



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen

Assurance de qualité pour calculs de modèle de transport

Quality assurance for transport models and their applications

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, Universität Stuttgart
Prof. Dr. Markus Friedrich
Eric Pestel

Forschungsprojekt SVI 2015/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

November 2018

1645

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen

Assurance de qualité pour calculs de modèle de transport

Quality assurance for transport models and their applications

EBP Schweiz AG
Dr. Nadine Rieser
Bence Tasnády
Nicolaas de Vries
Marco Rothenfluh
Remo Fischer

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Institut für Strassen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart
Prof. Dr. Markus Friedrich
Eric Pestel

Forschungsprojekt SVI 2015/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

November 2018

1645

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Nadine Rieser, EBP

Mitglieder

Bence Tasnády, EBP

Nicolaas de Vries, EBP

Marco Rothenfluh, EBP

Remo Fischer, EBP

Prof. Dr. Markus Friedrich, ISV

Eric Pestel, ISV

Begleitkommission

Präsident

Stephan Erne

Mitglieder

Michael Balmer

Anne-Kathrin Bodenbender

Stefan Dasen

Olga Fink

Roland Frei

Christian Hürlimann

Lutz Ickert

Andreas Justen

Thomas Muzi

Michael Redle

Thomas Spillmann

Antragsteller

Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	9
Résumé	13
Summary	17
1 Einleitung	21
2 Verkehrsnachfragemodelle	23
2.1 Modelle für die Planung des Verkehrs	23
2.2 Typologien von Verkehrsnachfragemodellen	24
2.2.1 Verhaltensannahmen	24
2.2.2 Synthetische und inkrementelle Modelle	25
2.2.3 Modellstufen	26
2.2.4 Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle	30
2.2.5 Einzelwegmodelle und Wegekettensmodelle	31
2.2.6 Berücksichtigung zeitlicher Veränderlichkeit	32
3 Stand der Forschung	33
3.1 Ursachen für Abweichungen zwischen Modell und Erhebung	33
3.2 Quantifizierung der Abweichungen	34
3.2.1 Einzelwerte	34
3.2.2 Mengen von Einzelwerten	37
3.2.3 Verteilungen	39
3.2.4 Grafische Darstellungen	45
3.3 Einsatzbereiche für Qualitätskenngrößen	47
3.4 Übersicht über Modellierungsrichtlinien und Forschungsprojekte	48
4 Stand der Anwendung	59
4.1 Expertenbefragung	59
4.1.1 Ziel der Befragung	59
4.1.2 Ergebnisse	59
4.2 Analyse zugänglicher Ausschreibungsunterlagen	65
4.2.1 Vorbemerkungen	65
4.2.2 Einsatzbereiche	66
4.2.3 Modellbildung: Räumliche und zeitliche Abgrenzung	66
4.2.4 Modellbildung: Angebot	66
4.2.5 Modellbildung: Nachfrage	67
4.2.6 Modellbildung: Modelltyp	67
4.2.7 Kalibrierung / Validierung	67
4.2.8 Dokumentation	69
4.3 Analyse zugänglicher Modellberichte	69
4.3.1 Vorbemerkungen	69
4.3.2 Anforderungen an das Modell	69
4.3.3 Modellbildung	70
4.3.4 Datengrundlagen	70
4.3.5 Aufbereitung Angebot	70
4.3.6 Modellierung Verkehrsnachfrage	70
4.3.7 Validierung und Kalibrierung	70
4.4 Fazit	70
5 Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle	73
5.1 Einsatzbereiche des Modells	73
5.2 Abbildung der Entscheidungsprozesse (Modellstufen)	77

5.2.1	Diskrete Entscheidungsmodelle	77
5.2.2	Aktivitätenwahl und Verkehrserzeugung	80
5.2.3	Zielwahl	82
5.2.4	Verkehrsmoduswahl	86
5.2.5	Umlegung, Routenwahl und Verbindungswahl	89
5.2.6	Rückkopplungen zwischen den Modellstufen	100
5.3	Planungsraum und Untersuchungsraum	102
5.4	Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur	103
5.5	Abbildung des Verkehrsangebots	106
5.5.1	Verkehrsmittel und Verkehrsmodi	106
5.5.2	Strassennetz	106
5.5.3	ÖV-Angebot	108
5.5.4	Nutzungsgebühren	108
5.6	Abbildung der Verkehrsnachfrage	109
5.7	Eventverkehr, Wirtschaftsverkehr und externer Verkehr	111
5.7.1	Eventverkehr	112
5.7.2	Personenwirtschaftsverkehr	112
5.7.3	Güterwirtschaftsverkehr	112
5.7.4	Externer Verkehr	112
5.8	Prognose	113
5.9	Datenquellen	115
5.9.1	Daten für den Aufbau der Verkehrszellen	116
5.9.2	Daten zur Beschreibung des Verkehrsangebots	116
5.9.3	Strukturdaten	117
5.9.4	Daten zur Beschreibung des Mobilitätsverhaltens	117
5.9.5	Daten für die Validierung	118
5.9.6	Daten für die Prognose	119
6	Qualitätsprüfung von Verkehrsnachfragemodellen	121
6.1	Ableitung von Qualitätskenngrößen	121
6.1.1	Aussagen zu Einzelwertgütemassen	121
6.1.2	Aussagen zu Mengen von Einzelwerten	135
6.1.3	Aussagen zu Verteilungen	135
6.2	Vorgehensweise zur Qualitätssicherung	143
6.2.1	Verifizierung	144
6.2.2	Überprüfung der Modelleingangsdaten	145
6.2.3	Einstellen der Parameter	147
6.2.4	Anpassen der Modellparameter, Eingangsdaten und Modellspezifikation	147
6.2.5	Überprüfung der Parameter	148
6.2.6	Überprüfung der Modellergebnisse	148
6.2.7	Überprüfung des Modellverhaltens	151
6.2.8	Abschliessende Validierung der Modellergebnisse	153
6.3	Qualitätsprüfungen für mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle	154
6.4	Abschätzung der Prognosegenauigkeit	155
7	Anforderungen an die Dokumentation	159
7.1	Einleitung	159
7.2	Anforderungen an das Modell	159
7.3	Modellbildung	159
7.4	Datengrundlagen	160
7.5	Aufbereitung des Verkehrsangebots	160
7.6	Modellierung der Verkehrsnachfrage	161
7.7	Bereitgestellte Kenngrößenmatrizen	161
7.8	Technische Umsetzung der Modellierung	161
7.9	Validierung und Kalibrierung	161
8	Beispielhafte Anwendungen	163
8.1	Kurzbeschreibung der Modelle	163
8.1.1	Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM ZH)	163

8.1.2	Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VM Region Stuttgart)	165
8.1.3	Verkehrsmodell des Kantons Neuchâtel (VM NE)	168
8.2	Überprüfung der Modelleingangsdaten	170
8.2.1	Überprüfung der Erhebungsdaten	170
8.2.2	Überprüfung der Raumstrukturdaten	171
8.2.3	Überprüfung der Verkehrsangebotsdaten	174
8.2.4	Überprüfung der RIN-Kenngrößen	197
8.3	Überprüfung der Parameter	209
8.4	Überprüfung der Modellergebnisse	211
8.4.1	Mobilitätsraten und Verkehrsaufkommen	211
8.4.2	Wegeweiten und Verkehrsleistung	213
8.4.3	Wegezeitaufwand und Verkehrszeitaufwand	216
8.4.4	Verkehrsstärken	219
8.5	Sensitivitätstests	222
8.5.1	Beschreibung der Tests und der Erwartungen	222
8.5.2	Auswertung der Tests für die Beispielmodelle	227
8.6	Realitätstests	234
8.6.1	Beschreibung der Tests und der Erwartungen	234
8.6.2	Auswertung der Tests für die Beispielmodelle	242
8.7	Fazit der beispielhaften Anwendungen	256
9	Fazit	259
	Anhänge	261
	Glossar	267
	Literaturverzeichnis	271
	Projektabschluss	277
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	281
	SVI Publikationsliste	283

Zusammenfassung

Ziele der Forschungsarbeit

Bis anhin fehlen in der Schweiz – wie in den meisten europäischen Ländern – allgemein gültige Richtlinien zur Sicherstellung der Qualität von Verkehrsnachfragemodellen. Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, ein breit abgestütztes System von Kenngrössen und Methoden zur Validierung von Verkehrsnachfragemodellen und der damit erstellten Modellberechnungen zusammenzustellen. Die Kenngrössen und Methoden sollten die Modelleingangsdaten, die Modellarchitektur und die Modellergebnisse umfassen und unabhängig von der verwendeten Software oder Methodik gelten. Die Qualitätskenngrössen sollten so definiert werden, dass den Bestellern von Verkehrsprognosen Empfehlungen zur Verfügung stehen, welche sie in Ausschreibungen und bei der Abnahme von Verkehrsmodellen und deren Berechnungen zugrunde legen können. Dies schliesst insbesondere auch Empfehlungen für eine transparente Dokumentation von Einsatzbereichen, Anforderungen und Modellgrenzen ein.

Vorgehen

Im ersten Schritt wurde ein gemeinsames Verständnis von Verkehrsnachfragemodellen erarbeitet und in Zusammenarbeit mit der Begleitkommission der Schwerpunkt hinsichtlich der Anwendungsbereiche definiert. Im Zentrum der Forschungsarbeit steht die Qualitätssicherung makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle für multimodale Mittel- und Langfristprognosen (5-30 Jahre).

Im nächsten Schritt wurde ein Überblick über den Stand der Forschung und die bestehenden Richtlinien in anderen Ländern geschaffen. Die Ermittlung des Standes der Anwendung erfolgte mit Hilfe einer internationalen Expertenbefragung und der Sichtung von Ausschreibungsunterlagen und Modellberichten.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand von Forschung und Anwendung wurden die Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle, die Methoden zur Prüfung von Verkehrsnachfragemodellen und die Anforderungen an die Dokumentation zusammengestellt. Zum Abschluss der Arbeiten wurden die entwickelten Methoden auf drei bestehende Modelle angewandt, um zu überprüfen, ob die entwickelten Richtlinien und Kenngrössen aussagekräftig und praxistauglich sind.

Erfassung des Standes der Anwendung

Der Stand der Anwendung wurde auf drei Arten erfasst. Das Kernelement war die Durchführung und Auswertung einer Expertenbefragung. Diese wurde ergänzt durch eine Analyse zugänglicher Ausschreibungsunterlagen und Modellberichte. Im Rahmen der Expertenbefragung haben im Sommer 2016 73 internationale Experten aus Wissenschaft, Verwaltung und Ingenieurbüros mit der Teilnahme an einer Online-Befragung mit 50 Fragen wertvolle Informationen zu Anwendung, Erstellung und Anforderungen von Verkehrsmodellen geliefert.

Im Rahmen der Befragung sowie der Sichtung von Ausschreibungsunterlagen und Modellberichten zeigte sich, dass viele der in im Rahmen der Forschungsarbeit entworfenen Empfehlungen bei der Erstellung und Validierung von Modellen in der Schweiz bereits berücksichtigt werden. Das Ziel der Empfehlungen für diese Anforderungen ist daher primär eine Vereinheitlichung und die Etablierung eines gemeinsamen Standards. Hinsichtlich einzelner Themen besteht jedoch noch grösserer Verbesserungs- und vor allem ein Informationsbedarf. Namentlich gilt dies insbesondere für die Modellierung von kapazitäts- und steuerungsabhängigen Knotenwiderständen, für die Überprüfung von Fahrtzeiten im Netz und für weiter entwickelte Gütemasse für die Validierung von Verteilungen und Einzelwerten.

Ein weiteres wichtiges Thema ist lückenlose Dokumentation des Modells und die Weitergabe der Dokumentation an die Anwender. Im Rahmen der Befragung zeigte sich, dass der Modellbericht nur in etwa 40% der Fälle an die Anwender übergeben wird. Zudem fehlen wichtige Aspekte wie die Dokumentation der verwendeten Modellparameter, Hinweise zur Bedienung des Modells, zur Granularität der abbildbaren Massnahmen und zu Einsatzgrenzen des Modells in einem nicht unerheblichen Teil der Modellberichte. Hier besteht Verbesserungsbedarf.

Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle

Die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells lässt sich in drei Stufen unterteilen:

- Erstellung einer Modellspezifikation,
- Erstellung des Modells entsprechend der Spezifikation einschliesslich der Qualitätsprüfung und
- optionale Erstellung eines Referenzzustandes für einen oder mehrere Prognosehorizonte.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden Hinweise und Empfehlungen zur Verkehrsnachfragemodellierung im Personenverkehr erarbeitet, die Modellbestellern und Modellersteller bei der Erstellung einer Modellspezifikation unterstützen können. Ausgehend von den geplanten Einsatzbereichen des Modells wurden Empfehlungen zu folgenden Themen gemacht:

- Kenngrössen, die mit dem Modell ermittelt werden sollen,
- Modelltypen, erforderliche Modellstufen und Abbildung von Wahlentscheidungen,
- Abgrenzung des Planungs- und Untersuchungsraums,
- Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur,
- Abbildung des Verkehrsangebots,
- Abbildung der Verkehrsnachfrage,
- Abbildung externer Verkehre und des Wirtschaftsverkehrs,
- Anforderungen an die Prognose und
- verfügbare und erforderliche Daten.

Als Ergebnis steht eine Checkliste zur Verfügung, die als Leitfaden für die Erstellung einer umfassenden Modellspezifikation verwendet werden soll.

Qualitätsprüfung von Verkehrsnachfragemodellen

Damit der Nachweis der Validität eines Modells erbracht werden kann, müssen die Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten durch geeignete statistische Gütemasse quantifiziert und bewertet werden. Der Vergleich von Modell- und Erhebungswerten kann sich auf Einzelwerte, Mengen von Einzelwerten und Verteilungen von Werten beziehen. Für die Bewertung von Einzelwerten und Mengen von Einzelwerten wurden im Rahmen der Forschungsarbeit existierende Gütemasse geprüft und darauf aufbauend ein alternatives Gütemass SQV (Scalable Quality Value) entwickelt, das einige der Nachteile bestehender Gütemasse behebt und auf verschiedene Wertebereiche skalierbar ist. Für die Beurteilung von Verteilungen, wo gemäss Experten-Befragung derzeit noch die grössten Lücken bestehen, wurden konkrete Empfehlungen aufbauend auf bestehenden Gütemassen erarbeitet.

Für die Validierung und Kalibrierung von Verkehrsnachfragemodellen wird der in Abb. 1 dargestellte Qualitätssicherungsprozess empfohlen. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden für jeden Schritt Empfehlungen und Tests unter Verwendung der oben beschriebenen Gütemasse entwickelt. Die Praxistauglichkeit dieser Tests wurde im Rahmen eines «virtuellen Reviews» von drei Beispielmодellen aufgezeigt.

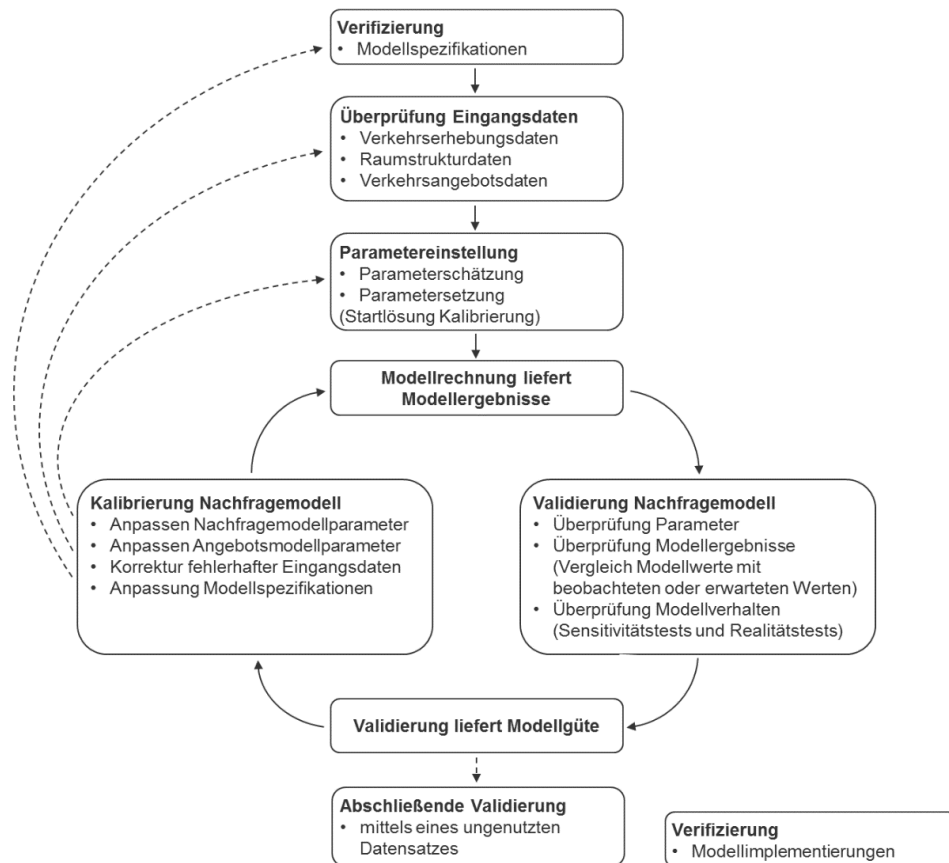


Abb. 1 Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: [67]).

