ohne U-Bahn und Tram) und ggf. im Fernbusverkehr abzubilden. Liegt in einer Verkehrszelle kein Bahnhof, kann die Anbindung mit mittleren Fahrzeiten des lokalen ÖV ohne Angabe von Linienwegen erfolgen.

Das ÖV-Angebot kann in einem eigenen Netzmodell oder in einem integrierten Netzmodell gehalten werden. Für die Darstellung in Karten und für einen Abgleich von PW-Fahrtzeiten und Bus-Fahrtzeiten ist ein integriertes Netzmodell vorteilhaft. Das strassengebundene ÖV-Angebot lässt sich in komplexe Netzmodelle nur dann gut integrieren, wenn die Haltestellen in Haltepunkte aufgelöst werden.

2.6.4 Nutzungsgebühren

Verkehrsnachfragemodelle, die die Wirkungen von monetären Massnahmen abbilden sollen, müssen für jede Beförderungsmöglichkeit Preise ermitteln. Dazu müssen Strassenbenutzungsgebühren, Parkgebühren und ÖV-Fahrpreise im Netzmodell abgebildet werden.

- Entfernungsabhängige Strassenbenutzungsgebühren oder Durchfahrtsgebühren für eine Einzelstrecke können direkt an der Strecke hinterlegt werden.
- Gebietsbezogene Einfahrtsgebühren können über Kosten auf Abbiegern in das Gebiet kodiert werden.
- Parkgebühren können als Attribute einer Verkehrszelle kodiert werden. Die Gebühren können dabei nach Wegezweck differenziert werden.

- ÖV-Fahrpreise erfordern die Abbildung des Tarifsystems mit Fahrkartenarten (Einzelticket, ÖV-Abonnement) basierend auf Entfernungen oder Zonen.

2.6.5 Empfehlungen zur Abbildung Verkehrsangebot

Allgemein

Hinweise

- Sollen Wirkungen von Ridesharing abgebildet werden, ist hierfür ist ein eigener Sharingmodus mit differenzierten Preisen und Fahrzeugkapazitäten vorzusehen. Derzeit fehlen allerdings Erkenntnisse über die Bereitschaft Ridesharing zu nutzen.
- Strassen im untergeordneten Netz werden von LW-Durchgangsverkehr auch dann nicht genutzt, wenn im übergeordneten Strassennetz Massnahmen mit Geschwindigkeitsreduktionen eingeführt werden. Deshalb sollten die Streckenwiderstände für LW im untergeordneten Netz bereits im Analysezustand durch ein geeignetes Streckenattribut erhöht werden.

Empfehlungen

- Für die Beschreibung der Strassenklasse nach Zuständigkeiten (Strasseneigentümer) und für die Beschreibung der technischen Eigenschaften der Strasse (zul. Geschwindigkeit, Anzahl Fahrstreifen, Kapazität) sollten zwei unterschiedliche Attribute verwendet werden.
- Bei Verkehrsnachfragemodellen, mit denen sowohl Stundenumlegungen als auch Tagesumlegungen durchgeführt werden, sollten Stundenkapazitäten und Tageskapazitäten hinterlegt werden.

Modellart 1 (städtisch / regional)

Empfehlungen

- Modi: PW, ÖV Schiene & Strasse, Rad, Fuss, LW.
- Strassennetz: einfache Abbildung ohne komplexe Knoten, mindestens alle Strassen bis zur Strassenfunktionsklasse (SFK) 6 und alle vom ÖV befahrenen Strassen.
- Knotenwiderstände: kapazitäts- und steuerungsabhängige Abbiegezeiten.
- ÖV-Angebot: alle ÖV-Verkehrsmittel, Fahrplan eines typischen Werktags.
- Integriertes Netzmodell Strasse und ÖV.

Optional

- Modus PW-Mitfahrer,
- Radwegenetz,
- Fusswege zur ÖV-Haltestelle,
- Nutzungsgebühren.

Modellart 2 (grossräumig / national)

Empfehlungen

- Modi: PW, ÖV Schiene, LW.
- Strassennetz: einfache Abbildung ohne komplexe Knoten, mindestens alle Strassen bis zur Strassenfunktionsklasse (SFK) 4.
- ÖV-Angebot: alle ÖV-Schiene, Fahrplan eines typischen Werktags.

Optional

- Modus PW-Mitfahrer und Flugzeug,
- Integriertes Netzmodell Strasse und ÖV,
- Knotenwiderstände,
- Nutzungsgebühren.

2.7 Abbildung der Verkehrsnachfrage

Die Attribute einer Ortsveränderung (Reiseweite, Abfahrtszeitpunkt, gewählter Verkehrsmodus) werden im Personenverkehr massgeblich von Eigenschaften der Person (z.B. Verfügbarkeit PW und ÖV-Abonnement) und dem Wegezweck bestimmt. Bei makroskopischen Modellen ist es deshalb üblich, die Verkehrsnachfrage mindestens nach Wegezwecken zu segmentieren. Eine weitere Segmentierung in verhaltenshomogenen Personengruppen kann die Transparenz und die Aussagekraft des Modells erhöhen. Tabelle 4 zeigt mögliche Segmentierungen für Wegezwecke, Tabelle 5 für Personengruppen.

In den einzelnen Modellstufen können unterschiedliche Segmentierungen sinnvoll oder erforderlich sein:

- Verkehrserzeugung: Die Mobilitätsraten für einen Wegezweck (z.B. Einkaufen) sind von der Personengruppe abhängig. Deshalb soll die Segmentierung Personengruppen und Zwecke umfassen.
- Verkehrsverteilung: Die Wahl des Aktivitätenortes und Bereitschaft für die Durchführung einer Aktivität einen gewissen Aufwand in Kauf zu nehmen, hängt von der Art der Aktivität ab. Deshalb ist eine Segmentierung nach Zwecken erforderlich.
- Verkehrsmoduswahl: Die Verkehrsmoduswahl wird massgeblich von der Verfügbarkeit eines PW oder eines ÖV-Abonnements beeinflusst. Die Verfügbarkeit kann entweder durch die Segmentierungen in Personengruppen oder durch zellenspezifische Attribute abgebildet werden. Für die Zielwahl- und die Moduswahl sollte die gleiche Segmentierung gewählt werden.
- Abfahrtszeitwahl: Für jeden Aktivitätenübergang (z.B. Wohnen-Arbeiten oder Arbeiten-Einkaufen) können spezifische Tageszeitganglinien hinterlegt werden.
- Umlegung: Für die Umlegung werden die Nachfragematrizen der einzelnen Segmente häufig zusammengefasst. In speziellen Anwendungsfällen kann es sinnvoll sein, spezifische Eigenschaften einer Route (Kosten, Umsteigehäufigkeit) durch eine Segmentierung bei der Routenwahl zu berücksichtigen.

Weitere Eigenschaften des Mobilitätsverhaltens, die sich aus dem Wohnort ergeben (Stadt, Land) können bei der Nachfragemodellierung entweder durch eine weitere Segmentierung der Nachfrage oder durch zellen- und relationsspezifische Variablen in der Nutzenfunktion berücksichtigt werden.

Für jedes Nachfragesegment müssen für jede Modellstufe Parameter gesetzt oder unter Nutzung von Daten aus Mobilitätsbefragungen geschätzt werden. Für eine Schätzung müssen für jedes Segment eine ausreichende Menge an Datensätzen zur Verfügung stehen. Das ist bei der Segmentierung der Nachfrage bzw. beim Design einer Mobilitätsbefragung zu beachten.

Wegezwecke Segmentierung 1	Wegezwecke Segmentierung 2
Wohnen	Wohnen
Arbeiten	Arbeit qualifiziert
	Arbeit einfach
	Arbeit selbständig
	Arbeit Teilzeit
Ausbildung	Kindergarten, Vorschule
	Ausbildung Grundschule
	Ausbildung weiterführende Schule
	Ausbildung Berufsschule
	Ausbildung Hochschule
Einkaufen	Einkaufen täglicher Bedarf
	Einkaufen sonstige Waren
Freizeit, private Erledigung	private Erledigung (Arzt, Bank, Post)
	Freizeit (Besuche)
	Freizeit (Restaurant, Kultur)
	Freizeit (Sport, Grünanlagen)
	Freizeit (Tagesausflug)
Sonstige	Rundwege
	Bringen/Holen

Tabelle 4: Beispiele für eine Segmentierung von Wegezwecken

Personengruppen Segmentierung 1	Personengruppen Segmentierung 2	Segmentierung nach PW- und Abo-Verfügbarkeit
Kinder (0-6 Jahre)	Kinder (0-6 Jahre)	
Personen in der Ausbildung	Grundschüler	
	Schüler	
	Lernende	
	Studenten	<input checked="" type="checkbox"/>
Erwerbstätige	Angestellte qualifiziert	<input checked="" type="checkbox"/>
	Angestellte einfach	<input checked="" type="checkbox"/>
	Selbständige und freiberuflich Tätige	<input checked="" type="checkbox"/>
	Teilzeitbeschäftigte	<input checked="" type="checkbox"/>
Nicht Erwerbstätige	Arbeitslose	<input checked="" type="checkbox"/>
	Hausmann/-frau	<input checked="" type="checkbox"/>
Rentner	Rentner ≤ 75	<input checked="" type="checkbox"/>
	Rentner > 75	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 5 Beispiele für eine Segmentierung von Personengruppen

2.7.1 Empfehlungen zur Abbildung der Nachfrage

<p>Allgemein</p> <p><u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Für jedes Nachfragesegment müssen für jede Modellstufe Parameter gesetzt oder unter Nutzung von Daten aus Mobilitätsbefragungen geschätzt werden. Für eine Schätzung müssen für jedes Segment eine ausreichende Menge an Datensätzen zur Verfügung stehen. Das ist bei der Segmentierung der Nachfrage bzw. beim Design einer Mobilitätsbefragung zu beachten.
<p>Modellart 1 (städtisch / regional)</p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Mindestens folgende Wegezwecke: Wohnen, Arbeit, Ausbildung Schule, Ausbildung Hochschule, Einkaufen täglicher Bedarf, Einkaufen sonstiger Bedarf, Freizeit, Sonstiges.— Verfügbarkeit PW und ÖV-Abonnement über Personengruppe oder Zellenattribut. <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Personengruppen aus Tabelle 5.— Weitere Wegezwecke aus Tabelle 4.— Für Modelle in touristischen Regionen eine weitere Personengruppe Feriengast mit zugehörigen Wegezwecken Anreise, Abreise, Ferienausflug.— bei fehlenden Daten: Mobilitätsbefragung.
<p>Modellart 2 (grossräumig / national)</p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Mindestens folgende Wegezwecke: Wohnen, Arbeit, Ausbildung, Einkaufen, Freizeit, Sonstiges.— Verfügbarkeit PW und ÖV-Abonnement über Personengruppe oder Zellenattribut. <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Personengruppen aus Tabelle 5.— Weitere Wegezwecke aus Tabelle 4.— Einen oder mehrere weitere Wegezwecke für den Fernverkehr.— bei fehlenden Daten: Mobilitätsbefragung.

2.8 Eventverkehr, Wirtschaftsverkehr und externer Verkehr

Ein Verkehrsnachfragemodell für den privaten Personenverkehr bildet alle Ortsveränderungen privater Personen mit Quelle und Ziel im Untersuchungsraum ab. Damit fehlen Ortsveränderungen aus besonderen Events (z.B. Messe), des Personenwirtschaftsverkehrs (dienstliche Wege), des Güterverkehrs und des externen Verkehrs, dessen Quelle und / oder Ziel ausserhalb des Untersuchungsraums liegen. Eventverkehre, dienstliche Wege und der Güterverkehr innerhalb des Untersuchungsgebiets können in das Verkehrsnachfragemodell integriert werden. Der externe Verkehr muss aus anderen Modellen oder Erhebungen übernommen werden.

2.8.1 Empfehlungen zum sonstigen Verkehr

<p>Allgemein</p> <p><u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Eventverkehre müssen dann im Modell berücksichtigt werden, wenn für die zusätzliche Nachfrage besondere Massnahmen geplant und untersucht werden sollen.— Verkehre aus externen Quellen müssen auf die Verkehrszellen des Untersuchungsraumes aufgeschlüsselt werden. Sie sind nicht prognosefähig.— Zur Validierung des externen Verkehrs sollten im Strassenverkehr an Kordonquerschnitten Zählungen durchgeführt werden.— In städtischen und regionalen Modellen genügt im Güterverkehr die Berücksichtigung des Strassengüterverkehrs.
<p>Modellart 1 (städtisch / regional)</p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Eventverkehre als einen eigenen Wegezweck im Personenverkehrsmodell abbilden.— Personenwirtschaftsverkehr als einen eigenen Wegezweck im Personenverkehrsmodell abbilden.— Der Güterverkehr wird durch ein einziges Nachfragesegment mit dem Fahrzeugtyp LW abgebildet. <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Personenwirtschaftsverkehr aus einem Wirtschaftsverkehrsmodell.— Strassengüterverkehr aus einem Wirtschaftsverkehrsmodell mit differenzierten Branchen und Fahrzeugtypen.
<p>Modellart 2 (grossräumig / national)</p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Personenwirtschaftsverkehr als einen eigenen Wegezweck im Personenverkehrsmodell abbilden.— Der Güterverkehr wird durch ein einziges Nachfragesegment mit dem Fahrzeugtyp LW abgebildet. <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none">— Güterverkehr aus einem Wirtschaftsverkehrsmodell mit differenzierten Branchen, Verkehrsträger (Strasse, Schiene, Wasser, intermodal) und Fahrzeugtypen.

2.9 Prognose

Eine Verkehrsprognose baut auf einem validierten Verkehrsnachfragemodell auf, das den Analysezustand beschreibt. Die Erstellung einer Prognose umfasst in der Regel die folgenden Schritte:

- Festlegung eines Prognosezeitpunkts.
- Fortschreibung der für die Entwicklung des Verkehrs relevanten demographischen Daten, Siedlungsstrukturdaten, Motorisierungsgrade und Nutzungskosten für den Prognosezeitpunkt.
- Erfassung der für die Entwicklung des Verkehrs bedeutsamen und bis zum Prognosezeitpunkt mit hoher Wahrscheinlichkeit realisierten Massnahmen im Verkehrsangebot.
- Erfassung externer Nachfragedaten für den Prognosezeitpunkt, die mit dem Verkehrsnachfragemodell nicht erzeugt werden können.

- Durchführung der Prognoserechnung und Überprüfung der Plausibilität des Prognoseergebnisses.
- Ermittlung der gewünschten Kenngrößen für den Prognosezustand.

Der so ermittelte Prognosezustand wird als Referenzzustand bezeichnet. Aufbauend auf diesem Referenzzustand können dann mit dem Verkehrsnachfragemodell die Wirkungen ausgewählter Massnahmen oder Entwicklungen berechnet werden. Diese Zustände werden dann als Planfälle oder Szenarien bezeichnet.