Praktische Anwendung

Im Rahmen des virtuellen Reviews wurden für jeden Test zunächst Erwartungen formuliert. Anschliessend wurden die Tests für die einzelnen Modelle durchgeführt und die Ergebnisse mit den Erwartungen abgeglichen. Im Fokus stand dabei nicht die Qualität der Verkehrsnachfragemodelle, sondern die Überprüfung der Aussagekraft der einzelnen Tests und des mit ihrer Durchführung verbundenen Aufwands.

Die vorgeschlagenen Tests konnten grundsätzlich für alle getesteten Modelle durchgeführt werden, in der Regel auch mit vertretbarem Aufwand. Die vorgeschlagenen Sensitivitäts- und Realitätstests verursachen jedoch für einzelne Modelle sehr lange Rechenzeiten. Da diese Tests insbesondere hinsichtlich der Massnahmensensitivität der Modelle sehr aufschlussreich waren, wird dennoch empfohlen, sie durchzuführen und die notwendigen Rechenzeiten bei der Terminplanung entsprechend zu beachten. Eine weitere Schwierigkeit war die Verfügbarkeit und Qualität von geeigneten Vergleichsdaten. Diese sollte abgeklärt werden, bevor die Anforderungen an die Modellqualität und die durchzuführenden Tests definiert werden.

Weiterer Forschungsbedarf

Mit den Gütemassen wurden in dieser Forschungsarbeit auch Wertebereiche für eine «sehr gute», «gute» oder «akzeptable» Qualität angegeben. Diese Wertebereiche sind als Orientierungswerte zu sehen. Für eine allgemeine Festlegung von Grenzwerten ist derzeit noch zu wenig bekannt, welche Modellwerte in der Realität tatsächlich erreicht werden können. Hierzu sollten daher in den nächsten Jahren Erfahrungswerte gesammelt werden, welche dann bei der Formulierung verbindlicher Richtlinien verwendet werden können. Darüber hinaus ist eine internationale Abstimmung der Richtlinien – mindestens im deutschsprachigen Raum – anzustreben.

Zwei wichtige Themen, die in diesem Forschungsprojekt nicht ausreichend behandelt werden konnten, sind der Einfluss der Modellabstraktion auf die Modellergebnisse und die Ableitung von Anforderungen an Haushaltsbefragungen (wie z.B. der Mikrozensus Mobilität und Verkehr) oder andere Erhebungen (z.B. die «Pendlermobilität in der Schweiz» des Bundesamtes für Statistik) aus den Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle.

Résumé

Objectifs du travail de recherche

Il manque jusqu'à présent en Suisse (comme dans la plupart des pays européens) des directives valides garantissant la qualité des modèles de demande de transports. L'objectif du présent travail de recherche est de constituer un système largement étayé de valeurs caractéristiques et de méthodes permettant de valider des modèles de demande de transports ainsi que les calculs de modélisation effectués dans ce cadre. Ces valeurs caractéristiques et méthodes doivent comprendre les données d'entrée, l'architecture et les résultats du modèle, et être valides indépendamment du logiciel ou de la méthodologie utilisés. Les valeurs caractéristiques de qualité doivent être définies de telle sorte que les acheteurs de prévisions de trafic disposent de recommandations sur lesquelles ils puissent se baser dans les appels d'offres et à la réception de modèles de transport et dans les calculs y correspondants. Ceci inclut aussi en particulier des recommandations en vue d'une documentation transparente des domaines d'utilisation, des exigences et des limites du modèle.

Procédure

Dans un premier temps une compréhension commune des modèles de demande de transports a été élaborée, et les grands axes des domaines d'application ont été défini en collaboration avec la commission d'accompagnement. Ce travail de recherche est centré sur l'assurance qualité de modèles de demande de transports au plan macroscopique pour des prévisions multimodales à moyen et long terme (de 5 à 30 ans).

Dans un second temps, il a été établi une vue d'ensemble de l'état de la recherche et des directives existantes dans d'autres pays. L'état de la pratique a été déterminé à l'aide d'une enquête auprès d'experts au plan international et de la consultation de dossiers d'appels d'offres et de rapports de modélisation.

Sur la base des constats tirés de l'état de la recherche et de la pratique, les exigences concernant les modèles de demande de transports, les méthodes de contrôle des modèles de demande de transports et les exigences concernant la documentation ont été établies. À la conclusion des travaux, les méthodes développées ont été appliquées à trois modèles existants afin de vérifier si les directives et les valeurs caractéristiques développées sont pertinentes et adaptées à la pratique.

Détermination de l'état de la pratique

L'état de la pratique a été déterminé de trois manières. L'élément central en a été la réalisation et le dépouillement de l'enquête auprès des experts, complétée par une analyse des documents d'appel d'offres et des rapports de modélisation accessibles. Dans le cadre de l'enquête réalisée auprès d'experts à l'été 2016, 73 experts internationaux appartenant au monde scientifique, à l'administration et à des cabinets d'ingénieurs ayant pris part à une enquête en ligne comptant 50 questions ont fourni des informations précieuses sur l'application pratique, la création de modèles de transport et les exigences à ce sujet.

Dans le cadre de cette enquête ainsi que de la consultation de documents d'appel d'offres et de rapports de modélisation, il est apparu que l'assurance de qualité des modèles de demande de transports prend de plus en plus d'importance. Un des indices de cette évolution, et non des moindres, est que les appels d'offres les plus récents donnent un poids plus important à une spécification détaillée du modèle et aux exigences concernant les méthodes et les valeurs caractéristiques pour la validation à utiliser. On manque toutefois encore de standards communs. Il existe en outre ici et là un besoin encore plus important d'amélioration et surtout d'information. Notamment en ce qui concerne la modélisation de résistances d'intersections dépendant de la capacité et du système de signalisation, mais également la vérification des temps de trajet dans le réseau et les mesures de la qualité développées ultérieurement pour la validation des distributions et des valeurs individuelles.

Exigences concernant les modèles de demande de transports

L'élaboration d'un modèle de demande de transports se subdivise en trois étapes:

- création d'une spécification du modèle ;
- création du modèle conformément à la spécification, contrôle de qualité inclus, et
- en option, détermination d'un état de référence pour un ou plusieurs horizons de prévision.

Dans le cadre du travail de recherche, il a été élaboré des conseils et recommandations pour la modélisation de demandes de transports de voyageurs, visant à aider les propriétaires et les créateurs de modèles lors de l'élaboration d'une spécification de modèle. Sur la base des domaines d'utilisation prévus pour le modèle, des recommandations sont faites sur les points suivants :

- les valeurs caractéristiques qui doivent être déterminées à l'aide du modèle ;
- les types de modèles, les phases obligatoires du modèle et la représentation de décisions issues d'un choix ;
- la délimitation de l'espace de planification et d'étude ;
- la représentation de la structure de l'espace et de la structure résidentielle ;
- la représentation de l'offre de transports ;
- la représentation de la demande de transports ;
- la représentation des transports venant de l'extérieur et du trafic de marchandises ;
- les exigences concernant la prévision, et
- les données disponibles et nécessaires.

Il en résulte une liste de contrôle qui doit être utilisée comme fil conducteur pour l'élaboration d'une spécification de modèle complète.

Contrôle de la qualité des modèles de demande de transports

Afin que la justification de la validité d'un modèle puisse être apportée, les écarts entre les valeurs du modèle et les valeurs collectées doivent être quantifiés et évalués au moyen de mesures de qualité statistiques appropriées. La comparaison des valeurs du modèle et des valeurs collectées peut se faire sur la base de valeurs individuelles, de groupes de valeurs individuelles et de distributions de valeurs. En ce qui concerne l'évaluation de valeurs individuelles et de groupes de valeurs individuelles, les mesures de qualité existantes ont été examinées dans le cadre du travail de recherche puis, sur cette base, une mesure de qualité alternative dite *SQV (scalable quality value)*, qui élimine certains inconvénients des mesures de qualité existantes et qui peut être graduée selon différentes plages de valeurs, a été développée. En ce qui concerne l'appréciation de distributions, point sur lequel il existe encore aujourd'hui les lacunes les plus importantes selon l'enquête réalisée auprès des experts, des recommandations concrètes ont été élaborées à partir des mesures de qualité existantes.

Pour la validation et le calibrage de modèles de demande de transports, il est recommandé d'appliquer la procédure d'assurance de qualité représentée à Abb. 2. Dans le cadre du travail de recherche, il a été développé pour chaque étape des recommandations et des tests utilisant la mesure de qualité décrite ci-dessus. L'applicabilité pratique de ces tests a été démontrée dans le cadre d'un « examen virtuel » portant sur trois modèles types.

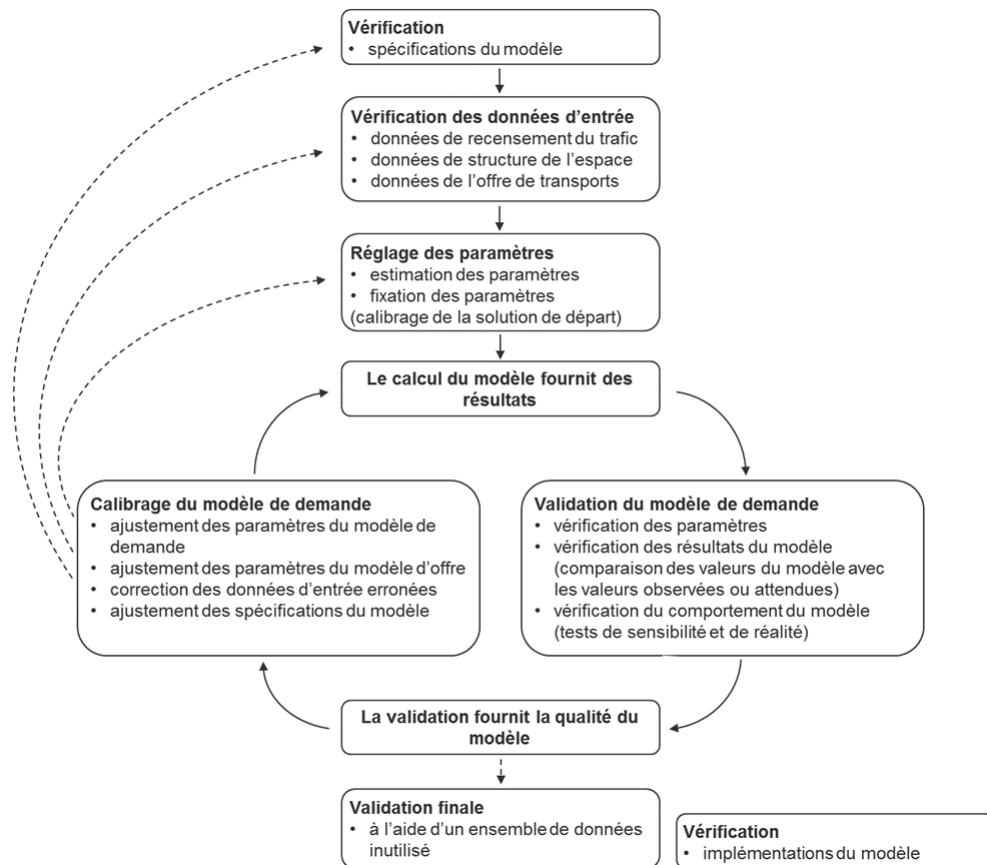


Abb. 2 Procédure d'assurance de qualité pour l'élaboration d'un modèle de demande de transports (source de l'image : [67]).

Application pratique

Au cours de cet examen virtuel, des attentes pour chacun des tests ont d'abord été formulées. Ensuite, les tests ont été réalisés individuellement pour chacun des modèles et les résultats en ont été comparés avec les attentes, non pour évaluer la qualité des modèles de demande de transports, mais pour analyser la pertinence des différents tests et les coûts induits par leur réalisation.

Les tests proposés ont pu être effectués pour en principe tous les modèles testés et en général pour un coût acceptable. Les tests de sensibilité et de réalité proposés ont toutefois entraîné des temps de calcul très longs pour certains modèles. Dans la mesure où ces tests ont été très instructifs, en particulier en ce qui concerne la sensibilité des modèles aux modifications, il est malgré tout recommandé de les effectuer et de prévoir, lors de la planification du calendrier, des temps de calcul en conséquence. La disponibilité et la qualité de données de comparaison pertinentes a constitué une autre difficulté, qui a dû être résolue avant que les exigences concernant la qualité du modèle et les tests à effectuer soient définies.

Besoin de recherche complémentaire

Les mesures de la qualité définies dans le présent travail de recherche ont permis d'indiquer des plages de valeurs pour une qualité qualifiée de « très bonne », « bonne » ou « acceptable ». Ces plages de valeurs doivent être considérées comme des valeurs indicatives. Pour ce qui est de déterminer des valeurs limites en général, on a actuellement une connaissance trop réduite des valeurs des modèles pouvant être effectivement atteintes dans la réalité. C'est pourquoi il faudrait dans les années à venir collecter à cet effet des valeurs empiriques qui puissent être utilisées ultérieurement dans la formulation de

directives à caractère obligatoire. En outre, il serait souhaitable d'harmoniser les directives au plan international, et à tout le moins dans l'espace germanophone.

Ce projet de recherche n'a pu traiter suffisamment deux sujets importants : l'influence de l'abstraction du modèle sur les résultats du modèle et la déduction d'exigences à partir des exigences imposées aux modèles de demande de transports vis-à-vis des enquêtes auprès des ménages (par ex. le microrecensement *Mobilité et transports*) ou d'autres enquêtes (par ex. *La pendularité en Suisse* de l'Office fédéral de la statistique).

Summary

Research objectives

Up to now, Switzerland – like most European countries – has not had generally applicable guidelines for ensuring the quality of transport demand models. The aim of this research work is to compile a broadly supported system of measures and methods for the validation of transport demand models and the model calculations thereby created. The measures and methods are intended to encompass model input data, model architecture and model results and be applicable regardless of the software or methods used. The quality measures are to be defined in such a way as to provide recommendations to clients requesting transport forecasts which they can take as a basis in calls for tenders and in the approval of transport models and their calculations. This includes recommendations for transparent documentation of fields of application, requirements and model boundaries.

Procedure

As a first step, a mutual understanding of transport demand models was reached and, in collaboration with the advisory committee, the focus defined with regard to the fields of application. The central focus of the research is quality assurance of macroscopic transport demand models for multimodal medium and long-term forecasts (5 - 30 years).

In the next step, an overview was created concerning the progress of research and existing guidelines in other countries. The state of implementation was determined with the help of an international experts' survey and a review of tender documents and model reports.

Building on the findings on the state of research and implementation, the requirements for transport demand models, the methods for testing transport demand models and the requirements for documentation were compiled. Finally, the methods developed were applied to three existing models in order to verify whether the developed principles and quality measures were meaningful and workable.

Determination of the state of implementation

The state of implementation has been determined in three ways. The key element was the carrying out and evaluation of an experts' survey. This was supplemented by an analysis of accessible tender documents and model reports. In the context of the experts' survey, in the summer of 2016, 73 international experts from the fields of science, administration and civil engineering provided valuable information on transport model implementation, creation and requirements with the help of an online survey with 50 questions.

In the context of the survey and the review of tender documents and model reports, it emerged that the importance of quality assurance for transport demand models is increasing and that many of the recommendations made in this research are already followed in Switzerland. This is indicated not least by the fact that, with more recent calls for tenders, greater emphasis is placed on a detailed model specification and the requirements for methods and measures to be used for validation. However, common standards are still lacking. In addition there still exists a greater need for improvement and, in particular, a need for information. This applies especially to the modelling of capacity- and controller-dependent intersection obstructions, to the review of travel times in the network and to application of advanced quality measures for the validation of distributions and individual values.

Requirements for transport demand models

The building of a transport demand model can be divided into three stages:

- Drawing up of a model specification,

- Building of the model in accordance with the specification including quality testing and
- Optional establishment of a baseline situation for one or more forecasting horizons.

In the context of this research work, information and recommendations were developed for passenger transport demand modelling, intended to assist model owners and model builders in drawing up a model specification. Starting from the planned fields of application of the model, recommendations are made on the following themes:

- Parameters intended to be determined with the model,
- Model types, required model stages and mapping of choices,
- Definition of the planning and investigation area,
- Mapping of area and settlement structure,
- Mapping of available transport supply,
- Mapping of transport demand,
- Mapping of external transport and commercial transport,
- Requirements for the forecast and
- Available and necessary data.