2.9.1 Empfehlungen zur Prognose

Hinweise

- Die Nummerierung der Netzobjekte darf sich zwischen Analyse und Prognose nicht ändern, da sonst keine Vergleiche und Differenzdarstellungen möglich sind.
- In der Analyse und in der Prognose werden die Modellparameter beibehalten. Eventuelle Änderungen der Parameter sind zu begründen.
- Wenn Strukturdaten über Point of Interest Objekte abgebildet werden, dann müssen neue Standorte durch zusätzliche Objekte in das Netzmodell eingepflegt werden. Da die genauen Standorte zum Zeitpunkt der Prognoseerstellung oft nicht bekannt sind, können virtuelle Standortprojekte eingefügt werden.
- Wenn für den Prognosezeitpunkt für neue ÖV-Linien nur Takte, aber keine Fahrpläne vorliegen, dann können Umsteigewartezeiten nicht genau berechnet, sondern nur abgeschätzt werden. In diesem Fall sind sowohl im Analysezustand als auch im Prognosezustand taktfeine Umlegungsverfahren anzuwenden. Alternativ können fahrplanfeine Umlegungsverfahren zum Einsatz kommen. Hier muss in der Nutzenfunktion der Faktor der Umsteigewartezeit auf 0 und der Faktor für die Umsteigehäufigkeit erhöht werden. Ein ähnlicher Effekt kann für die Moduswahl auch dadurch erreicht werden, dass die Matrix der Umsteigewartezeit aus dem Analysezustand übernommen wird.
- Veränderungen der Strukturgrößen (Arbeitsplätze, Schulplätze, Einkaufsgelegenheiten) verändern in Verkehrsnachfragemodellen die Zielwahl, aber nicht das Verkehrsaufkommen (Zahl der Wege).
- Bei veränderten Einwohnerzahlen sollte geprüft werden, ob Ausbildungseinrichtungen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge angepasst werden müssen.
- Externe Nachfragematrizen, für die es keine Prognosematrix gibt, müssen auf geeignete Weise fortgeschrieben werden.
- Nachfragematrizen, die bei der Modellkalibration mit einem Matrixkorrekturverfahren an Zählwerte angepasst wurden, sind nicht prognosefähig. Werden diese Matrizen in der Prognose beibehalten, dann muss sichergestellt werden, dass die Nachfragematrizen für die Umlegung keine negativen Werte enthalten.

Empfehlungen

- Für Flächen, die im Prognosezeitraum entwickelt werden sollen, sind bereits im Analysezustand Verkehrszellen vorzusehen.
- Geplante Infrastrukturmassnahmen sind im Netzmodell durch geeignete Massnahmennummern zu kennzeichnen. Die Massnahmen können dann zu Szenarien gebündelt werden.
- Die Modellrechnungen (Auswahl der Massnahmen, setzen der Strukturgrößen) und die Modellauswertungen sollten ausgehend vom Bezugsfall automatisiert ohne manuelle Eingriffe durchgeführt werden, so dass die Modellrechnungen reproduzierbar sind.

Optional

- Korrekturmatriizen in der Prognose nicht berücksichtigen. Die Verkehrsleistung der Korrekturmatriix im Analysezustand ausweisen und bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen.
- Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle für die Prognose des zukünftigen Motorisierungsgrads und Abo-Besitzes.

2.10 Datenquellen

Eine wichtige Voraussetzung für die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells sind qualitativ hochwertige Daten in der für die angestrebte Modellgranularität erforderlichen räumlichen und

zeitlichen Auflösung. Für die Schweiz haben sich die folgenden Datenquellen bei dem Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen bewährt:

Modellierungsschritt	Datenquelle
Aufbau Verkehrszonen	Gemeindepolygone: BFS
	NUTS-Polygone: Eurostat
Strassennetz	Navigationsanbieter
	OpenStreetMap
	TLM Netz von swisstopo
Schienennetz	BAV
	SBB
Fahrplan	Systemfahrplan der SBB
	Hafas Fahrplan: opentransportdata.swiss
Strukturdaten	Bevölkerung: BFS (STATPOP)
	Arbeitsplätze: BFS (STATENT)
	PW-Besitz: ASTRA (MOFIS)
	ÖV-Abos: SBB, Verkehrsverbände
	Übrige: ARE, eigene Recherche
Verkehrsverhalten	Mikrozensus Mobilität und Verkehr: BFS
	SP-Befragung des MZMV
	Spezifische Befragungen
	Literatur, andere Modelle
Zähldaten	Strasse: ASTRA, Kantone
	Schiene: SBB
	ÖPNV: Verkehrsverbände
Prognose	Bevölkerungsszenarien: BFS
	Weitere Strukturdaten und Verhaltensparameter: Verkehrsperspektiven: ARE

Tabelle 6 Potenzielle Datenquellen für die Schweiz

3. Hinweise zur Qualitätssicherung von Verkehrsnachfrage- modellen

3.1 Gütemasse für die Überprüfung der Modellergebnisse

Damit der Nachweis der Validität eines Modells erbracht werden kann, müssen die Abweichungen zwischen Modellwerten m (m =Modell) und Messwerten c (c =Count) durch geeignete statistische Gütemasse quantifiziert und bewertet werden. Der Vergleich von Modell- und Messwerten kann sich auf Einzelwerte, Mengen von Einzelwerten und Verteilungen beziehen.

3.1.1 Einzelwerte

Bei der Überprüfung von Einzelwerten wird ein einzelner Modellwert m mit einem Messwert c verglichen. Für jedes Wertepaar wird eine Aussage über die Güte der Übereinstimmung gemacht. Beispiele für Einzelwerte sind Verkehrsstärken an einer Zählstelle, Fahrzeiten auf einer Route oder mittlere Reisezeiten für einen Wegezweck. Um die Übereinstimmung zu quantifizieren, kann die absolute oder die relative Abweichung des betrachteten Wertepaares herangezogen werden. Da an grössere Werte (z.B. Verkehrsstärken) höhere Anforderungen an die relative Abweichung zu stellen sind als an niedrige Werte, wird ein Gütemass herangezogen, bei dem die zulässige relative Abweichung mit steigendem Wertebereich sinkt. Das Gütemass wird als Scalable Quality Value (SQV) bezeichnet und mit folgender Formel ermittelt:

$$g_{sqv} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c}}}$$

mit

a Betrag der absoluten Abweichung, $a = |m - c|$

m Modellwert

c Messwert

f Skalierungsfaktor

Der Skalierungsfaktor f ermöglicht die Anpassung der Formel an den Wertebereich der zu beurteilenden Kenngrösse. So können Messwerte der gleichen Grössenordnung (z.B. eine gezählte Verkehrsstärke $c=1'000$) abhängig vom Bezugszeitraum (Stunde oder Tag) unterschiedlich bewertet werden.

Die Übereinstimmung zwischen Modellwert und Messwert ist dann ausreichend, wenn folgende Bedingungen eingehalten werden:

g_{SQV}	Beurteilung
0.90	Sehr gute Übereinstimmung. Diese Werte könnten z.B. nach einer Matrixkorrektur gefordert werden.
0.85	Gute Übereinstimmung
0.80	Akzeptable Übereinstimmung

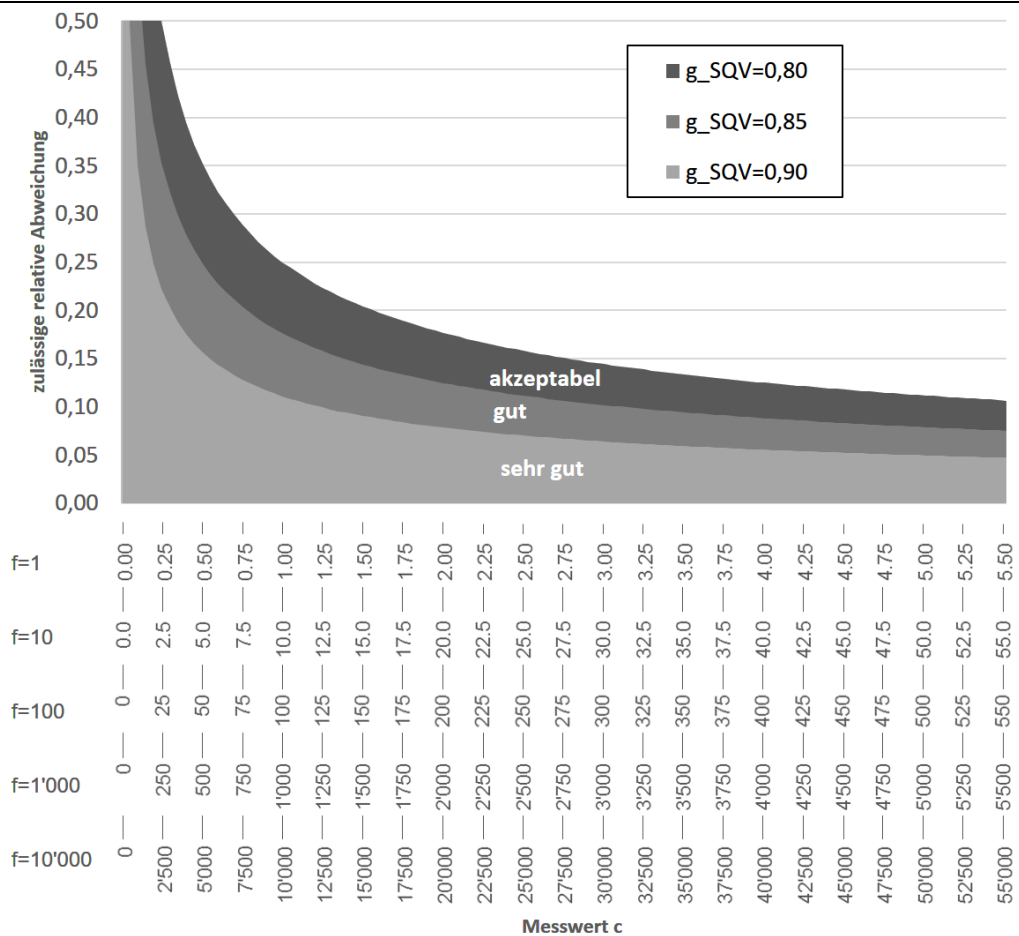
Tabelle 7 Qualitätsbereiche des g_{SQV}

Abbildung 2 zeigt die maximal zulässige relative Abweichung vom Messwert c für drei Ausprägungen des Gütemasses SQV . Die Messwertachse nimmt in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor f unterschiedliche Grössenordnungen an. Die Tabelle unter der Abbildung enthält Werte für den Skalierungsfaktor f für ausgewählte Kenngrössen.

Es ist dabei jedoch zu beachten, dass die Wertebereiche für «sehr gute», «gute» oder «akzeptable» Qualität vorerst als Orientierungswerte zu verstehen sind. Dem Besteller eines Verkehrsnachfragemodells steht es frei, bestimmte Grenzwerte unter Kenntnis der genauen Anforderungen an das Modell und die Datenverfügbarkeit festzulegen. Für eine allgemeine Festlegung von Grenzwerten ist derzeit noch zu wenig darüber bekannt, welche Modellwerte in der Realität tatsächlich erreicht werden können. Hierzu sollten in den nächsten Jahren Hinweise der Nutzer gesammelt werden, welche dann bei der Formulierung verbindlicher Richtlinien verwendet werden können.

Das Gütemass SQV eignet sich zur Beurteilung von Verkehrsstärken und personenbezogene Mobilitätskenngrössen (Zahl der Wege, mittlere Wegezeit), aber nicht zur Beurteilung von Prozentwerten und Fahrzeiten zwischen zwei Punkten im Netz:

- Prozentwerte des Modal Split: Stattdessen wird die Kenngrösse Wege pro Person und Modus herangezogen.
- Fahrzeiten zwischen zwei Punkten im Netz: Sie beziehen sich nicht auf den Weg einer Person, sondern auf einen Streckenzug oder eine Route. Aussagen zur Beurteilung von Fahrzeiten finden sich in Abbildung 3. Die Fahrzeiten können sich auf Streckenzüge oder auf Quelle-Ziel-Relationen beziehen. Die Aussagen sind unabhängig davon, ob es sich um Fahrzeiten im unbelasteten oder belasteten Netz handelt.



Kenngrösse	Einheit	f	c	zulässige absolute Abweichung bei		
				$g_{SQV} = 0.90$	$g_{SQV} = 0.85$	$g_{SQV} = 0.80$
Verkehrsstärke Tag	[Fz / d]	10'000	10'000	1'142	1'844	2'661
Verkehrsstärke Stunde	[Fz / h]	1'000	1'000	114	184	266
Anz. Wege pro Person	[Wege / d]	1.0	1.0	0.1	0.2	0.3
Anz. Wege pro Person x Modus	[Wege / d]	1.0	1.0	0.1	0.2	0.3
mittlere Wegeweite	[km]	10	10	1.1	1.8	2.7
mittlere Wegezeit	[min]	30	30	3.4	5.5	8.0

Abbildung 2 Bewertung der Abweichung für Einzelwerte mit dem Gütemass SQV.

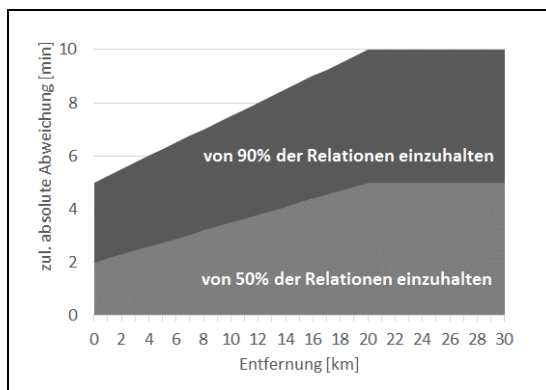


Abbildung 3 Bewertung der Abweichung für Einzelwerte von Fahrzeiten.

In die Klasse der Einzelwerte fallen auch Aussagen, für die mit einem Ja/Nein-Test überprüft wird, ob eine Anforderung erfüllt wird.

- Liegt ein Wert im erwarteten Wertebereich?
- Erfüllt das Modell eine geforderte Konvergenzbedingung?
- Erfüllt das Modell eine geforderte Konsistenzbedingung?

3.1.2 Mengen von Einzelwerten

Der Vergleich von Mengen von Einzelwerten untersucht eine Menge von modellierten und gemessenen Wertepaaren und führt zu Aussagen über die Güte der Menge. Die betrachteten Wertepaare sollten dabei (weitgehend) unabhängig voneinander sein. Beispiele für Wertemengen sind Verkehrsstärken an mehreren Zählstellen oder Fahrzeiten über mehrere Relationen. Um statistische Gütemasse für Mengen von Einzelwerten anhand vorgegebener Sollwerte bewerten zu können, müssen die Einzelwerte in Werteklassen gruppiert werden. Sammer et al. [1] geben einige Hinweise für die Klassenskalierung:

- Es sollen mindestens 3 (besser 5) Klassen vorhanden sein.
- Jeder Klasse sollen mindestens 10 Elemente (z.B. Messquerschnitte) zugeordnet werden können, um einen Mindeststichprobenumfang sicherzustellen und dadurch eine Normalverteilung annehmen zu können. Befinden sich weniger als 10 Elemente in einer Klasse, so ist diese mit den benachbarten Klassen zusammenzufassen.
- Das arithmetische Mittel der Elemente einer Klasse sollte ungefähr der Klassenmitte entsprechen.
- Um mehrere Planfälle und Modelle besser vergleichen zu können, wird eine einheitliche Klasseneinteilung für Verkehrsstärken vorgeschlagen.

Um die Übereinstimmung der modellierten und gemessenen Wertemengen – insbesondere Verkehrsstärken – zu bewerten, werden häufig die nachstehend erläuterten Gütemasse herangezogen.

- der Korrelationskoeffizient R bzw. das Bestimmtheitsmass R^2 ,
- die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (z.B. RMSE und %RMSE),
- Häufigkeitsverteilungen von Einzelwerten, die den Anteil der Wertepaare angeben, deren Gütemasse in bestimmte Gütemassklassen entfallen.