As a result, a checklist is available intended to be used as a guide for the drawing up of a comprehensive model specification.

Quality inspection of transport demand models

So that the validity of a model can be demonstrated, the deviations between model values and survey values must be quantified and evaluated by suitable statistical quality levels. Comparison of model and survey values can relate to individual values, quantities of individual values and distributions of values. For the evaluation of individual values and quantities of individual values, existing quality levels are reviewed in the context of the research work and, building on this, an alternative quality value, the *SQV* (scalable quality value) is developed which rectifies some of the disadvantages of existing quality values and is scalable within various value ranges. For the assessment of distributions where, according to expert surveys, currently the largest gaps exist, specific recommendations have been devised building on existing quality levels.

The quality assurance process set out in Abb. 3 is recommended for the validation and calibration of transport demand models. In the context of the research work, recommendations and tests have been developed for each step, using the quality measures described above. The practical feasibility of these tests has been shown in the context of a “virtual review” of three basic models.

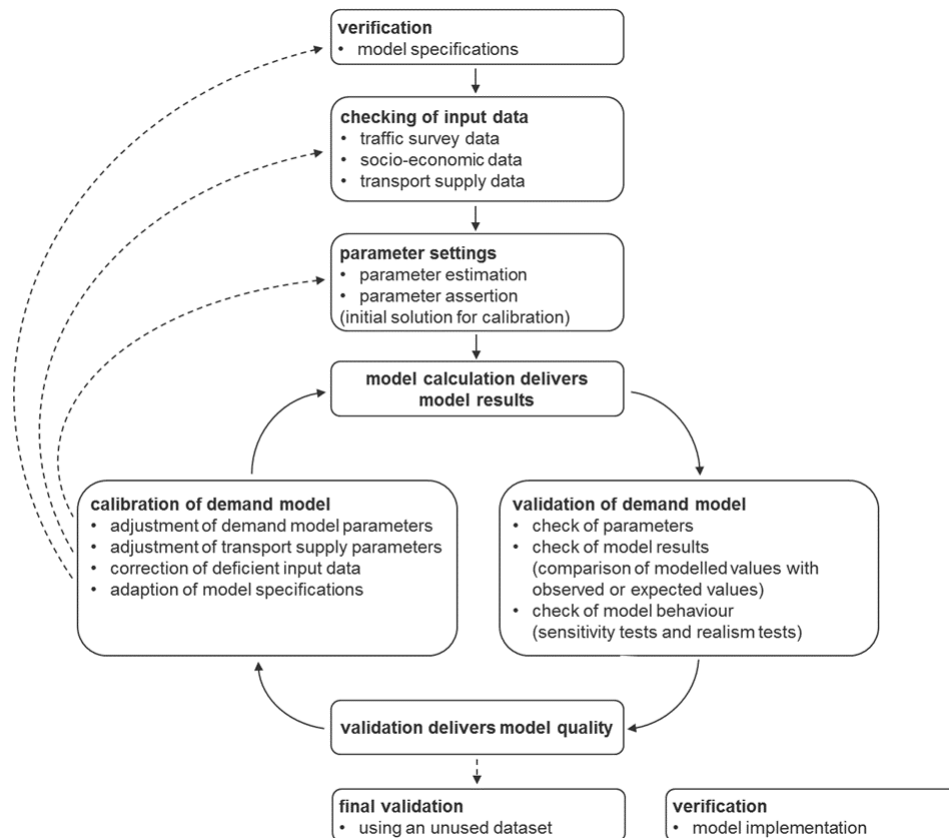


Abb. 3 Quality assurance process for building a transport demand model (image source: [67]).

Practical application

In the context of the virtual review, initially expectations are formulated for each test. Then the tests are carried out for the individual models and the results compared with the expectations. The quality of the transport demand models was not the focus of this review but the verification of the validity of the individual tests and the expenditure and effort involved in their implementation.

The proposed tests could be carried out in principle for all tested models, and, in general, at reasonable expense. The proposed sensitivity and reality tests, however, were the cause of very long calculation times for some models. As these tests were very enlightening, in particular regarding the sensitivity of the models to potential measures, it is nevertheless recommended that they should be carried out and the necessary calculation times taken into account as appropriate in scheduling. Another difficulty was the availability and quality of suitable comparative data. They should be clarified before the requirements for model quality and the tests to be carried out are defined.

Other research required

With the quality levels, in this research work, value ranges were also given for “very good”, “good” or “acceptable” quality. These value ranges are to be seen as guide values. For a general specification of limit values, too little is as of yet known regarding what model values can actually be attained in reality. For this, therefore, empirical values should be gathered over the coming years which can then be used in the formulation of binding guidelines. Moreover, an international agreement on the guidelines would be desirable – at least in the German-speaking area.

Two important issues that it has not been possible to treat in this research project are the influence of model abstraction on the model results and the derivation of requirements for domestic surveys (e.g. the mobility and transport microcensus) or other surveys (e.g. “Commuter mobility in Switzerland” by the Federal Statistical Office) from the requirements for transport demand models.

1 Einleitung

Verkehrsnachfragemodelle sind ein wichtiges Werkzeug der Verkehrsplanung. Sie werden eingesetzt, um die Wirkungen zukünftiger Entwicklungen oder geplanter verkehrlicher Massnahmen 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, die dann beispielsweise Lärm- und Schadstoffemissionen oder Erlöse aus Fahrkarten ermitteln.

Da Verkehrsnachfragemodelle eine wesentliche Grundlage für Entscheidungen über kostenintensive Investitionen darstellen, sind die Anforderungen an ihre Qualität gross. Qualität beschreibt das Mass, in dem ein Produkt die gestellten Anforderungen erfüllt. Fasst man ein Verkehrsnachfragemodell als ein Produkt auf, das von einem Lieferanten (=Verkehrsmodellierer) an einen Kunden (Modellnutzer, z.B. Verkehrsingenieur, Verwaltung) geliefert wird, lassen sich verschiedene Arten von Anforderungen unterscheiden [30]. Allgemein formuliert muss ein Verkehrsnachfragemodell die Realität gut abbilden und realistische Vorhersagen über die Auswirkungen der zu untersuchenden Veränderungen machen können.

Welche Aspekte eines Verkehrsnachfragemodells dabei besonders kritisch sind, ist stark vom Verwendungszweck des Modells abhängig. Häufig soll das gleiche Modell für verschiedene Verwendungszwecke eingesetzt werden, die nicht immer bereits bei der Modellerstellung bekannt sind. Dies kann dazu führen, dass Modellersteller und Anwender bei der Beurteilung der Qualität eines Modells unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Darüber hinaus werden Verkehrsnachfragemodelle von Anwendern oft als „Blackbox“ empfunden und die Grenzen des Modells nicht ausreichend klar kommuniziert. Dies führt dann zu unterschiedlichen Bewertungen der Qualität des Modells.

Ziele der Forschungsarbeit

Bis anhin fehlen in der Schweiz, wie in den meisten europäischen Ländern, allgemein gültige Richtlinien zur Sicherstellung der Qualität von Verkehrsnachfragemodellen. Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, ein breit abgestütztes System von Kenngrössen und Methoden zur Validierung von Verkehrsnachfragemodellen und der damit erstellten Modellberechnungen zusammen zu stellen. Die Kenngrössen und Methoden sollten die Modell-Eingangsdaten, die Modellarchitektur und die Modellergebnisse umfassen und unabhängig von der verwendeten Software oder Methodik gelten. Die Qualitätskenngrössen sollten so definiert werden, dass den Bestellern von Verkehrsprognosen Richtlinien und Standards zur Verfügung stehen, welche sie in Ausschreibungen und bei der Abnahme von Verkehrsmodellen und deren Berechnungen zugrunde legen können. Dies schliesst insbesondere auch Richtlinien für eine transparente Dokumentation von Anforderungen und Modellgrenzen ein.

Im Zentrum der Forschungsarbeit steht die Qualitätssicherung für Verkehrsmodell Anwendungen makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle für multimodale Mittel- und Langfristprognosen (5-30 Jahre). Diese können einer Vielzahl von Anwendungsfällen dienen und verschiedene Einsatzbereiche umfassen. Daneben gewinnen auch agenten-basierte mikroskopische Modelle an Bedeutung. Da mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle die gleichen Kenngrössen liefern wie makroskopische Verkehrsnachfragemodelle, können für die Qualitätssicherung in der Regel die gleichen Qualitätskenngrössen herangezogen werden. Auf Besonderheiten bei der Kenngrössenermittlung mit mikroskopischen Nachfragemodelle wird in Kapitel 6.3 eingegangen.

Vorgehen und Struktur des Berichts

Die Erarbeitung der Richtlinien erfolgte in sieben Arbeitsschritten, die in den folgenden Kapiteln des Berichts dokumentiert sind. Im ersten Schritt wurde ein gemeinsames Verständ-

nis von Verkehrsnachfragemodellen erarbeitet und in Zusammenarbeit mit der Begleitkommission der Schwerpunkt hinsichtlich der Anwendungsbereiche definiert (vgl. Kapitel 2). Im nächsten Schritt wurde ein Überblick über den Stand der Forschung und die bestehenden Richtlinien in anderen Ländern geschaffen (vgl. Kapitel 3). Die Ermittlung des Standes der Anwendung (vgl. Kapitel 0) erfolgte mit Hilfe einer internationalen Expertenbefragung und der Sichtung von Ausschreibungsunterlagen und Modellberichten. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und der Anwendung wurden die Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle (vgl. Kapitel 5), die Methoden zur Prüfung von Verkehrsnachfragemodellen (vgl. Kapitel 6) und die Anforderungen an die Dokumentation (vgl. Kapitel 0) zusammengestellt. Zum Abschluss der Arbeiten wurden drei reale Modelle einem virtuellen Review unterzogen um aufzuzeigen, dass die entwickelten Richtlinien und Kenngrößen aussagekräftig und praxistauglich sind (vgl. Kapitel 8).

2 Verkehrsnachfragemodelle

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Verkehrsnachfragemodelle. Die Texte dieses Kapitels wurden von Friedrich über mehrere Jahre in Skripten für die Lehre (2003-2017) [32] entwickelt, in Buchbeiträgen (2016) [35] und in Veröffentlichungen (2011) [31] publiziert. Die Inhalte der Texte wurden 2015 mit dem Arbeitskreis «Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs» der bundesdeutschen Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen diskutiert und finden in ähnlicher Form im Entwurf geplanter Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen [25]. Sie basieren natürlich auf früheren Lehrbüchern, u.a. den Lehrbüchern von Wermuth (2005) [86], Lohse (2011) [75] und Ortúzar und Willumsen (2004) [23].

2.1 Modelle für die Planung des Verkehrs

Eine wesentliche Aufgabe der Verkehrsplanung ist es, bestehende Zustände zu untersuchen und die Wirkungen potenzieller Massnahmen (z.B. Einrichtung einer neuen ÖV-Linie) und zukünftiger Entwicklungen (z.B. Demografie, Treibstoffpreise) abzuschätzen. Davon ausgehend, dass der Verkehr im Verkehrsnetz das Ergebnis vielfältiger individueller Entscheidungen ist, bilden Verkehrsmodelle die Entscheidungsprozesse der Menschen nach. Abb. 4 zeigt verkehrsrelevante Entscheidungsprozesse von Menschen, 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-Abos, 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-Abo zur Verfügung steht. PW und ÖV-Abos ermöglichen den Menschen die Nutzung bestimmter Verkehrsmittel. Sie werden deshalb in der Verkehrsplanung als Mobilitätswerkzeuge bezeichnet.
- Verkehrsnachfragemodelle bestimmen die Anzahl der Ortsveränderungen, die die Verkehrsteilnehmer im Verkehrsnetz durchführen. Sie bilden hierfür die Entscheidungsprozesse von Menschen nach, die zu Ortsveränderungen führen. Im Personenverkehr umfassen diese Entscheidungen die Aktivitätenwahl, die Zielwahl, die Verkehrsmoduswahl, die Abfahrtszeitwahl und die Routenwahl.
- Verkehrsflussmodelle simulieren die Interaktion zwischen Fahrzeugen bzw. Fussgängern, die im Strassenraum oder auf Schienenverkehrswegen auftreten. Verkehrsflussmodelle für den Kraftfahrzeugverkehr bilden die Geschwindigkeitswahl, die Fahrstreifenwahl und das Abstandswahlverhalten nach.

Moderne Verkehrsplanungsmodelle integrieren zunehmend die Eigenschaften mehrerer Modelltypen. So kann ein Verkehrsnachfragemodell mit einem Verkehrsflussmodell kombiniert werden, um möglichst genaue Reisezeiten für die Zielwahl und die Verkehrsmoduswahl zu erhalten.

▪ Standortwahl	Flächennutzungsmodelle
▪ Fahrzeugbeschaffungswahl	Verkehrsmittel- verfügbarkeitsmodelle
▪ Abobeschaffungswahl	
▪ Aktivitätenwahl	Verkehrsnachfragemodelle
▪ Zielwahl	
▪ Verkehrsmoduswahl	
▪ Abfahrtszeitwahl	
▪ Routenwahl	
▪ Geschwindigkeitswahl	Verkehrsflussmodelle
▪ Fahrstreifenwahl	
▪ Fahrzeugfolgeabstandswahl	

Abb. 4 Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Abbildung in Verkehrsmodellen (Bildquelle: [32] und [35]).

2.2 Typologien von Verkehrsnachfragemodellen

Ein Verkehrsnachfragemodell umfasst eine Reihe von Methoden mit denen sich Verkehrsnachfragematrizen und Verkehrsstärken im Verkehrsnetz eines Untersuchungsraumes bestimmen lassen. Hierfür bildet das Verkehrsnachfragemodell Objekte und Prozesse der realen Welt in vereinfachter, und abstrakter Form nach. Die Vereinfachungen und Abstrahierungen basieren auf Annahmen. Abhängig von den Annahmen lassen sich verschiedene Modelltypologien unterscheiden.

2.2.1 Verhaltensannahmen

Die meisten Verkehrsnachfragemodelle basieren auf folgenden grundlegenden Annahmen:

- Menschen haben Bedürfnisse, die zu Ortsveränderungen führen. Bei der Planung und der Durchführung einer Ortsveränderung wählen die Menschen aus einer Menge von Alternativen. 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.
- Der von den Verkehrsteilnehmern wahrgenommene Nutzen einer Alternative wird von den Informationen beeinflusst, über die die Verkehrsteilnehmer verfügen. Dabei wird angenommen, dass die Verkehrsteilnehmer entweder über unvollständige oder über perfekte Informationen verfügen.
- Die individuellen Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer können die Verkehrslage im Netz beeinflussen. Das ist der Fall, wenn eine hohe Nachfrage den Verkehrsfluss und die Angebotsqualität verändert. Abb. 5 zeigt, wie die Nachfrage die Angebotsqualität und damit die Entscheidungen anderer Verkehrsteilnehmer beeinflussen kann.
- Die Verkehrsnachfrage und das Verkehrsangebot befinden sich über einen längeren Zeitraum in einem stationären Zustand. Diese Annahme unterstellt, dass die Verkehrsteilnehmer über die zu erwartende Verkehrslage im Netz informiert sind und ihre Entscheidungen so anpassen, dass sich das System in einem Gleichgewichtszustand befindet. In diesem Zustand behalten die Verkehrsteilnehmer ihre Entscheidungen bei,

so dass die Routen und die Fahrzeiten zwischen aufeinanderfolgenden Tagen konstant bleiben.

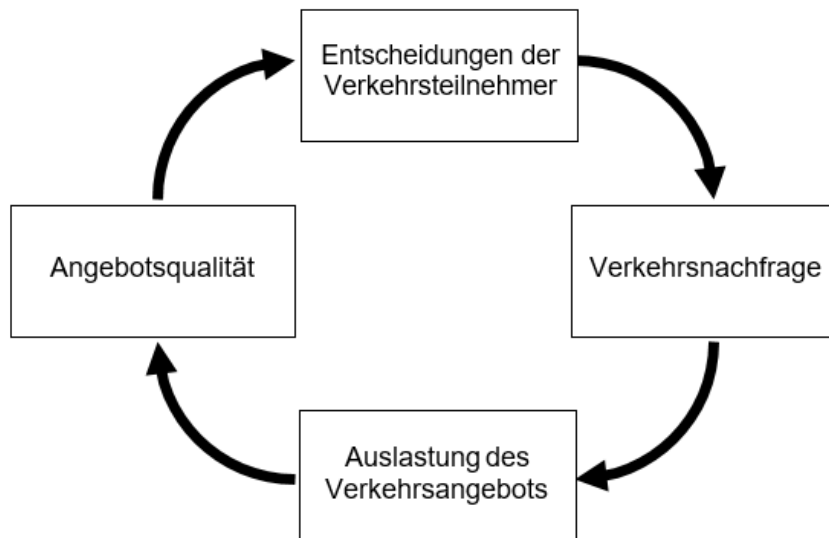


Abb. 5 Rückkopplung zwischen den Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer, der Verkehrsnachfrage und der Angebotsqualität (Bildquelle: [31] und [35]).

2.2.2 Synthetische und inkrementelle Modelle

Ein synthetisches Verkehrsnachfragemodell berechnet die Verkehrsnachfrage direkt aus den Strukturdaten, aus den Daten des Verkehrsangebots und aus Daten zum Mobilitätsverhalten. Es bildet dazu alle relevanten Entscheidungsprozesse (Abb. 4) auf der Ebene von Einzelpersonen oder Personengruppen differenziert nach Wegezwecken ab. Im Netz gezählte Verkehrsstärken werden nur zur Validierung des Modells herangezogen.

Ein inkrementelles Modell berechnet die relative oder absolute Veränderung der Verkehrsnachfrage, d.h. es verwendet eine vorhandene beobachtete oder berechnete Matrix der Verkehrsnachfrage und verändert die Nachfragewerte. Inkrementelle Modelle existieren in unterschiedlichen Ausprägungen:

- Anpassung der Nachfragematrix aufgrund von Veränderungen im Verkehrsangebot, die zu veränderten Reiseaufwänden führen (z.B. Reisezeitänderungen aufgrund von Ausbaumaßnahmen). Die Vorgehensweise erfordert Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Aufwandsänderungen und Verkehrsnachfrageänderungen in Form von Elastizitäten. Diese Vorgehensweise kann als Elastizitätsmodell oder Marginalmodell bezeichnet werden.
- Anpassung der Nachfragematrix durch die Berechnung der Nachfrageänderungen mit einem synthetischen Nachfragemodell. Die Nachfrageänderungen ergeben sich aus den absoluten oder relativen Änderungen der synthetisch berechneten Nachfragematrizen für den heutigen und den zukünftigen Zustand. Dieses Modell kann man als kombiniertes Modell bezeichnen, das ein inkrementelles Modell mit einem synthetischen Modell verknüpft.
- Anpassung der Nachfragematrix an geänderte Verkehrsaufkommenswerte in den Verkehrszellen (z.B. aufgrund von Änderungen bei den Strukturdaten). Die Matrix wird so angepasst, dass die Zeilen- und Spaltensummen mit den geänderten Verkehrsaufkommenswerten übereinstimmen.
- Anpassung der Nachfragematrix aufgrund von Abweichungen zwischen gezählten und modellierten Verkehrsstärken (z.B. Korrektur oder Fortschreibung einer Matrix an Zählwerte). Die Matrix wird über die Routen so angepasst, dass die gezählten und modellierten Verkehrsstärken übereinstimmen. In diese Modellklasse gehört auch die Hochrechnung beobachteter bzw. befragter Ortsveränderungen anhand von Zählwerten auf die Grundgesamtheit aller Ortsveränderungen.

Synthetische Modelle sind immer dann notwendig, wenn es deutliche Änderungen im Verkehrsangebot oder in der Siedlungsstruktur gibt, die eine grundsätzliche Änderung der Nachfragestruktur erwarten lassen. Die meisten inkrementellen Modelle eignen sich für Fälle, in denen die Änderungen im Verkehrsangebot oder in der Siedlungsstruktur klein sind. Kombinierte Modelle werden auch für Anwendungen mit grösseren Änderungen eingesetzt.

2.2.3 Modellstufen

Die in Abb. 4 dargestellten Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmer können in einem synthetischen Modell sequenziell in einzelnen Modellstufen abgebildet werden. Da Wahlentscheidungen nicht immer sequenziell ablaufen, kann es sinnvoll sein, Modellstufen zusammenzufassen. Ausserdem können die Wirkungen späterer Modellstufen Wirkungen auf vorangegangene Modellstufen haben, so dass eine Rückkopplung der Modellstufen zu realistischeren Ergebnissen führen kann.

Das Vier-Stufen-Modell

Das Vier-Stufen-Modell (vgl. Bates [6] und Boyce & Williams [14]) bildet die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer zur Aktivitätenwahl, zur Zielwahl, zur Moduswahl und zur Routenwahl in vier sequenziellen Teilmodellen ab:

- Aktivitätenwahl- oder Verkehrserzeugungsmodelle bestimmen die Zahl der Ortsveränderungen, die von den Bewohnern des Untersuchungsraumes in einem Zeitraum durchgeführt werden. Ergebnis dieses Teilmodells sind die produzierten und angezogenen Ortsveränderungen einer Nachfragegruppe g .

produzierte
Ortsveränderungen d
in Zelle o
von der
Nachfragegruppe g :

$$d_{go}^p$$

angezogene
Ortsveränderungen d
in Zelle d
von der
Nachfragegruppe g :

$$d_{gd}^a$$

- Verkehrszielwahl- oder Verkehrsverteilungsmodelle ermitteln die Quellen o und die Ziele d der Ortsveränderungen und somit die Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen o und d .

Ortsveränderungen d
der Nachfragegruppe g
zwischen den Zellen o
und d :

$$d_{aod}$$

- Verkehrsmoduswahl- oder Verkehrsaufteilungsmodelle bilden die Wahl des Verkehrsmodus m für die einzelnen Ortsveränderungen nach.

Ortsveränderungen d
der Nachfragegruppe g
zwischen den Zellen o
und d
mit Modus m :

$$d_{godm}$$

- Routenwahl- oder Umlegungsmodelle ermitteln die Routen r im Verkehrsnetz und verteilen die Nachfrage auf die Routen und damit auf die Netzelemente (Strecken, Knoten) s im Verkehrsnetz.

Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Zellen o und d mit Modus m auf Route r :

$$d_{godmr}$$

Die Verkehrserzeugung, die Zielwahl und die Moduswahl werden unter anderem vom Wegezweck und den Eigenschaften des Verkehrsteilnehmers beeinflusst. Aus diesem Grund unterscheiden Verkehrsnachfragemodelle Nachfragegruppen. Eine Nachfragegruppe g kann alle Ortsveränderungen eines Wegezwecks (zur Arbeit), einer Quelle-Ziel-Gruppe (z.B. Wohnen - Arbeiten), einer Aktivitätenkette (z.B. Wohnen – Arbeiten - Einkaufen) umfassen, die von einer Personengruppe (z.B. Erwerbstätige mit PW-Besitz) durchgeführt werden.

Am Ende dieser vierstufigen Modellkette sind die Ortsveränderungen d_{godmr} mit ihren Routen bekannt. Werden die Ortsveränderungen, deren Routen r ein bestimmtes Netzelement s enthalten, aggregiert, so erhält man die Verkehrsstärke (Verkehrsbelastung) q_s dieses Netzelementes für alle Verkehrsmodi:

$$q_s = \sum_g \sum_o \sum_d \sum_m \sum_r \sum_{s \in r} d_{godmr}$$

Das Ergebnis wird u.a. als Verkehrsstärkenkarte dargestellt, in denen die Balkendicke die Verkehrsstärke auf den Netzelementen repräsentiert.

Abb. 6 zeigt den Ablauf des Vier-Stufen Modells mit den Eingangs- und Ausgabegrößen für jeden Modellschritt. Kenngrößenmatrizen beschreiben die Angebotsqualität (z.B. Reisezeit, Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit) für die Quelle-Ziel-Relationen im Verkehrsnetz. Die Kenngrößenmatrizen werden in einem vorgeschalteten Schritt berechnet, der der Routenwahl ähnelt. Grundlage der Berechnung ist ein unbelastetes Netz oder ein Netz, das mit einer vorab geschätzten Nachfragematrix belastet wird.

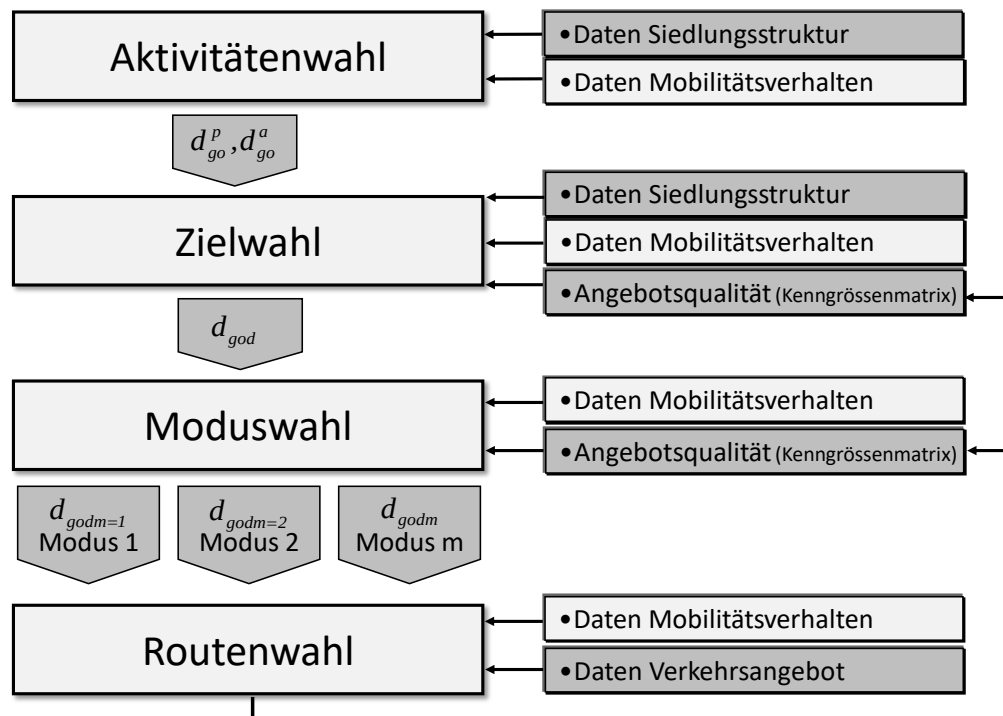


Abb. 6 Das Vier-Stufen Modell mit den wesentlichen Eingangsgrößen: Bevölkerungs- und Siedlungsstrukturdaten, Verhaltensdaten, Verkehrsangebotsdaten (Bildquelle: [32]).

Zusammenfassung von Entscheidungen

Das Vier-Stufen Modell geht davon aus, dass die in den jeweiligen Stufen modellierten Entscheidungen sequenziell und damit unabhängig voneinander ablaufen. Das stellt eine starke Vereinfachung dar, die zu inkonsistenten Ergebnissen führen kann. Um zu berücksichtigen, dass die einzelnen Wahlentscheidungen i.d.R. nicht unabhängig voneinander sind, können Modellstufen integriert werden. Bei der Integration wird die Entscheidungsbildung so abgebildet, dass die Einflussfaktoren aller Teilentscheidungen eingehen. Mit dem Ziel einer Modellvereinfachung können Modellstufen auch zusammengefasst werden; üblich sind hierbei:

- Zusammenfassung von Zielwahl- und Verkehrsmoduswahl:
Simultane oder gekoppelte 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 Velo oder dem ÖV erreichen können.
- Zusammenfassung von Verkehrserzeugung und Verkehrsmoduswahl:
Geht man davon aus, dass die persönlichen Eigenschaften und Umstände 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.

Berücksichtigung weiterer Entscheidungen

Je nach Einsatzbereich des Verkehrsnachfragemodells kann es sinnvoll sein, weitere in Abb. 4 dargestellte Entscheidungen modellseitig abzubilden:

- Standortwahl:
Die Beschaffenheit der Raumstruktur (Lokalisierung von Einwohnern, Nutzungen)

kann im Analysezustand aus statistischen Daten oder mittels Erhebungen erfasst werden. Im Prognosezustand hingegen sind Annahmen zur zukünftigen Raum- bzw. Flächennutzungsstruktur erforderlich. Diese Informationen können entweder aus externen Quellen übernommen (z.B. Bevölkerungsprognose, Regionalentwicklungspläne, Flächennutzungspläne) oder mit Hilfe von Flächennutzungsmodellen abgeschätzt werden. Insbesondere in Situationen, in denen Rückwirkungen von Änderungen im Verkehrssystem auf die Raumstruktur zu erwarten sind, bietet sich die Nutzung von Flächennutzungsmodellen an. Einige dieser Modelle verfolgen den Ansatz, die Wirkungen von Verkehrssystem auf Raumstruktur und umgekehrt (bekannt als „Land-Use Transport Interaction Cycle“) explizit zu beschreiben. Einschränkungen bzgl. der Aussagefähigkeit von Flächennutzungsmodellen in Ländern, in denen die Nutzung neuer Siedlungsflächen das Ergebnis komplexer politischer Entscheidungsprozesse ist, sollten beachtet werden.

- **Fahrzeug- und Abobeschaffungswahl:**
Die Verfügbarkeit sog. Mobilitätswerkzeuge, d.h. die Verfügbarkeit eines PW oder eines ÖV-Abo beeinflusst die Verkehrsmoduswahl und die Zielwahl. Verkehrsnachfragemodelle benötigen deshalb als Input Aussagen über den Anteil der Bevölkerung, der über einen PW und über ein ÖV-Abo verfügt. Für den Prognosezustand kann die zukünftige Verfügbarkeit aus externen Quellen übernommen werden oder mit einem eigenen Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell prognostiziert werden. Dabei kann z.B. die Erreichbarkeit des Wohnstandorts mit dem ÖV als eine erklärende Variable herangezogen werden.
- **Abfahrtszeitwahl:**
Das Verhalten eines Verkehrsteilnehmers kann von der tageszeitabhängigen Reisezeit abhängen und beispielsweise zu einer Ausdehnung der Hauptverkehrszeit (Peak Spreading) führen. Im ÖV müssen die Verkehrsteilnehmer das Fahrplanangebot bei der Abfahrtszeitwahl einbeziehen. Verkehrsnachfragemodelle können die Abfahrtszeitwahl durch die Vorgabe von wegezugweckspezifischen Tagesganglinien oder durch spezifische Entscheidungsmodelle nachbilden.

Rückkopplung zwischen den Entscheidungen

Die Reisezeit kann die Zielwahl, die Moduswahl, die Abfahrtszeitwahl und die Routenwahl beeinflussen. Die Reisezeit im Kfz-Verkehr nimmt in Netzen mit einer hohen Auslastung zu. Hohe Auslastungen im Kfz-Verkehr können ausserdem zu längeren Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit und zu Verspätungen im ÖV führen. Verspätungen im ÖV können auch die Folge überlasteter ÖV-Fahrzeuge sein. Die Auswirkungen der Reisezeit auf die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer lässt sich durch das Einführen der in Abb. 7 dargestellten 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.

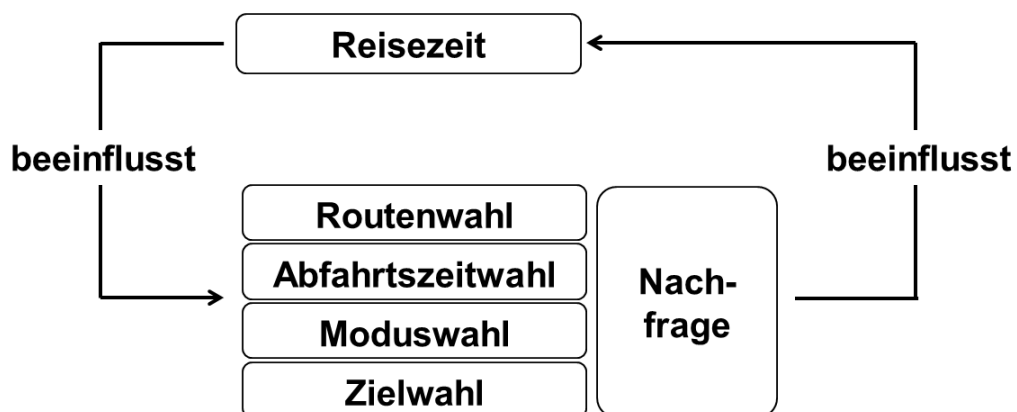


Abb. 7 Rückkopplung zwischen Verkehrsnachfrage und Reisezeit (Bildquelle: [32]).

Bei einer Rückkopplung der Modellstufen Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl müssen die Modellstufen iterativ solange durchgeführt werden, bis sich im System ein Gleichgewichtszustand einstellt. Das ist dann der Fall, wenn sich die Struktur der Verkehrsnachfrage oder die Reisezeitmatrix zwischen zwei Iterationsschritten nicht mehr ändert.