Für diese Gütemasse gilt, dass sie nur die Menge der Werte einer Klasse beurteilen. Fehlerhafte Einzelwerte können dabei übersehen werden, obwohl sie z.B. aufgrund ihrer Lage von grosser Bedeutung sind. Daher sollten diese Gütemasse nur ergänzend zu den Gütemassen für die Einzelwerte herangezogen werden.

3.1.3 Verteilungen

Für die Validierung der Ziel- und Moduswahl werden Verteilungen der Reiseweite oder der Reisezeit herangezogen. Beim Vergleich der Verteilungen von modellierten und gemessenen

Werten ist die Übereinstimmung der beiden Verteilungen massgebend. Die Übereinstimmung der Verteilungen sollte mit zwei statistischen Gütemasse überprüft werden:

- Mittelwert der Verteilung: Der Mittelwert wird aus den relationsbezogenen Kenngrössen ohne vorherige Klassierung gebildet. Der Mittelwert wird dann wie ein Einzelwert beurteilt.
- Koinzidenz-Verhältnis (Coincidence Ratio CR): Dieses Gütemass ist wie folgt definiert:

$$CR = \frac{\sum_{n=1}^N \min\{m_n, c_n\}}{\sum_{n=1}^N \max\{m_n, c_n\}}$$

mit

N	Anzahl der Klassen in der Häufigkeitsverteilung
m_n	Modellwert im n . Intervall
c_n	Messwert im n . Intervall

Die Coincidence Ratio CR liegt zwischen 0 und 1. Ein Wert von 1.0 ergibt sich bei einer vollständigen Übereinstimmung der beiden Verteilungen. Für eine angemessene Übereinstimmung soll ein Wert von mindestens 0.7 erreicht werden.

Für eine Einteilung der Nachfrage in diskrete Klassen werden relationsbezogene Kenngrössen (Reisezeit, Reiseweite) des Verkehrsnachfragemodells benötigt. Dabei ist zu beachten, dass sich die Reisezeit und die Reiseweite einer Quelle-Ziel-Relation für jeden Modus unterscheiden:

- Soll eine modusunabhängige Nachfrage (Gesamtnachfrage, Nachfrage eines Zwecks) klassiert werden, dann wird als Klassierungskenngrösse entweder die Luftlinienweite, die mittlere nachfragegewichtete Reiseweite oder die mittlere nachfragegewichtete Reisezeit gewählt.
- Soll eine modusspezifische Nachfrage klassiert werden, dann wird als Klassierungskenngrösse die modusspezifische Reiseweite oder Reisezeit gewählt.

Für die Klassierung im Rahmen der Validierung werden mindestens 10 äquiquantile, d.h. gleichbesetzte Klassen empfohlen. Zur Bestimmung der Klassengrenzen müssen die Quantile bestimmt werden. Hierfür wird die Verteilung der Referenzwerte (Messwerte) genutzt. Die Klassengrenzen werden projektspezifisch für die Gesamtnachfrage und die modusspezifische Nachfrage festgelegt und im gesamten Projekt beibehalten. Zur Visualisierung der Verteilungen sind zusätzlich Verteilungen mit äquidistanten Klassen sinnvoll.

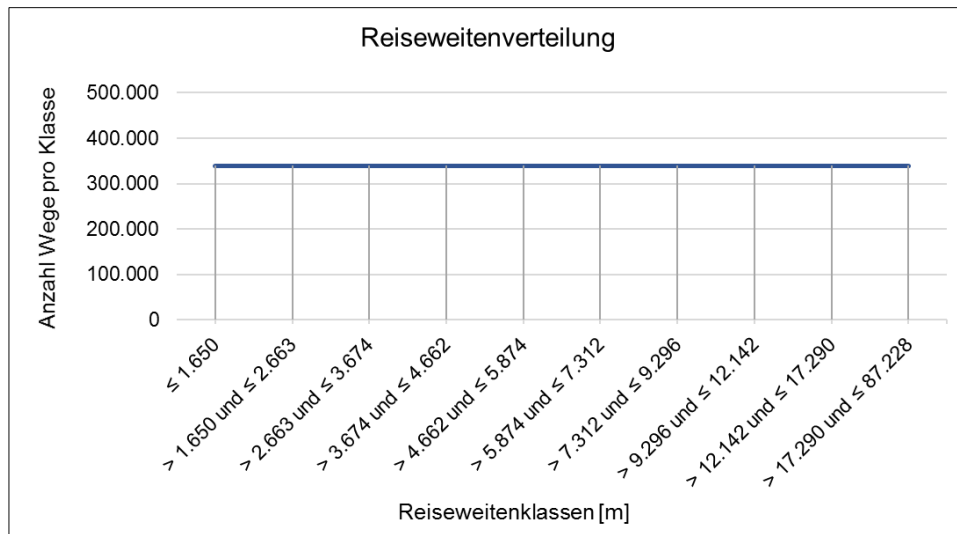


Abbildung 4 Beispiel einer äquiquantilen Reiseweitenverteilung.

Bei der Erstellung von Verteilungen für die Mess- und die Modellwerte sind folgende Punkte zu beachten:

- Es werden nur Räume betrachtet, für die Messwerte als Referenzwerte vorliegen.
- Es werden nur Wege betrachtet, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben.
- Wege im Zellbinnenverkehr werden nicht berücksichtigt und werden separat verglichen.
- Für den Vergleich zweier Verteilungen werden relative Verteilungen (Summe der Klassenwerte = 1.0 oder 100%) herangezogen. Dadurch wird nur die Formähnlichkeit zweier Verteilungen bewertet. Die Lageähnlichkeit wird durch den Mittelwert bewertet.

3.1.4 Visuelle Analysen

Als zusätzliche Unterstützung können Daten in Karten visualisiert werden:

- Darstellung von Geschwindigkeits- und Auslastungsklassen,
- Darstellung der Gütemasse an Zählstellen oder
- Darstellungen von Verkehrsspinnen an wichtigen Querschnitten oder für Verkehrszellen von zentralen Orten. Sie zeigen die die Quellen und Ziele des Verkehrs an.

3.2 Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung

Bei der **Verifizierung der Modellspezifikationen** prüft eine unabhängige dritte Person, ob die in der Modellspezifikation beschriebene Vorgehensweise angemessen ist, um die Anforderungen der Modellnutzer zu erfüllen.

Die **Verifizierung der Modellimplementierung** prüft inwieweit die in der Modellspezifikation beschriebenen Daten und Methoden tatsächlich umgesetzt wurden. Dazu begibt sich die prüfende Person in die Rolle des Modellanwenders, installiert das Verkehrsnachfragemodell auf einem neuen Rechner und führt eigene, anwendungsorientierte Testrechnungen durch, die sich an den Realitätstests orientieren.

3.3 Überprüfung der Eingangsdaten

Die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells wird massgeblich von der Qualität der Eingangsdaten bestimmt. Wesentliche Eingangsdaten sind Verkehrserhebungsdaten, Raumstrukturdaten und Verkehrsangebotsdaten. Diese Daten sollten beim Aufbau des Verkehrsnachfragemodells und vor der Kalibrierung der Modellparameter auf ihre Qualität hin untersucht werden.

3.3.1 Verkehrserhebungsdaten

Verkehrserhebungsdaten umfassen personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen und netzbezogene Daten zu Verkehrsstärken an Zählstellen und Fahrzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz. Erhebungsdaten stellen den Bezug zur wirklichen Welt her. Sie sind jedoch immer nur eine Beobachtung der Realität und können aufgrund der Stichprobengrösse oder aufgrund von Erhebungsfehlern von der Realität abweichen. Mobilitätsverhaltensdaten beinhalten u.a. die Kenngrössen Mobilitätsrate, Reiseweite und Reisezeit, differenziert nach Wegezweck und Verkehrsmodus, die auf folgende Weise überprüft werden sollten:

- Einzelwertprüfungen mit erwarteten Werten aus anderen Verkehrsbefragungen (z.B. Mikrozensus) und
- Angabe der Konfidenzintervalle für die Mobilitätskenngrössen bei einem Konfidenzniveau von 95%.