Agentenbasierte Ansätze (mikroskopische Ansätze, vgl. 2.2.4) bilden die Entscheidungen einzelner Agenten (Verkehrsteilnehmer) auf individueller Ebene ab und können deshalb auch Rückkopplungen auf individueller Ebene berücksichtigen. Die Verkehrsteilnehmer passen ihre Entscheidungen autonom an, wodurch sie in Zusammenspiel mit den Entscheidungen der anderen Verkehrsteilnehmer ein Verkehrszustand ergibt. Dieser wird mittels eines nutzenbasierten Ansatzes (vgl. 2.2.1) bewertet, woraufhin die Verkehrsteilnehmer ihre Entscheidungen in der nächsten Iteration verändern. Diese vielfach wiederholte Rückkopplung bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes lässt sich als Lernprozess interpretieren.

2.2.4 Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle

Das in einer Modellbeschreibung 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) zusammenfassen. 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 Untersuchungsraum 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, Ortsveränderungen und Verkehrsstärken:**
In mikroskopischen Nachfragemodellen treffen Agenten Entscheidungen. In einer Entscheidungssituation wählen sie aus einer Menge von Alternativen genau eine Alternative, z.B. einen bestimmten Modus. Ein mikroskopisches Modell liefert daher als (Zwischen-) Ergebnis einzelne Ortsveränderungen einzelner Personen. Für jede Ortsveränderung können folgende Attribute für weitere Auswertungen protokolliert werden: Agentennummer, Wegezweck, Quelle, Ziel, Modus, Route. 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. Um die Verkehrsstärke auf einem Netzelement zu bestimmen, werden im mikroskopischen Modell alle Agenten, die das Netzelement benutzen, addiert. Im makroskopischen Modell wird über die Verkehrsstärken aller Routen, die über das Netzelement führen, aufsummiert. Verkehrsstärken eines mikroskopischen Modells sind immer ganzzahlig, Verkehrsstärken eines makroskopischen Modells sind dagegen reelle Zahlen.
- **Verkehrszustand:**
Ein mikroskopisches Modell kann die Position und die Geschwindigkeit jedes einzelnen Fahrzeuges bestimmen. Makroskopische Modelle ermitteln eine mittlere Geschwindigkeit aus der Verkehrsstärke.
- **Erfahrung und Gedächtnis:**
In makroskopischen Modellen werden aktuelle oder historische Reisezeiten in einer Kenngrössenmatrix auf der Ebene der Quelle-Ziel-Relationen oder in der Umlegung auf der Ebene von Routen gespeichert. Alle Personen greifen, unabhängig von der Personengruppe, auf dieselben Reisezeiten zurück. In mikroskopischen Modellen kann jeder Agent auf ein eigenes Gedächtnis zurückgreifen, in dem Erfahrungen (z.B. Reisezeiten) aus vorangegangenen Tagen gespeichert werden und bei späteren Entscheidungen als Erfahrungswerte mit einfließen.

- **Verkehrsangebot:**
Netzelemente, 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 des Choice Sets, d.h. die Menge 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. ist bei der Routenwahl nicht bekannt, ob der Verkehrsteilnehmer die Route (ggf. innerhalb einer Umweltzone) mit seinem Fahrzeug befahren darf). Makroskopische Modelle können weder Aussagen zur Position von Personen im Netz machen noch Entscheidungen im Kontext des Haushalts (z.B. welche Person nutzt das Fahrzeug des Haushalts) abbilden.

2.2.5 Einzelwegmodelle und Wegekettenmodelle

Im Zuge einer Aushäusigkeit werden häufig mehrere Aktivitäten nacheinander erledigt, ohne dass der Betreffende zwischendurch zur Wohnung zurückkehrt (z.B. Wohnen - Arbeiten - Einkaufen - Wohnen). Dadurch entstehen Aktivitätenketten. Durch die Wahl von Aktivitätenorten werden diese Aktivitätenketten dann in Wegeketten überführt. Je nachdem wie die Aktivitätenketten modelliert werden, können folgende Nachfragemodelle unterschieden werden:

- *Aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle* bestimmen die Ortsveränderungen zwischen zwei Verkehrszellen ohne dabei den Kontext der einzelnen Ortsveränderung innerhalb der Wegeketten der betreffenden Personen zu berücksichtigen. Die tatsächlichen Wegeketten werden in Teilketten mit genau einem Weg, d.h. mit einer Quelle und einem Ziel unterteilt. Lohse (2011) [75] bezeichnet die Teilketten einer Aktivitätenkette als Quelle-Ziel-Gruppen. Eine Quelle-Ziel-Gruppe wird durch die Aktivität an der Quelle und durch die Aktivität am Ziel beschrieben (z.B. „Wohnen – Arbeiten“). Hierbei werden heimatgebundene Gruppen und nicht heimatgebundene Gruppen (z.B. „Arbeiten – Einkaufen“). unterschieden. Aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle erfordern Erzeugungsmodelle, die sicherstellen, dass für jede Zelle die Zahl der produzierten und angezogenen Wege gleich ist. Wegebasierte Verkehrsnachfragemodelle können zu inkonsistenten Ergebnissen kommen, wenn sich aufgrund einer unterschiedlichen Angebotsqualität in der Hin- und in der Rückrichtung unterschiedliche Modal-Split Werte für die beiden Richtungen ergeben.
- *Aktivitätenkettenmodelle* betrachten im Gegensatz dazu die gesamte Rundtour einer Person vom Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr mit allen zugehörigen Wegen. Ausgangspunkt der Modellierung sind vorgegebene Aktivitätenketten mit ihren Auftretenshäufigkeiten. Bei der Zielwahl wird dann jeder Aktivität der Kette ein Aktivitätenort zugewiesen und so in eine Wegekette mit Ortsbezug überführt. Aktivitätenkettenmodelle bilden die Zielwahl und die Moduswahl im Kontext der gesamten Aktivitätenkette nach. Unplausible Verkehrsmittelübergänge werden in Aktivitätenkettenmodellen ausgeschlossen. Ein Verkehrsteilnehmer, der eine Wegekette mit dem PW als Selbstfahrer beginnt, kann in Aktivitätenkettenmodellen nicht mit dem ÖV zurückkehren. Eine Wegekette kann aber als PW-Mitfahrer beginnen und mit dem ÖV enden.
- *Tagesplanbasierte Modelle* (z.B. [3], [70] oder [5]) erweitern Aktivitätenkettenmodelle um die Entscheidungen über die Dauer und Reihenfolge von Aktivitäten. Sie werden im Englischen als Activity Scheduling Models bezeichnet und können nur in mikroskopische Nachfragemodelle integriert werden.

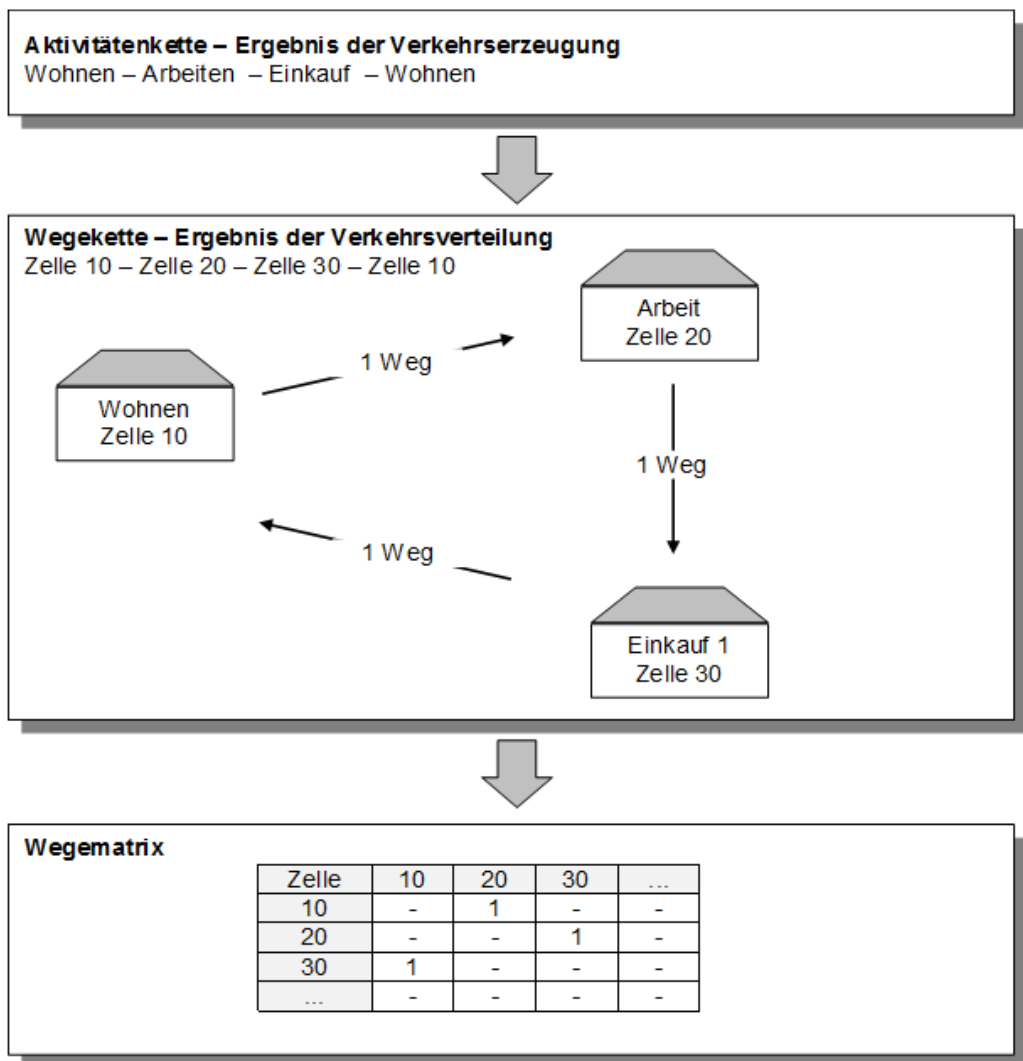


Abb. 8 Zusammenhang zwischen Aktivitätenkette, Wegekette und Nachfragematrix (Bildquelle: [32]).

2.2.6 Berücksichtigung zeitlicher Veränderlichkeit

Daten in einem Verkehrsnachfragemodell können mit oder ohne konkreten 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. Es kann sinnvoll sein, beide Ansätze in einem Modell zu kombinieren, z.B. um die mittleren ÖV-Reisezeiten eines Tages aus dem Fahrplan zu berechnen.

3 Stand der Forschung

3.1 Ursachen für Abweichungen zwischen Modell und Erhebung

Damit der Nachweis der Validität eines Modells erbracht werden kann, müssen die Abweichungen zwischen Modellwerten m (m = Modell) und Erhebungswerten c (c = Count) durch geeignete statistische Gütemasse quantifiziert und bewertet werden. Der Vergleich von Modell- und Erhebungswerten kann sich auf Einzelwerte, Mengen von Einzelwerten und Verteilungen von Werten beziehen. In Verkehrsnachfragemodellen können Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten nach Pestel et al. [67] durch verschiedene Fehler verursacht werden:

- **Abstraktionsfehler:** Ein Nachfragemodell abstrahiert die reale Welt. Beispiele für diese Abstraktion sind Verkehrszellen, Anbindungsknoten oder die Abgrenzung des Modellraums. Diese Abstraktionen führen u.a. dazu, dass der Zellbinnenverkehr keinen Beitrag zu Verkehrsstärken liefert, dass Strassen im Bereich von Anbindungen unrealistische Verkehrsstärken aufweisen können, dass Reisezeiten zwischen nahegelegenen Verkehrszellen von den Anbindungspunkten beeinflusst werden und dass Teile der Nachfrage nicht modelliert, sondern aus anderen Datenquellen ergänzt werden. Diese systematischen Fehler bilden eine Eigenschaft des Modells. Sie können bei der Modellbildung durch eine geeignete Segmentierung von Angebot und Nachfrage reduziert werden. Der Einfluss dieser Fehlerklasse ist schwer quantifizierbar, da sie sich nur durch einen Vergleich mit einem Modell ermitteln lassen, das einen geringeren Abstraktionsgrad aufweist.
- **Implementierungsfehler und Spezifikationsfehler:** Dieser Fehler tritt auf, wenn sich die Modellspezifikation nicht an den Modellanforderungen orientiert oder wenn der Modellersteller die Modellspezifikation fehlerhaft umsetzt. Fehler dieser Fehlerklasse können durch eine Verifikation bzw. durch ein Review der Modellspezifikation und der Modellimplementierung reduziert werden.
- **Messfehler bei Mobilitäts- und Verkehrsdaten:** Jede Messung kann Fehler aufweisen. Das beginnt bei der Erfassung der Wege (Werden alle Aktivitäten berichtet?) mit den zugehörigen Reiseweiten (ohne / mit Geocodierung) und endet bei der Zählung von Verkehrsmengen. Messmethoden (webbasierte, persönliche oder schriftliche Befragung, ohne / mit GPS, manuelle / automatisierte Zählung), Messgeräte und Auswertungsmethoden beeinflussen die resultierenden Erhebungswerte. Fehler dieser Fehlerklasse können durch bessere Erhebungsmethoden teilweise reduziert werden.
- **Messfehler bei den Strukturdaten:** Ein Verkehrsnachfragemodell für den Personenverkehr bildet den Zusammenhang zwischen der Nachfrage von Einwohnern nach Aktivitäten und dem Verkehrsangebot ab. Als Ergebnis liefert es Ortsveränderungen und damit Verkehrsstärken. Die Verkehrsstärken hängen damit unmittelbar von den Raumstrukturdaten ab, die aber immer unbekannte Ungenauigkeiten aufweisen werden. Bei den Einwohnerzahlen können amtliche Statistiken Fehler aufgrund von Zweitwohnsitzen und Wochenendpendler enthalten. Bei den Aktivitätenorten können viele Größen, wie Arbeitsplätze oder Orte für Freizeitaktivitäten nur abgeschätzt werden. Um Fehler dieser Fehlerklasse zu reduzieren, müsste vor allem die amtliche Statistik verbessert werden.
- **Stichprobenfehler:** Die meisten Erhebungswerte beziehen sich nicht auf eine Erfassung der Grundgesamtheit (z.B. alle Einwohner eines Modellraums), sondern auf eine Zufallsstichprobe. Diese Zufallsstichprobe weist Abweichungen gegenüber dem wahren, unbekannten Wert der Grundgesamtheit auf. Das Konfidenzintervall einer Messgrösse definiert einen Bereich, in dem der wahre Wert für ein vorgegebenes Konfidenzniveau (z.B. 95%) liegt. Die relativen Abweichungen eines gemessenen Mittelwerts vom wahren, unbekannten Mittelwert sind bei kleinen Stichproben grösser als bei grossen Stichproben. Stichprobenfehler können durch höhere Stichproben reduziert werden und sind mit Methoden der Statistik quantifizierbar.

- **Dynamikfehler:** Auch bei einer 100% Stichprobe schwanken die beobachteten Werte von Tag zu Tag. Dynamikfehler können ebenfalls mit Methoden der Statistik quantifiziert werden.

Aus den genannten Ursachen lassen sich für die Quantifizierung der Modellgüte eines Verkehrsnachfragemodells folgende Aussagen ableiten:

- Ursache für Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten können Abstraktionsfehler, Implementierungsfehler, Stichprobenfehler und Dynamikfehler sein.
- Die relativen Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten sollten bei Werten, die sich aus vielen Ortsveränderungen ergeben, geringer sein als bei Werten, die nur aus wenigen Ortsveränderungen resultieren. Eine hohe Verkehrsstärke muss eine geringere relative Abweichung als eine niedrige Verkehrsstärke aufweisen. Der Modal-Split Anteil für den Modus Velo darf grössere relative Abweichungen aufweisen als der Modal-Split für den Modus PW. Die mittlere Reisezeit der Personen einer Personengruppe oder eines Teilraumes kann grössere Abweichungen ergeben als die mittlere Reisezeit über alle Einwohner des Modellraums.
- Vergleiche, die nur auf einer kleinen Zahl von Ortsveränderungen beruhen, sollten nicht zur Überprüfung der Modellgüte herangezogen werden.
- Abweichungen, die ein definiertes Gütemass überschreiten, müssen interpretiert und zum Beispiel mit den Modellabstraktionen erklärt werden.

3.2 Quantifizierung der Abweichungen

Die Abweichungen zwischen Modell und Erhebung werden mit statistischen Gütemassen quantifiziert. Dabei wird in Gütemassen für Einzelwerte, für Mengen von Einzelwerten, für Verteilungen und für sonstige Auswertungen unterschieden.

3.2.1 Einzelwerte

Bei der Überprüfung von Einzelwerten wird ein einzelner Modellwert m mit einem Erhebungswert 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. Es ist leicht zu erkennen, dass alleine mit der absoluten oder mit der relativen Abweichung keine angemessene Bewertung möglich ist. Bei hohen Verkehrsstärken (z.B. 10'000 Fz / d) sind – wie oben erläutert – höhere Anforderungen an die relative Abweichung zu stellen, als bei geringen Verkehrsstärken (z.B. 1'000 Fz / d). Für die absolute Abweichung ist es umgekehrt. Hier sind bei hohen Verkehrsstärken grössere Differenzen akzeptabel als bei geringen Verkehrsstärken. Deshalb sind Gütemasse wünschenswert, die sowohl die relative als auch die absolute Abweichung berücksichtigen. Ein verbreitetes Gütemass, dass diese Anforderungen für die Bewertung der Verkehrsstärke erfüllt, ist der sog. *GEH*-Wert. Dieser Wert ist nach Geoffrey E. Havers benannt, der ihn für die Zwecke der Verkehrsplanung einführte. Er ist wie folgt definiert (vgl. z.B. [20]):

$$g_{GEH} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m - c)^2}{m + c}}$$

mit

g_{GEH}	Gütemass <i>GEH</i>
m	Verkehrsstärke des Modells (m = Model)
c	Verkehrsstärke der Erhebung (c = Count)

Die Berechnungsvorschrift des *GEH*-Wertes kann als das geometrische Mittel aus absoluter und relativer Abweichung interpretiert werden:

absolute Abweichung a von m und c :

$$a = \sqrt{(m - c)^2}$$

relative Abweichung r von m und c :

$$r = \frac{\sqrt{(m - c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m + c)}$$

geometrisches Mittel:

$$g_{GEH} = \sqrt{a \cdot r} = \sqrt{\sqrt{(m - c)^2} \cdot \frac{\sqrt{(m - c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m + c)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m - c)^2}{m + c}}$$

Da die absolute und relative Abweichung unterschiedliche Einheiten aufweisen, ist die Herleitung als geometrisches Mittel allerdings problematisch. Der *GEH*-Wert wird u.a. in den englischen Richtlinien (WebTAG Unit 3.1 [20]) als Gütemass herangezogen. Hier wird für stündliche Verkehrsstärken ein *GEH*-Sollwert von 5 gefordert. Die nachstehende Abb. 9 zeigt für drei Sollwerte des *GEH* (5, 10, 15) den Verlauf der unteren und oberen Modellwerte m , die sich bei einer gemessenen Verkehrsstärke c ergeben. Der *GEH* erfüllt die planerische Vorstellung, dass bei höheren Erhebungswerten geringere relative Abweichungen eingehalten werden sollen. Bezogen auf einen Sollwert des *GEH* von 5 ist bei einer Verkehrsstärke von $c = 1'000$ Fahrzeugen für die nach unten abweichenden Modellwerte m eine relative Abweichung von 16% zulässig. Die zulässige relative Abweichung reduziert sich bei einer Verkehrsstärke von $c = 10'000$ Fahrzeugen auf 5%.

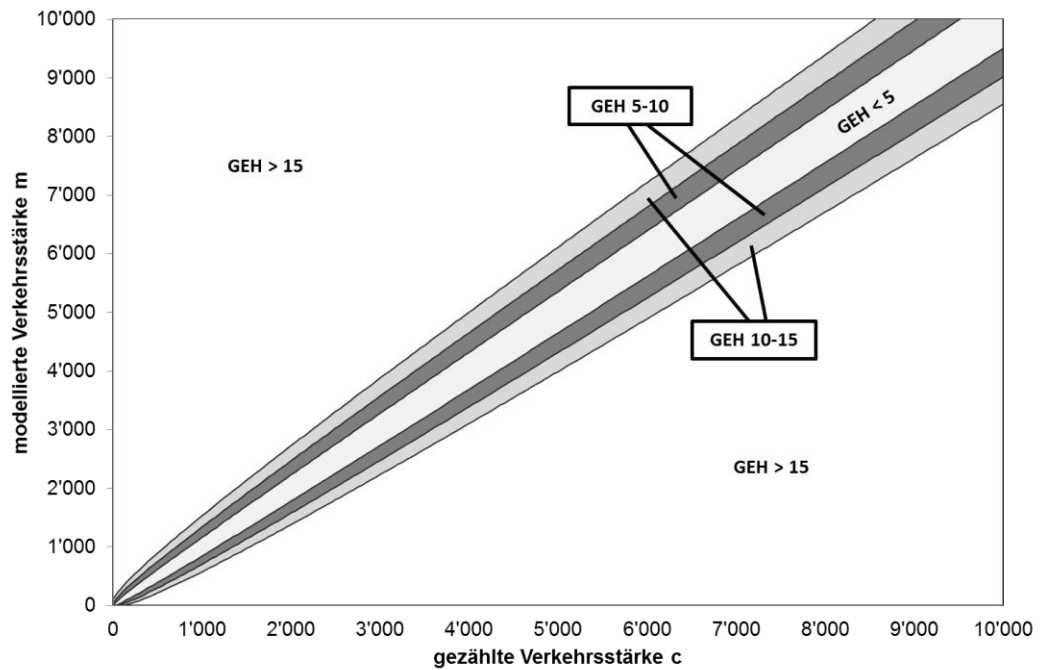


Abb. 9 Verlauf der unteren und oberen Grenzen für die berechneten Werte m für einen GEH-Wert von 5, 10 und 15 (Bildquelle: [37]).

Alternativ zu einem formelbasierten Grenzwert können zulässige Abweichungen auch in tabellarischer Form angegeben werden. Diesen Weg geht ein Bericht aus dem amerikanischen National Cooperative Highway Research Programm (NCHRP) (NCHRP Report 255, [66]). In Abb. 10 sind die im NCHRP-Report vorgeschlagenen zulässigen Abweichungen einem GEH-Wert von 5 (Anforderung an Stundenwerte) und von 15 (denkbare Anforderung an Tageswerte) gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass der NCHRP höhere Abweichungen toleriert.

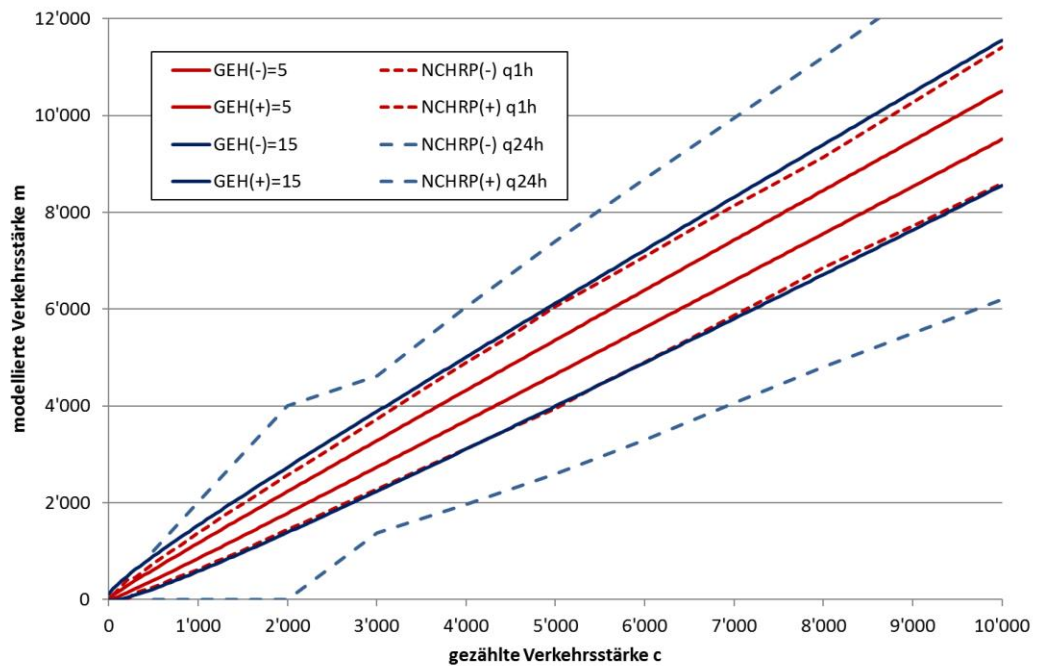


Abb. 10 Gegenüberstellung der zulässigen Abweichungen des GEH-Werts und der Grenzen in NCHRP-255.

In der Literatur wurden keine spezifischen Vorgaben für die zulässigen Abweichungen von Kenngrößen des Mobilitätsverhaltens gefunden.

3.2.2 Mengen von Einzelwerten

Der Vergleich von Mengen von Einzelwerten vergleicht 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. [71] geben einige Hinweise für die Klassenskalisierung:

- 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, schlagen Sammer et al. [71] eine einheitliche Klasseneinteilung für Verkehrsstärken vor, die in Abb. 11 dargestellt ist (schwarz dargestellte Klassen). Das bereits beschriebene Problem der „Selbstskalierung“ bleibt bei diesem Vorgehen allerdings bestehen.

Um die Übereinstimmung der modellierten und gemessenen Wertemengen – insbesondere Verkehrsstärken – zu bewerten, werden häufig die nachstehend erläuterten Gütemasse herangezogen. Für diese Gütemasse gilt, dass sie nur die Menge der Werte beurteilen. Fehlerhafte Einzelwerte können dabei übersehen werden, obwohl sie z.B. aufgrund ihrer Lage von grosser Bedeutung sind. Aus Sicht der Autoren sollten diese Gütemasse deshalb nur ergänzend zu den Gütemassen für die Einzelwerte herangezogen werden.

Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmass

Der Korrelationskoeffizient R und das Bestimmtheitsmass R^2 stellen Qualitätsmasse dar, die die Abhängigkeit von zwei Datensätzen überprüfen. R ist eine dimensionslose Grösse zwischen -1.0 und 1.0. Sie spiegelt das Ausmass der linearen Abhängigkeit zwischen zwei Datensätzen wieder. Das Bestimmtheitsmass drückt aus, wie hoch der Anteil der Variation ist, der von den unabhängigen Variablen des Modells erklärt wird. Dabei gilt, dass mit einem grösser werdenden Bestimmtheitsmass der Anteil der Daten höher ist, die durch die Regressionsfunktion erklärt werden. Weiterhin wird R^2 als Verhältnis der Varianz der abhängigen Variable zur Varianz der unabhängigen Variablen interpretiert. Diese Interpretation kann jedoch nur teilweise auf die Validierung einer Verkehrsumlegung übertragen werden, da die Umlegung bedingt durch verschiedene Kalibrierungs- und Validierungsdatensets nicht vollständig unabhängig von den Verkehrszählungen ist. Weiterhin ist kritisch zu betrachten, dass das Bestimmtheitsmass einerseits nichts über die Kausalität des betrachteten Zusammenhangs aussagt und andererseits mit zunehmender Anzahl an untersuchten Einflussfaktoren zwangsläufig steigt [4; 18]. R^2 ist daher nur mit Einschränkungen als Gütemass geeignet. In der Literatur genannte Grenzen für akzeptable R^2 -Werte schwanken zwischen 0.88 [18], 0.95 [18] und 0.98 [20].

$$R(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \cdot \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2}}$$

mit

N Anzahl der Einzelwerte

x_n bzw. y_n n . Messwert bzw. Modellwert

$\bar{x}$ bzw. $\bar{y}$ Mittelwert aller Messwerte bzw. Modellwerte

Da das Bestimmtheitsmass nichts über die Streuung der Daten aussagt, bietet es sich zusätzlich an, eine lineare Regressionsfunktion zu bestimmen. Die Steigung der Regressionsgeraden, die zwar auch keine Aussage zur Streuung liefert, aber ein eigenes Qualitätsmass für die Übereinstimmung der modellierten und erhobenen Daten darstellt, sollte laut WebTAG (Unit 3.1) [20] für Verkehrszellenwerte zwischen 0.98 und 1.02 liegen.

Für die Geradensteigung ist es allerdings entscheidend, ob der Schnittpunkt zwischen Gerade und Koordinatenursprung erzwungen wird. Die Steigung und das Bestimmtheitsmass weisen bei einem erzwungenen Schnittpunkt auf eventuelle systematische Fehler hin (z.B. die Modellwerte sind immer zu gross), allerdings geht durch dieses Erzwingen auch ein zusätzliches Qualitätsmass, der Ordinaten Schnittpunkt, verloren. Idealerweise sollte der Schnittpunkt von Regressionsgerade und Ordinate nahe dem Koordinatenursprung liegen.

Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

Dieses Qualitätsmass, das unter anderem im Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [18] vorgeschlagen wird, findet im Bereich der Verkehrsnachfragemodellierung häufig Anwendung beim Vergleich von Verkehrsstärken. Voraussetzung ist, dass die Strecken nach Strassenklasse (funktionale Klassierung) oder Verkehrsstärke (qualitative Klassierung) klassifiziert sind. Zusätzlich ist es möglich, die Strecken gemäss ihrer geographischen Lage zusammenzufassen, was die Validierungsinformation weiter erhöht. Eine allzu sehr aggregierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers sagt allerdings wenig aus und lässt somit keine Rückschlüsse auf das Gesamtmodell zu. Neben der Beurteilung der Umlegungsqualität dient die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers auch zur Einschätzung der Modellstufenqualität [71; 18].

Der Wert der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers ist unter verschiedenen Bezeichnungen und Akronymen geläufig, die an dieser Stelle kurz aufgeführt werden sollen, um auf die unterschiedlichen Definitionen aufmerksam zu machen. Sammer et al. [71] verwenden den Begriff der Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate, wobei sie hierbei noch die „absolute Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate“ (AWA) und die „prozentuale Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate“ (PWA) unterscheiden. Um zu berücksichtigen, dass verschiedene Zählstellen eine unterschiedliche Genauigkeit aufweisen, stellen die Autoren des QUALIVERMO eine zusätzliche Variante der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers vor, die eine Genauigkeitsgewichtung vornimmt.

In den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation [26] wird die prozentuale Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers als „Root Mean Squared Percent Error“ (RMSPE) verwendet. Sie entspricht der Berechnungsformel des PWA und stellt die Grösse des Fehlers relativ zum Mittelwert dar.

Die englischen und amerikanischen Richtlinien (z.B. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [18]) sprechen vom „Root Mean Squared Error“ (RMSE) bzw. von dessen prozentualer Form, dem „Percent Root Mean Squared Error“ (%RMSE). Während der RMSE und die österreichischen AWA eine identische Berechnungsvorschrift aufweisen, weichen die Formel des %RMSE und des österreichischen PWA (bzw. des deutschen RMSPE) voneinander ab. Der RMSE und der %RMSE berechnen sich auf folgende Weise:

$$RMSE(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2}{N}}$$

$$\%RMSE(x, y) = \frac{RMSE}{\frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2}{N}}}{\frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}} \cdot 100\%$$

mit

N Anzahl der Einzelwerte

x_n bzw. y_n n . Messwert bzw. Modellwert

Für den %RMSE finden sich in den Regelwerken amerikanischer Bundesstaaten Vorschläge für Richtwerte, die in Abb. 11 dargestellt sind. Dabei ist zu beachten, dass die Klassenbreiten zwischen den einzelnen Richtlinien variieren.

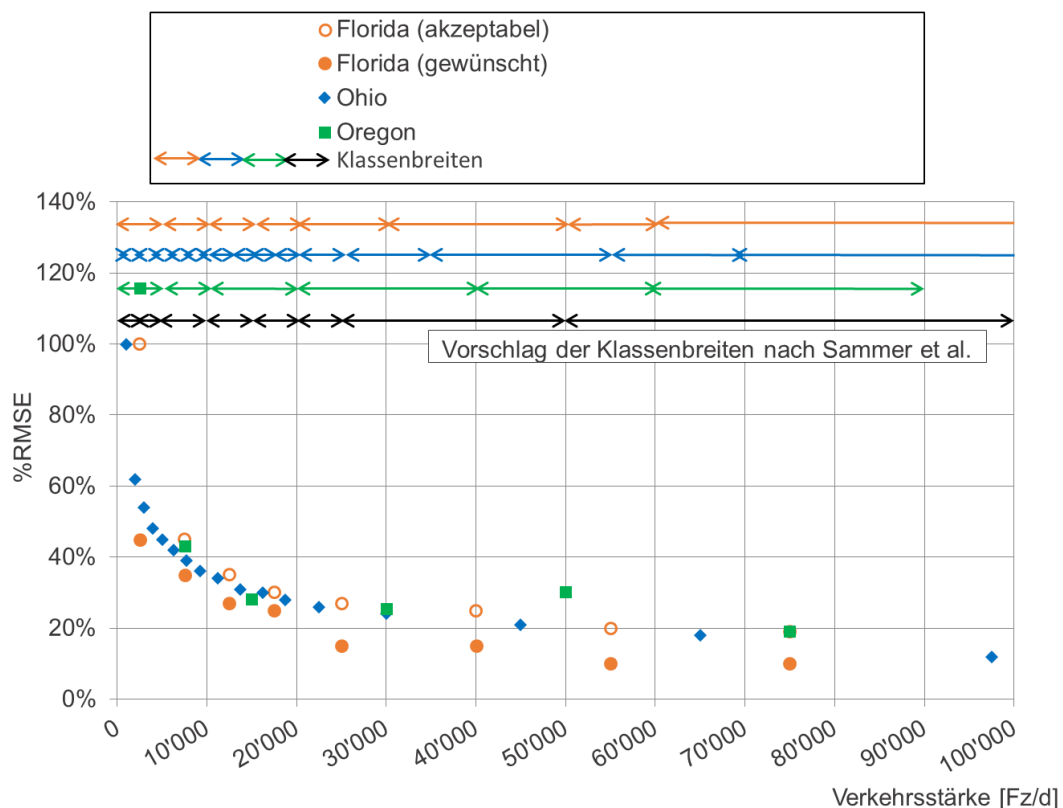


Abb. 11 Zulässige %RMSE-Werte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärkenklasse [18] und Klasseneinteilung nach Sammer et al. [71].