Mobilitätsverhaltensdaten müssen zudem immer gewichtet vorliegen.

Die Daten sollten für die spätere Validierung so aufbereitet und hochgerechnet werden, dass die Mobilitätskenngrössen für alle Wege und für die Teilmenge der Wege im Untersuchungsraum bekannt sind.

Für jede Zählstelle sollten folgende Informationen benannt werden:

- Erhebungsjahr,
- Zahl der Erhebungstage (Dauerzählstelle, mehrtägige Erhebung, Tageszählung),
- Erhebungszeitraum (ganzer Tag, Teil eines Tages mit Hochrechnung).

Jeder Zählwert sollte mit einem Gütemass bewertet werden. Dabei gilt, dass Zählwerte aus einer Dauerzählstelle eine höhere Aussagekraft als Einmalzählungen haben und dass neuere Daten eine höhere Aussagekraft als ältere Daten haben. Für Dauerzählstellen sollte das Konfidenzintervall der Verkehrsstärke für ein Konfidenzniveau von 95% bestimmt werden.

3.3.2 Raumstrukturdaten

Raumstrukturdaten umfassen die Siedlungsflächen, die Einwohnerdaten differenziert nach Altersklassen und die Standortdaten von Aktivitätenorten mit zugehörigen Eigenschaften (Arbeitsstandorte/Arbeitsplätze, Schulstandorte/Schulplätze, Einkaufsstandorte/Grössenklasse). Raumstrukturdaten werden auf Verkehrszellen bezogen, die als Quellen und Ziele von Ortsveränderung die Raumstruktur, das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage miteinander verknüpfen. Folgende Kenngrössen der Raumstrukturdaten sollten ausgewiesen und überprüft werden:

- Siedlungsdichte (Einwohner bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Zellenebene,
- Arbeitsplatzdichte (Arbeitsplatzdichte bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Zellen-ebene,
- Verhältnis der Arbeitsplätze pro Einwohner und der Erwerbstätigen pro Arbeitsplatz auf Gemeindeebene,
- Verhältnis der Schüler pro Schulplätze auf Gemeindeebene und
- Vergleich der aggregierten Strukturdaten (Einwohner, Beschäftigte am Arbeitsplatz) auf Gemeindeebene mit Daten der statistischen Ämter.

Liegen Standortdaten als Einzelpunkte (POI) vor, sollte die Qualität der Daten stichprobenhaft überprüft werden. Ausserdem ist eine visuelle Prüfung mit Hilfe von Dichtekarten empfehlenswert.

3.3.3 Verkehrsangebotsdaten

Verkehrsangebotsdaten beinhalten sämtliche Daten zur Infrastruktur des Modells (Strecken, Knoten, Haltestellen, etc.) und alle Daten, die für den Betrieb der Infrastruktur notwendig sind (Fahrpläne, Preissysteme, etc.). Verkehrsangebotsdaten lassen sich auf der Ebene der einzelnen Netzelemente und auf der Relationsebene überprüfen.

Auf der Ebene von Netzelementen sollen Netztopologie und Netzattribute überprüft werden:

- Anzahl der Arme pro Knotenpunkt (z.B. maximal 5 Zufahrten pro Knotenpunkt),
- Vergleich der Netzlängen nach Strassenklasse und Vergleich mit Werten aus der amtlichen Statistik,
- Vergleich der mittleren Geschwindigkeit je Strassenklasse und Ortslage mit Erwartungswerten und
- Anzahl der Haltestellen je Verkehrszelle (z.B. maximal ein Schienenhaltepunkt je Zelle).

Sobald das Netzmodell erstellt ist, können Kenngrössenmatrizen berechnet und Testumlegungen durchgeführt werden. Dabei sollten folgende Werte überprüft werden:

- Ist das Netz zusammenhängend, d.h. kann für jede Relation die Reisezeit berechnet werden?
- Vergleich der Kenngrössen (Reisezeiten, ggf. Fahrpreise) und der Fahrtrouten für ausgewählte Relationen mit Daten aus unabhängigen Quellen, z.B. einem Routenplanungsprogramm oder Floating Car Daten.
- Berechnung und Überprüfung relationsbezogener Kenngrössen:
 - Luftliniengeschwindigkeit: Werte, die nach den Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN, 2008 [2]) als sehr gut oder sehr schlecht eingestuft werden, sollten überprüft werden.
 - Umwegfaktor: Werte über 1.5 sollten überprüft werden.
 - Reisezeitverhältnis ÖV/PW: dieser Wert sollte üblicherweise zwischen 0.5 (ÖV ist doppelt so schnell wie PW) und 5 liegen (ÖV ist 5-mal langsamer als der PW).

- Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung: In der Nebenverkehrszeit sollten beide Richtungen ähnliche Werte aufweisen.
- Anteil der Wartezeiten an Knotenpunkten bezogen auf die gesamte Fahrtzeit.
- Anteil der Anbindungszeiten (Zu- und Abgang) an der gesamten Reisezeit.

Die Netzbelastungen sollten bei einer Bestwegumlegung in beiden Richtungen ähnlich sein.

Die Netzbelastungen in einem unabhängigen Netzmodell (z.B. OpenStreetMap) sollten im Hauptstrassennetz ähnlich sein.

3.4 Kalibrierung und Validierung

Im Mittelpunkt einer Modellerstellung steht die Kalibrierung und die Validierung, bei der in mehreren Durchläufen die Modellparameter gesetzt und ihre Wirkungen auf die Modellergebnisse geprüft werden:

Kalibrierung: Einstellung der Modellparameter, so dass die mit dem Modell berechneten Werte möglichst gut mit der beobachteten Realität übereinstimmen.

Validierung: Überprüfung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit geeigneten Gütemassen und Tests.

3.4.1 Einstellen der Parameter

Ausgangspunkt für den Prozess der Kalibrierung und Validierung ist eine Startlösung, bei der alle Modellparameter mit geschätzten oder gesetzten Parametern belegt werden.

Parameterschätzung:

Bei der Parameterschätzung werden die Parameter entweder mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens bestimmt oder iterativ solange verändert, bis die Abweichungen zwischen den aus dem Modell errechneten Werten und den gemessenen Werten minimal sind. Für die Parameterschätzung von Entscheidungsmodellen der Ziel-, Modus- oder Routenwahl eignet sich die sogenannte Maximum-Likelihood Methode. Die Methode nutzt beobachtete Wahlentscheidungen von Verkehrsteilnehmern und die zugehörigen Eigenschaften der Menge an Alternativen. Wichtige Eigenschaften einer Alternative sind die Kenngrößen der Angebotsqualität: Zu- und Abgangszeit, Wartezeit, Fahrzeit im Verkehrsmittel, Kosten und Umsteigehäufigkeit. Diese Kenngrößen sollten nicht aus den Angaben der Probanden abgeleitet werden, sondern für alle Probanden und alle Alternativen aus den Kenngrößen, die mit dem Verkehrsnachfragemodell ermittelt wurden. Grundlage für die Kenngrößen sollten dabei nicht die Verkehrszellen sein, in denen die Probanden ihre Aktivitäten durchführen, sondern die genauen geocodierten Aktivitätenorte. Nur so kann der Einfluss der Zu- und Abgangszeit – diese Werte können für verschiedene Orte innerhalb einer Zelle deutlich variieren – bei der Parameterschätzung berücksichtigt werden. Die Güte einer Maximum-Likelihood-Schätzung sollte mittels des Likelihood-Ratio-Test und des rho-square-Test (siehe z.B. Huelsenbeck & Crandall [3]) dokumentiert werden.