Häufigkeitsverteilungen von Einzelwerten

Für Mengen von Einzelwerten lassen sich neben ihrer Betrachtung als Einzelwerte, Häufigkeitsverteilungen der statistischen Gütemasse für Einzelwerte ausweisen. Sie geben den Anteil der Wertepaare an, deren Gütemasse in bestimmte Gütemassklassen (z.B. GEH 0 bis 5, 5 bis 10, > 10) entfallen.

3.2.3 Verteilungen

Zur Prüfung der Übereinstimmung von zwei Verteilungen (z.B. Reiseweiten- oder Reisezeitenverteilungen) können diese in einem gemeinsamen Diagramm abgetragen werden (siehe Abb. 12).

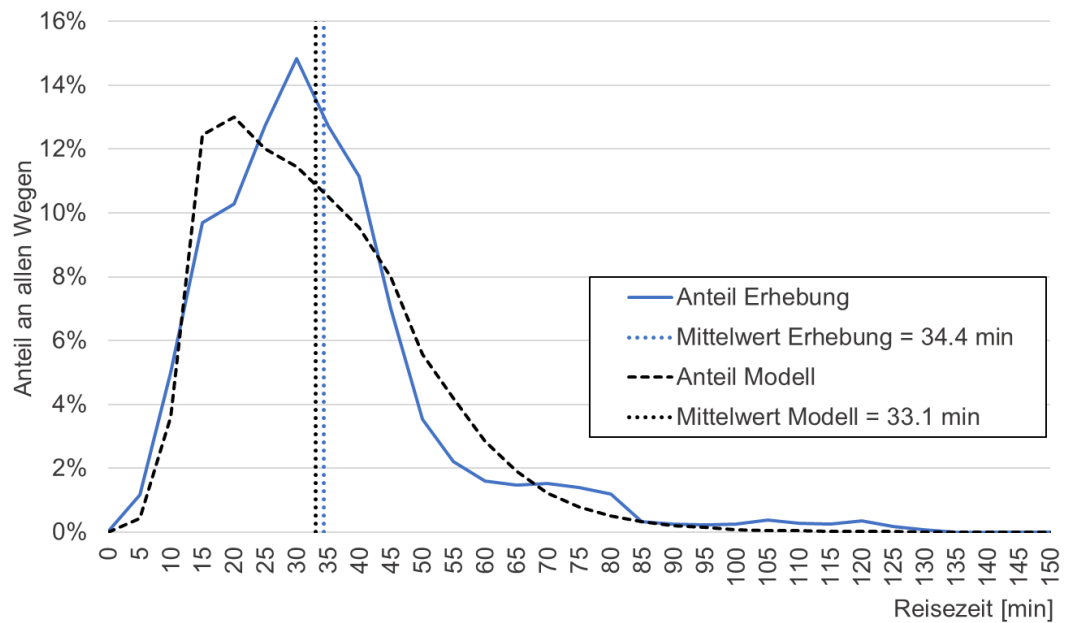


Abb. 12 Vergleich einer gemessenen und einer modellierten Reisezeitverteilung.

Eine rein optische Prüfung auf Übereinstimmung ist jedoch oft nicht ausreichend. Im Folgenden wird eine Auswahl verschiedener Masse erläutert, anhand derer der Vergleich von zwei Verteilungen x und y quantifiziert werden kann.

Lageparameter einer Verteilung

Der Vergleich folgender Lageparameter, die Lage, Aussehen und Eigenschaften der Verteilungen beschreiben, ist zu empfehlen. Die dargestellten Berechnungsvorschriften beziehen sich dabei immer auf klassierte Daten – aus diesem Grund ist es auch unerheblich, ob mit relativen oder absoluten Häufigkeiten gerechnet wird.

- Grösse der Stichprobe bzw. der Grundgesamtheit N
- Gewichteter Mittelwert der gesamten Verteilung (entspricht der mittleren Kenngrösse, z.B. der mittleren Reiseweite)

$$\bar{m} = \frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot m_k}{N}$$

- Standardabweichung der gesamten Verteilung

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot (m_k - \bar{m})^2}{N - 1}} \quad (\text{für eine Stichprobe})$$

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot (m_k - \bar{m})^2}{N}} \quad (\text{für eine endliche Grundgesamtheit})$$

- Variationskoeffizient der gesamten Verteilung

$$V_m = \frac{S_m}{\bar{m}}$$

- Schiefe der gesamten Verteilung

$$Sch_m = \frac{\frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot (m_k - \bar{m})^3}{(N-1)}}{\sqrt{\left(\frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot (m_k - \bar{m})^2}{(N-1)} \right)^3}}$$

mit

m_k	Klassenmitte m der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}_+^*$)
x_k	absolute Häufigkeit x in der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}_+^*$)
K	Klassenanzahl
N	Anzahl der Einzelwerte

Korrelationskoeffizient bzw. Bestimmtheitsmass

Dieses Gütemass wird in Kapitel 3.2.2 erläutert.

Coincidence Ratio

Das Coincidence Ratio (CR) untersucht, wie gut sich zwei Verteilungen überdecken (siehe Abb. 13). Eingangsgrösse für die Berechnung sind die jeweiligen relativen Einzelhäufigkeiten einer Klasse. Der errechnete CR -Wert hat einen Wertebereich von 0 bis 1, wobei $CR = 1.0$ eine vollkommene Übereinstimmung und $CR = 0$ keinerlei Übereinstimmung anzeigt. Ab einem Wert von $CR = 0.7$ wird laut Travel Model Validation And Reasonableness Checking Manual [18] von einer guten Übereinstimmung gesprochen.

$$CR(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^K \min\{p_k, q_k\}}{\sum_{k=1}^K \max\{p_k, q_k\}}$$

mit

$$p_k = \frac{x_k}{\sum_{k=1}^K x_k} \quad \text{und} \quad q_k = \frac{y_k}{\sum_{k=1}^K y_k} \quad \text{sowie:}$$

K Klassenanzahl

x_k bzw. y_k Häufigkeit in der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}_+^*$)

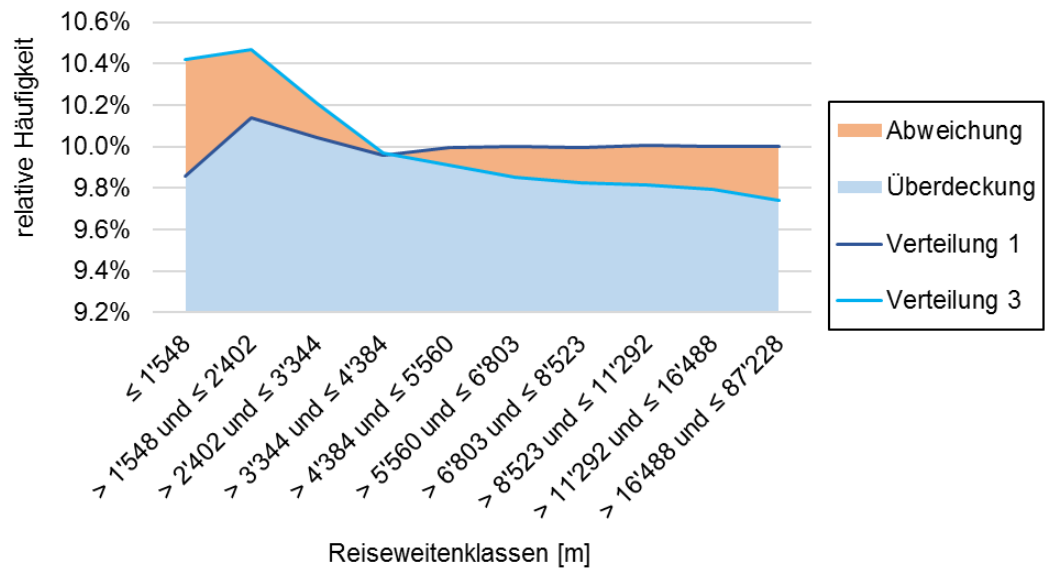


Abb. 13 Überdeckung von Verteilungen (Coincidence Ratio).

Euklidische Distanz

Die euklidische Distanz $d(x, y)$ als Sonderform der Minkowski-Metrik betrachtet die Summe der quadrierten Abweichungen über alle Verteilungsklassen. Um vergleichbare Merkmalsmasseinheiten aufzuweisen, empfiehlt sich eine Standardisierung der Verteilungen. Damit lässt sich zudem die Frage umgehen, ob mit absoluten oder relativen Häufigkeiten gerechnet werden soll [4].

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

Für die Standardisierung der Daten ist x_k mit $\tilde{x}_k$ zu ersetzen (y_k analog), wobei gilt:

$$\tilde{x}_k = \frac{x_k - \bar{x}}{s_x}$$

mit

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K x_k \quad \text{und} \quad s_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^K (x_k - \bar{x})^2} \quad \text{sowie:}$$

K	Klassenanzahl
x_k bzw. y_k	(absolute oder relative) Häufigkeit in der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}_+^*$)
$\tilde{x}_k$ bzw. $\tilde{y}_k$	normierte Häufigkeit in der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}_+^*$)
$\bar{x}$	Klassenmittelwert
s_x	Standardabweichung

Ungleichheitskoeffizient nach Theil

Der Ungleichheitskoeffizient nach Theil überprüft die Übereinstimmung zweier Verteilungen. Unglücklicherweise wurden zwei gleichnamige Indikatoren $U_1(x, y)$ und $U_2(x, y)$ entwickelt. Daneben gibt es noch drei weitere Fehleranteile, mit denen sich die Abweichungen von zwei Verteilungen genauer analysieren lassen [26; 9; 1].

- Der Ungleichheitskoeffizient $U_1(x, y)$ hat einen Wertebereich von 0 bis 1, wobei $U_1(x, y) = 0$ eine perfekte Übereinstimmung und $U_1(x, y) = 1$ die schlechteste Übereinstimmung anzeigt. Die schlechteste Übereinstimmung tritt ein, wenn entweder eine negative Proportionalität zwischen x_k oder y_k besteht oder wenn alle x_k bzw. y_k gleich Null sind. Da alle Verteilungen besser bewertet werden als eine Verteilung mit $y_k = 0$ (naive Prognose), ist $U_1(x, y)$ nicht eindeutig interpretierbar. Es sollte daher nicht verwendet werden [9; 1].

$$U_1(x, y) = \frac{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k)^2} + \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (y_k)^2}}$$

- Der Ungleichheitskoeffizient $U_2(x, y)$ hat einen Wertebereich von 0 bis unendlich, wobei $U_2(x, y) = 0$ eine perfekte Übereinstimmung anzeigt. Bei $U_2(x, y) = 1$ hat die y_k -Verteilung die gleiche Güte wie eine naive Prognose. Demzufolge deutet $U_2(x, y) > 1$ darauf hin, dass die y_k -Verteilung nicht gut ist, da selbst eine naive Prognose besser bewertet wird. $U_2(x, y)$ ist immer $U_1(x, y)$ vorzuziehen [9; 1].

$$U_2(x, y) = \frac{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (x_k)^2}}$$

- Der Verzerrungsanteil $U^M(x, y)$ gibt den Anteil des mittleren quadratischen Fehlers an, der aus einer Ungleichheit der Mittelwerte kommt, die aus einer systematischen Über- oder Unterschätzung resultiert. Eine gute Übereinstimmung ist erreicht, wenn $U^M(x, y) = 0$ gilt [26].

$$U^M(x, y) = \frac{(\bar{x} - \bar{y})^2}{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

- Der Nicht-Effizienz Anteil $U^S(x, y)$ betrachtet systematische Unterschiede in der Varianz. Eine gute Übereinstimmung ist erreicht, wenn $U^S(x, y) = 0$ gilt [26].

$$U^S(x, y) = \frac{(s_x - s_y)^2}{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

- Der Kovarianzanteil $U^C(x, y)$ beschreibt das Fehlen eines linearen Zusammenhanges zwischen den beiden Messreihen. Er misst damit unsystematische, zufällige Fehler. Eine gute Übereinstimmung ist erreicht, wenn $U^C(x, y) = 1$ gilt [26].

$$U^C(x, y) = \frac{2 \cdot (1 - R) \cdot s_x \cdot s_y}{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

mit

K Klassenanzahl

x_k bzw. y_k Häufigkeit in der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}_+^*$), bei $U_2(x, y)$ explizit relative Häufigkeiten

$\bar{x}$ bzw. $\bar{y}$ Klassenmittelwert der Verteilung x bzw. y

s_x bzw. s_y Standardabweichung der Verteilung x bzw. y

R Korrelationskoeffizient

Abstandsmass nach Vortisch

Das Abstandsmass nach Vortisch [82] berücksichtigt die Ähnlichkeit in Form und Lage zweier Verteilungen. Für die Berechnung sind absolute Häufigkeiten heranzuziehen. Die Ähnlichkeit der Form der Verteilungen x und y wird mathematisch durch den Korrelationskoeffizienten R ausgedrückt. Hierbei sind folgende Sonderfälle zu beachten:

- Eine der beiden Verteilungen ist konstant: $R = 0$.
- Beide Verteilungen sind konstant: $R = 1$.

Die Lageähnlichkeit wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{|D(x, y)|} \sum_{k=1}^K \frac{\min\{x_k, y_k\}}{\max\{x_k, y_k\}}$$

Auch hier gilt es folgende Sonderfälle zu beachten:

- Wenn $x_k = y_k = 0$, dann gilt $\theta(x, y) = 1$.
- Wenn $|D(x, y)| = 0$, dann gilt $\theta(x, y) = 0$.

Zusätzlich zur Lage- und Formähnlichkeit wird die Überlappung der Definitionsbereiche berücksichtigt:

$$\sigma(x, y) = \frac{|D(x, y)|}{|D(x) \cup D(y)|}$$

Abschliessend werden die erläuterten Einzelbestandteile zu einem allgemeinen Abstandsmass $\Delta(x, y)$ zusammengeführt

$$\Delta(x, y) = 1 - (\alpha \cdot R(x, y) + (1 - \alpha) \cdot \theta(x, y)) \cdot (\gamma \cdot \sigma(x, y) + (1 - \gamma) \cdot 1)$$

Mithilfe der Parameter α und γ kann der Form-, Lage- und Definitionsbereichseinfluss reguliert werden. Vortisch [82] empfiehlt standardmässig $\alpha = \gamma = 0.5$. Bei vollkommener Übereinstimmung der Verteilungen ergibt sich $\Delta = 0$ und bei komplett abweichenden Verteilungen $\Delta = 1$.

mit

K	Klassenanzahl
x_k bzw. y_k	Häufigkeit in der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}_+^*$)
$D(x, y)$	gemeinsamer Definitionsbereich von x und y
$D(x)$ bzw. $D(y)$	Definitionsbereich von x bzw. y
α	Parameter für den Form- und Lageeinfluss $\in [0, 1] \cap \mathbb{Q}$
γ	Parameter für den Definitionsbereichseinfluss $\in [0, 1] \cap \mathbb{Q}$

Statistische Tests

Statistische Tests, wie der Kolmogorov-Smirnoff-Test, eignen sich nur bedingt zum Verteilungsvergleich, da das zu ermittelnde Prüfkriterium aufgrund der meist sehr grossen Stichprobengrösse – ein Modell repräsentiert eine Vollerhebung – sehr streng wird. Zudem wird bei dem Kolmogorov-Smirnoff-Test nur die Lage der relativen Häufigkeiten beurteilt und nicht die Lage der absoluten Häufigkeiten.

3.2.4 Grafische Darstellungen

Zur weiteren Unterstützung bei der Auswertung und zur besseren Veranschaulichung der Modellergebnisse bieten sich Visualisierungen an, z.B.:

- Darstellung von Belastungs- und Differenzplots des Netzmodells.
- Darstellungen von Belastungsspinnen an wichtigen Querschnitten oder für Verkehrszellen von zentralen Orten. Sie zeigen die Quellen und Ziele der Verkehrsströme an, die das gewählte Netzelement passieren.



Abb. 14 Beispielhafte Darstellung einer PW-Spinnenbelastung eines städtischen Gebiets (Stuttgart-Mitte).