Parametersetzung:

Parameter, die nicht empirisch erhoben werden können, müssen durch den Modellerstellenden festgesetzt werden. Sinnvolle Wertebereiche der Parameter können der Literatur (z.B. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [4], FSUTMS-Cube Framework Phase

I und II [5; 6], BVWP Axhausen et al. [7], Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK [8] oder anderen Modellen entnommen werden.

3.4.2 Überprüfung der Parameter

Das Ergebnis einer Parameterschätzung für Entscheidungsmodelle sind Parameterwerte für die in einer Nutzenfunktion verwendeten Kenngrößen. Diese Parameter geben die Bedeutung der jeweiligen Kenngröße auf die Wahlentscheidung an. Diese Werte sollten auf folgende Weise geprüft werden:

Vorzeichen der Parameter:

Die Parameterwerte zur Bewertung von Widerständen sollten in einer Nutzenfunktion ein negatives Vorzeichen haben.

Verhältnis der Parameter:

Die Parameterwerte für die Gehzeit, das Umsteigen oder die Kosten werden in Bezug gesetzt zum Parameterwert der Fahrzeit. Diese resultierenden Verhältniswerte geben den Value of Time für eine Zeiteinheit Gehzeit, einen Umsteigevorgang oder eine Geldeinheit an, siehe z.B. BVWP Axhausen et al. [7]. Diese Vorgehensweise kann jedoch nur für Modelle mit linearen Nutzenfunktionen gewählt werden.

Wertebereich der Parameter:

Die Parameterwerte können mit Werten aus der Literatur und mit Werten aus anderen Modellen verglichen werden. Es muss aber berücksichtigt werden, dass der Wert eines Parameters von der Modellarchitektur, von der verwendeten Bewertungsfunktion (Exponentialfunktion, Potenzfunktion, Halbglockenfunktion) und von der Gesamtanzahl der Parameter in der Nutzenfunktion abhängt.

3.4.3 Überprüfung der Modellergebnisse

In diesem Schritt werden mit dem Modell errechnete Werte und gemessene Werte mit geeigneten Gütemassen (vgl. Kapitel 3.1) überprüft. Als Kontrolldaten dienen personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen und netzbezogene Daten zu Verkehrsstärken an Zählstellen und Fahrzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz.

Für die Überprüfung der Modellstufen Verkehrserzeugung, Ziel- und Moduswahl werden Wegedaten von Einzelpersonen gewichtet aggregiert und mit den berechneten Wegen verglichen:

- Vergleich der berechneten und befragten Zahl der Wege pro Person.
- Vergleich der berechneten und befragten Zahl der Wege je Person differenziert nach modusunabhängigen Reiseweiten- und Reisezeitklassen.
- Vergleich der berechneten und befragten Zahl der Wege je Person und Modus differenziert nach modusspezifischen Reiseweiten- und Reisezeitklassen.

Die Wegedaten sollten für verschiedene Segmentierungen überprüft werden:

- räumlich: gesamter Untersuchungsraum und ggf. für Teilräume (Stadt, Umland).
- inhaltlich: alle Einwohner und differenziert nach Nachfragesegmenten (Personengruppen und/oder Wegezwecken).

Für die Überprüfung der Verkehrsstärken und Fahrtzeiten werden folgende Werte verglichen:

- berechnete Fahrtzeiten mit gemessenen Fahrtzeiten für ausgewählte Streckenzüge,

- berechnete Verkehrsstärken der Umlegung mit gezählten Verkehrsstärken an ausgewählten Zählstellen oder an Screenlines. Eine Screenline umfasst eine Menge von Strecken, die durch einen Polygonzug definiert werden. Alle Strecken, die durch den Polygonzug geschnitten werden, gehören zur Screenline, z.B. alle Brücken über einen Fluss. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer Screenline werden zu einer Screenline-Verkehrsstärke aufsummiert.

Tabelle 8 zeigt wichtige Kenngrößen, Vorschläge für eine räumliche und inhaltliche Differenzierung und ein Vorschlag für ein Gütemass.

	Kenngrösse	Differenzierung		Kontroll- daten	statistisches Gütemass
		inhaltlich	räumlich		
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege	<ul style="list-style-type: none"> • Grundgesamtheit 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 		<ul style="list-style-type: none"> • Konsistenz produzierte und angezogene Wege
	mittlere Anzahl Wege pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg • pro Modus x NSeg 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR • Teilräume 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • Gütemass SQV für $f = 1$
Verkehrsleistung	Wegeweiten verteilung [km] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelwert: Gütemass SQV für $f = 10$ • Wegeweitenverteilung: Coincidence Ratio
	mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • Gütemass SQV für $f = 10$
	Verkehrsleistung aller Personen [Personenkm]	<ul style="list-style-type: none"> • Modus ÖV • ÖV-Betriebszweige 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR • Teilräume 	ÖV-Erhebung	<ul style="list-style-type: none"> • relative Abweichung < 5%
Verkehrszeitaufwand	Wegezeit verteilung [min] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelwert: Gütemass SQV für $f = 30$ • Wegezeitverteilung: Coincidence Ratio
	mittlerer Verkehrszeitaufwand [h] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelwert: Gütemass SQV für $f = 30$
Verkehrsstärke	tägliche und stündliche Verkehrsstärke	<ul style="list-style-type: none"> • PW • LW • Rad • Bus • Bahn 	<ul style="list-style-type: none"> • Strecke • Abbieger • Strecke einer Linienroute • Screenline 	Zählung	<ul style="list-style-type: none"> • Tageswerte: Gütemass SQV für $f = 10'000$ • Stundenwerte: Gütemass SQV für $f = 1'000$
Fahrzeiten	Fahrzeiten zwischen zwei Punkten im Netz	<ul style="list-style-type: none"> • unbelastetes Netz • belastetes Netz für relevante Tageszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Streckenzug • Relationen 	Fahrzeitmessung	<ul style="list-style-type: none"> • absolute Abweichungen nach Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.
HH-Bef	Haushaltsbefragung mit Wegetagebüchern. Die Datensätze sollten gewichtet vorliegen. Es werden nur solche Wege als Kontrolldaten berücksichtigt, die im Untersuchungsraum beginnen und enden.				
ÖV-Erhebung:	Quelle-Ziel Befragungen im ÖV-Fahrzeug, die mit Einsteigerzählungen hochgerechnet werden oder aus Fahrkartendaten abgeleitete Verkehrsleistung.				
UR:	Untersuchungsraum, in dem die Verkehrsnachfrage modelliert wird.				
NSeg:	Nachfragesegment (Personengruppe und / oder Wegezweck).				
Alle Kenngrößen beziehen sich auf einen Tag.					

Tabelle 8 Überprüfung von Kenngrößen der Nachfrage bei der Modellvalidierung

3.4.4 Überprüfung des Modellverhaltens

Mit **Sensitivitätstests** wird der Einfluss der Modellparameter auf das Ergebnis geprüft. Dabei werden die Modellvariablen – in der Regel die Modellvariablen des Analysezustands – unverändert gelassen, so dass Ergebnisänderungen auf einzelne Parameter zurückgeführt werden können. Als Auswertungsgrößen können die in Tabelle 2 beschriebenen Kenngrößen herangezogen werden, jeweils mit Bezug auf die Erhebungsdaten. Eine Variation der Parameterwerte sollte besonders für folgende Parameter angestrebt werden:

- Empirisch nicht abgesicherte Parameter der Nutzenfunktion: Parameterwerte von Kenngrößen, die nicht oder nur eingeschränkt geschätzt werden können, sollten einmal reduziert und einmal erhöht werden. WebTAG [9] schlägt eine Reduktion bzw. Erhöhung um 25% bis 50% vor. Das gilt häufig für Parameter der Zahlungsbereitschaft und andere Parameter, die „nur“ mit einer Stated-Choice Befragung ermittelt werden konnten. Die Ergebnisse dieser Variationen können als Elastizitäten der untersuchten Parameter ausgedrückt werden, z.B. die Erhöhung der Parameters Zeitwert um x% reduziert die PW-Fahrleistung um y%.
- Konstanten der Nutzenfunktion: Nutzenfunktionen enthalten in der Regel eine sogenannte alternativenspezifische Konstante, die den Nutzen aller nicht abgebildeten, unbekannt Einflussgrößen (z.B. Komfort oder Zuverlässigkeit) beschreibt. Um die Bedeutung dieser Einflussgrößen zu ermitteln, sollten in einem Sensitivitätstest alle alternativenspezifischen Konstanten auf den Wert 0 gesetzt werden. Analog könnte ein Sensitivitätstest durchgeführt werden, bei dem mit Ausnahme der Konstanten alle Parameter auf 0 gesetzt werden.
- Abbruchbedingungen für Gleichgewichtsberechnungen: Strengere Abbruchbedingungen bei einer Gleichgewichtsumlegung (siehe Kenngröße Duality Gap in Bild 5) oder bei einer Rückkopplung zwischen Nachfrageberechnung und Umlegung erhöhen die Modellkonvergenz auf Kosten der Rechenzeit. Um Aussagen über den Einfluss der Abbruchbedingungen auf das Ergebnis machen zu können, sollten die geplanten Abbruchbedingungen um den Faktor 10 verschärft werden (z.B. maximaler zulässiger Gap wird von 0.0001 auf 0.00001 reduziert).

Im Prognosefall sollten die Modellparameter nicht verändert werden. Daher ist es ausreichend, die Sensitivitätstests im Analysezustand durchzuführen.

$$G = \frac{V_{Ist} - V_{Hypo}}{V_{Hypo}}$$

mit

G Duality Gap

V_{Ist} tatsächlicher Verkehrszeitaufwand (Fahrzeugstunden), der sich aus dem Produkt der aktuellen Fahrzeiten und Streckenbelastungen ergibt,

V_{Hypo} hypothetischer Verkehrszeitaufwand (Fahrzeugstunden), der sich ergibt, wenn alle Fahrzeuge die Fahrzeit auf der aktuell zeitkürzesten Route nutzen könnten.

Abbildung 5 Duality Gap G als Konvergenzkenngröße bei der Gleichgewichtsumlegung

Mit **Realitätstests** wird geprüft, ob die Wirkungen eines Modells bei Änderungen der Variablen in der erwarteten Grössenordnung liegen. Dazu werden die Variablen des Verkehrsangebots oder die Strukturdaten in kontrollierter Weise verändert. Dann werden die Nachfrageänderungen ermittelt. Aus dem Vergleich der Angebotsänderungen und der Nachfrageänderungen lassen sich Elastizitäten der Zeit oder des Preises berechnen und mit erwarteten Elastizitäten vergleichen. Folgende Variablenänderungen sind für einen Realitätstest sinnvoll:

- Erhöhung der Treibstoffpreise um 10% oder 20%,
- Erhöhung der Billettpreise um 10% oder 20%,
- Erhöhung der Fahrzeit im MIV um 10%,
- Erhöhung der Bedienungshäufigkeit im ÖV um 50%,
- Erhöhung der Einwohner um 10%.

Nach WebTAG [9] berechnet sich die Preiselastizität nach:

$$\text{Elastizität} = \frac{\ln\left(\frac{\text{Nachfrage}_{\text{nachher}}}{\text{Nachfrage}_{\text{vorher}}}\right)}{\ln\left(\frac{\text{Kosten}_{\text{nachher}}}{\text{Kosten}_{\text{vorher}}}\right)}$$

und sollte folgende Werte aufweisen:

- Treibstoffkosten (bezogen auf die Fahrzeug-km): -0.35 bis -0.25,
- ÖV-Ticketpreise (bezogen auf die Wegezanzahl): -0.9 bis -0.2 (bzw. -0.9 bis -0.7 für Bus),
- Reisezeit (MIV, bezogen auf die Wegezanzahl): nicht kleiner als -2.0.

Ausserdem sollte ein Realitätstest durchgeführt werden, bei dem die Wirkung der Kapazitätsänderung eines Netzelements (z.B. Neubau einer Strasse) einmal ohne Rückkopplung (nur Umlegung) und einmal mit Rückkopplung (Nachfrageberechnung und Umlegung) untersucht wird. Auf welchen Relationen erhöhen bzw. reduzieren sich die Reisezeiten. Sind Änderungen der Verkehrsstärken – differenziert nach PW und LW – auch in grösserer Entfernung vom untersuchten Netzelement erklärbar oder eher auf eine unzureichende Konvergenz zurückzuführen? Ergänzend kann auch auf die in Tabelle 2 beschriebenen Gütemasse zurückgegriffen werden. Im Falle von Realitätstests sind die Referenzgrössen allerdings nicht die Erhebungsdaten, sondern der (bisherige) kalibrierte Ausgangszustand.

3.4.5 Abschliessende Validierung der Modellergebnisse

Nach dem Abschluss des Kalibrierungs- und Validierungsprozesses liegt ein geprüftes Modell vor. Um die Qualität dieses Modells nachzuweisen, können die Modellergebnisse nun mit einem bis zu diesem Zeitpunkt unbenutzten Datensatz überprüft werden. Bei makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen, die die mittlere Verkehrsnachfrage an einem Werktag ausserhalb der Ferien abbilden, ist es schwer, einen weiteren, unbenutzten Datensatz zu erhalten. Hier können in der Regel nur die Verkehrsstärken anderer Zählstellen herangezogen werden.

4. Literatur

- [1] *Sammer, G.; Röschel, G.; Gruber, C.*: Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen. Entwurf eines Merkblattes Projekt QUALIVERMO, Forschungsbericht. Hrsg.: Autobahnen- und Schnellstrassen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Graz 2010
- [2] Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (2008). FGSV Verlag, Köln 2008
- [3] *Huelsenbeck, J. P.; Crandall, K. A.*: Phylogeny Estimation and Hypothesis Testing Using Maximum Likelihood. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28 (1997), S. 437–466
- [4] *Cambridge Systematics, I.*: Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual. Second Edition. 2nd ed. Hrsg.: Federal Highway Administration, Cambridge, Massachusetts 2014. <http://www.camsys.com/pubs/FHWA-HEP-10-042.pdf>, abgerufen am 04. November 2015
- [5] FSUTMS-Cube Framework Phase II. Model Calibration and Validation Standards, final report. Hrsg.: Cambridge Systematics, I., Tallahassee, Florida 2008. http://www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR2_FDOT_Model_CalVal_Standards_Final_Report_10.2.08.pdf, abgerufen am 04. November 2015
- [6] FSUTMS-Cube Framework Phase I. Default Model Parameters, final report. Hrsg.: Cambridge Systematics, I., Tallahassee, Florida 2006. http://www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR1_FSUTMS-Cube_Parameters_All-in-One_Version_10-31-06%5B1%5D.pdf, abgerufen am 04. November 2015
- [7] *Axhausen, K. W.; Ehreke, I.; Glemser, A.; Hess, S.; Jödden, C.; Nagel, K.; Sauer, A.; Weis, C.*: Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung. Entwurf Schlussbericht, FE-Projekt-Nr. 96.996/2011 2014. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2015-zeitkosten-pv.pdf?__blob=publicationFile, abgerufen am 25. Juli 2016
- [8] Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK. Aktualisierung auf den Basiszustand 2010, Endbericht. Hrsg.: Bundesamt für Raumentwicklung (ARE); Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) 2014. http://www.are.admin.ch/themen/verkehr/00256/00513/index.html?lang=de&download=NHZLp-Zeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6In1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCE-enx9gmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--, abgerufen am 04. August 2016
- [9] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M2. Variable Demand Modelling. Transport analysis guidance: WebTAG. M2 2014