- Darstellungen von erhobenen und modellierten Reisezeiten auf stichprobenartig ausgewählten Routen. Die beobachtete Reisezeit sollte dabei mit einem Konfidenzbereich von 95% angegeben werden.

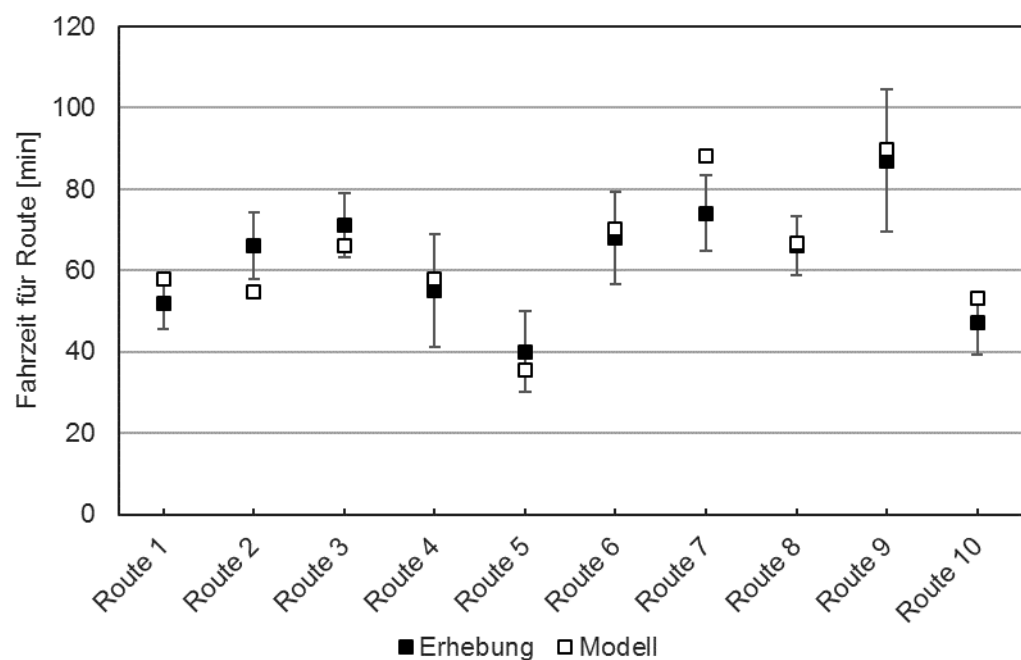


Abb. 15 Beispielhafter Vergleich von erhobenen und modellierten Routenfahrzeiten (modifizierte Darstellung nach [77]).

3.3 Einsatzbereiche für Qualitätskenngrößen

Modelleingangsdaten

Die Eingangsdaten eines Modells werden im Wesentlichen in Verkehrserhebungsdaten, Raumstrukturdaten und Verkehrsangebotsdaten unterschieden.

Verkehrserhebungsdaten beinhalten personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen und netzbezogene Daten zu Verkehrsstärken an Zählstellen und Fahrzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz.

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.

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.).

Modellparameter

Die Modellparameter sind die Stellschrauben des Modells. Beispiele für Parameter sind die Parameter der Nutzenfunktion für die Verkehrszielwahl und die Verkehrsmoduswahl, die Parameter der Widerstandsfunktion bei der Routenwahl oder die Parameter der CR-Funktion. Ebenso können Eigenschaften des Netzmodells (z.B. die Zellengröße, die Zahl und Lage von Anbindungen oder die Streckenkapazitäten) und Eigenschaften des Nachfragemodells (z.B. die Zahl von Personengruppen und Wegezwecken) als Parameter betrachtet werden.¹ Parameter werden während der Kalibrierung angepasst, um das Modell möglichst nah an die Realität anzugleichen. Nichtsdestotrotz sollten die einzelnen Parameter einer Prüfung unterzogen werden.

Modellergebnisse

Für die Validierung bzw. die Beurteilung der Modellgüte werden die Modellergebnisse betrachtet. Diese lassen sich in folgende Gruppen zusammenfassen: Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistungen, Verkehrszeitaufwände und Verkehrsstärken:

- Verkehrsaufkommensdaten haben die Anzahl der Wege als Bezugsgröße,
- Verkehrsleistungsdaten beziehen die Wege auf die zurückgelegte Entfernung,
- Verkehrszeitaufwandsdaten beziehen die Wege auf die benötigte Zeitdauer,
- Verkehrsstärken sind objektbezogene (z.B. strecken- oder screenlinebezogene) aggregierte Größen.

Modellverhalten

Neben den Modellergebnissen sind auch die Auswirkungen veränderter Parametersätze und veränderter Variablenausprägungen zu untersuchen. Dazu dienen Sensitivitätstests und Realitätstests. In Sensitivitätstests werden die Parameterwerte variiert, in Realitätstests die Variablenausprägungen.

¹ Im Gegensatz zu Parametern beschreiben Variablen zeitlich veränderbare Größen (z.B. die Bevölkerungsstruktur oder die Energiepreise) oder Größen, die durch planerische Entscheidungen bestimmt werden (z.B. die Zahl der Arbeitsplätze pro Verkehrszelle, die Anzahl von Fahrstreifen auf einer Strecke, die Lage von Haltepunkten oder die Preise für Parken oder Fahrkarten).

3.4 Übersicht über Modellierungsrichtlinien und Forschungsprojekte

Modelling Transport (2004)

Dios Ortúzar und Willumsen (2004) beschreiben eine Qualitätsanalyse, die ihren Fokus vor allem auf den Umlegungsergebnissen hat. Werkzeuge für die Qualitätsbestimmung sind hierbei Scatterplots, Bestimmtheitsmasse (R^2), Regressionsgeradengleichungen und *GEH*-Werte. Zusätzlich sollen die Reisezeiten des Modells ausgewertet werden. Daneben empfehlen sie, das Netzmodell mehrmals zu prüfen (auf Richtigkeit der Inputdaten und der Anbindungen z.B. mittels einer Dummy-Umlegung). Weiterhin sollen die Modellparameter und deren Gewichtungen überprüft werden (z.B. Umlegungsparameter) [23].

Jaspers Appraisal Guidance (Transport) (EU, 2007)

JASPERS² Appraisal Guidance (Transport) ist ein erster Schritt zu einer Modellierungsrichtlinie auf EU-Ebene und soll dort angewendet werden, wo keine nationalen Richtlinien existieren. Die Richtlinie richtet sich in zwei Teilen an Verwaltungsbehörden und Modellentwickler.

Die Beurteilung des gesamten Modells ist stark abhängig von der Beurteilung des Umlegungsergebnisses. Gründe für eine schlechte Bewertung können unter anderem sein:

- Fehler in der Wegematrix,
- Fehler im Verkehrsangebot,
- Ungenaue Routenwahlparameter.

Folgende beispielhafte Auflistung zeigt mögliche Validierungskenngrößen auf:

- Mittlere Reiseweite und Reiseweitenverteilungen (für die Validierung des Gravitationsmodells),
- Gesamtnachfrage pro Modus,
- Umgelegte Nachfrage auf Streckenebene für alle Modi,
- Belastung an Screenlines und Kordonpunkten (Passagiere, Fahrzeuge, Fracht),
- Passagierzustiege und –ausstiege an wichtigen Haltestellen,
- Reisezeiten auf wichtigen Routen,
- Routenwahlverhalten durch das Netz.

Abweichungen zwischen den beobachteten und modellierten Werten sollten in Form einer relativen Abweichung bzw. mit dem *GEH*-Wert ausgedrückt werden, sofern dies zulässig ist. Ergänzend können auch das Reiseverhalten, die Routenwahl, die Reaktion auf Änderungen im Netz und die Modellsensitivität geprüft werden [49].

Zusätzlich werden von JASPERS Appraisal Guidance (Transport) Realitätstests empfohlen. Realitätstests sind dabei Modellprüfungen anhand eines speziellen Szenarios. Hierbei wird die Nachfragereaktion mit historischen Daten, Literaturwerten und / oder anderen Studien verglichen. Realitätstests beinhalten z.B. Strassenneubau / -ausbau / -rückbau, Einführung / Ausweitung von Mautstrecken, Veränderungen in den ÖV-Ticketpreisen, Veränderungen in den Treibstoffpreisen und / oder Änderungen im ÖV-Angebot [49].

Alle vorgenommenen Auswertungen sowie deren Ergebnisse sind zu dokumentieren. Ebenso wird gefordert, dass die Genauigkeit von erhobenen Eingangsdaten (z.B. mittels Konfidenzintervallen) stets angegeben wird [49].

² JASPERS: Joint Assistance in Supporting Projects in European Regions

FSUTMS-Cube Framework Phase I und II (Florida (USA), 2006 und 2008)

Die Studien zu FSUTMS-Cube Framework³, beauftragt durch das Florida Department of Transportation Systems Planning Office, gliedern sich in zwei Teile:

- Phase I ist eine Untersuchung von Modellparametern makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle unterschiedlicher Regionen, woraus Standardmodellparameter abgeleitet werden [39; 73].
- Phase II ist eine Untersuchung zu Standardkalibrierungs- und -validierungsschritten, untergliedert für die Modelleingangsdaten sowie für die vier Modellstufen Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsaufteilung und Umlegung. Es werden bewährte Methoden der Kalibrierung und Validierung vorgestellt sowie Richtlinien für den Modelleinsatz gegeben. Der Kalibrierungs- und Validierungsprozess wird hierbei als iterativer Prozess beschrieben, der die Verfügbarkeit und Variabilität von Daten sowie regionale Eigenheiten und die Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen berücksichtigt. Der Prozess muss für jede Modellstufe durchlaufen werden. Dabei ist es nicht ausreichend, lediglich die Erhebungsergebnisse zu reproduzieren, sondern das Modell muss diese durch Ursache-Wirkungsbeziehungen nachvollziehbar erzeugen können [40; 73].

Zur Prüfung von Modelleingangsdaten sollten sozioökonomische Daten statistisch und visuell aufbereitet überprüft werden, z.B. Personen pro Haushalt, Beschäftigungsrate oder Motorisierungsgrad. Weiterhin sollten Netz- bzw. Streckendaten auf ihre Richtigkeit und Logik überprüft werden, z.B. Reisegeschwindigkeit von IV und ÖV [73].

Die Verkehrserzeugung betrachtet in der Validierung ausschliesslich aggregierte Grössen wie Personenwege pro Verkehrszelle, Personenwege pro Person, Personenwege pro Haushalt, heimatbasierte Arbeitswege pro Erwerbstätigem, zweckfeines Attraktionsaufkommen bzgl. Produktionsaufkommen, Anteil des externen Verkehrs pro Verkehrszelle oder zweckfeine Wegeanteile [73].

Auswertungsgrössen der Verkehrsverteilung sind mittlere Wegelänge pro Zweck sowie die zugehörigen zweckfeinen Reiseweitenverteilungen mit ihren Coincidence Ratios oder zweckfeine Wegeanteile des Zellbinnenverkehrs [73].

Die Verkehrsaufteilung sollte anhand folgender Kenngrössen validiert werden: Modal Split (allgemein, zweckfein, bezogen auf Fahrzeugbesitz und / oder für Teilräume), ÖV-Wege (allgemein und / oder bezogen auf ausgewählte Verbindungen / Linien) und mittlere ÖV-Wegelänge pro Zweck [73].

Die Umlegung betrachtet die Modellergebnisse anhand von Vergleichen zwischen modellierten und gezählten Streckenbelastungen und Screenlines (relative Abweichung und *RMSE*), wobei zusätzlich ein Realitätstest bezüglich der Fahrstreifenanzahl empfohlen wird. Weiterhin ist ein Vergleich zwischen modelliertem und gezähltem ÖV-Aufkommen durchzuführen. Ausserdem können noch aggregierte Kenngrössen wie Fahrzeugkilometer pro Haushalt, Fahrzeugkilometer pro Person und Fahrzeugkilometer pro gewerblichem Nutzfahrzeug herangezogen werden [73].

QUALIMOD (D, 2008)

Herkt et al. (2008) [45] differenzieren im Bericht des Projekts QUALIMOD⁴ in vier Kategorien von Qualitätsmerkmalen:

- Kategorie 1: quantitativ beschreibbare Qualitätsgrössen mit praktisch nutzbaren Orientierungswerten,

³ FSUTMS: Florida Standard Urban Transportation Model Structure

⁴ QUALIMOD: Qualitätsanforderungen und -standards für Verkehrsmodellrechnungen

- Kategorie 2: Qualitätsgrößen, die in Abhängigkeit der Modellanwendung quantitativ bestimmt werden können,
- Kategorie 3: Qualitätsmerkmale, die eine qualitative Beschreibung des Modells darstellen,
- Kategorie 4: Qualitätsgrößen der Eingangsdaten (für die i.d.R. der Auftraggeber verantwortlich ist).

Weiterhin leiten sie aus diversen Qualitätsdefinitionen folgende Einflussgrößen auf die Modellqualität ab:

- Vollständigkeit / Differenzierung,
- Genauigkeit (der Abbildung des Analysezustandes),
- Zuverlässigkeit (Abbildung von Massnahmen / Prognosen),
- Vergleichbarkeit,
- Verständlichkeit sowie
- Aktualität und Raumbezug.

In Kombination mit den klassischen vier Modellstufen schlagen die Autoren anschliessend modulartige Qualitätsspezifikationen vor (siehe Abb. 16).

Qualitätsmerkmal	Erzeugung	Verteilung	Aufteilung	Umlegung
Vollständigkeit / Differenzierung	Kat. 3			Kat. 3
Genauigkeit (der Abbildung des Analysezustandes)	Kat. 1 und Kat. 2	Kat. 2	Kat. 2	Kat. 1
Zuverlässigkeit (Abbildung von Massnahmen / Prognosen)	Kat. 3			Kat. 3
Vergleichbarkeit	Kat. 4			
Verständlichkeit	Kat. 3			
Aktualität und Raumbezug	Kat. 4			

Abb. 16 Qualitätsmodule nach QUALIMOD (eigene Darstellung nach [28]).

QUALIVERMO (A, 2010)

Der Forschungsbericht QUALIVERMO⁵ beschreibt einen Weg des Qualitätsmanagements und der Qualitätsprüfung von Verkehrsmodellen. Auf Basis dieses Forschungsprojekt wird derzeit (seit 2012) am Entwurf eines Merkblattes gearbeitet. Für den Qualitätssicherungsprozess werden folgende Schritte angeraten:

1. Dokumentation der am Entwicklungsprozess beteiligten Parteien, der Zielsetzungen der Modellanwendungen (z.B. abbildbare Massnahmen / Anwendungen und Aggregationsgrad der Ergebnisse) sowie der Rahmenbedingungen der Entwicklung (z.B. verwendete Software, Modellverfügbarkeit / -übergabe).
2. Festhalten der Systemabgrenzungen hinsichtlich der zeitlichen (modellierter Zeitraum, Bezugszeitraum, Analyse- und Prognosezeitpunkt), räumlichen (Planungs- und Untersuchungsraum, Zelleneinteilung) und inhaltlichen (Klärung der Abbildung von Nachfragesegmenten, Personen- und Güterverkehr, Modi, Verkehrsmitteln und induziertem Verkehr sowie der räumlichen Aggregation der Nachfrage) Grenzen. Weiterhin sollen die Zielwerte der Erhebungs- und Modellqualität definiert werden. Es sollten zudem alle betrachteten externen Entwicklungen, die Einfluss auf die Prognosen haben und alle untersuchten Massnahmen und deren Auswirkungen auf das Nachfragemodell dokumentiert werden. Abschliessend wird eine Auflistung aller Wirkungsmechanismen, Variablen und Parameter

⁵ QUALIVERMO: Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen

des Modells gefordert. Hierfür liefert das QUALIVERMO Dokumentationsvorlagen als Hilfestellung.

3. Überprüfen der Modelleingabedaten (Verhaltensdaten, Angebotsmodell, Sozio- und Raumstruktur, Erhebungs- bzw. Zählenden).
4. Analyse, Auswertung und Dokumentation der Qualität der einzelnen Modellstufen:
 - Verkehrserzeugung (und Verkehrsanziehung; Aktivitätenwahl),
 - Verkehrszielwahl (Verkehrsverflechtung, Verkehrsverteilung),
 - Verkehrsmittelwahl (Verkehrsmoduswahl, Verkehrsaufteilung),
 - Verkehrswegewahl (Umlegung) und
 - Tageszeitwahl.
5. Überprüfen der Modellmechanismen durch eine gezielte Variation bestimmter Modellvariablen und Parameter, d.h. Sensitivitäts- und Realitätstests. Eine Auswertung dieser Tests erfolgt u.a. mit Elastizitäten.
6. Prüfen der Modellplausibilität mithilfe von Testplanfällen, Backcasting, Verkehrsspinnen und visuellen Analysen der Umlegung.

Im Mittelpunkt der Qualitätssicherung stehen die Transparenz der verwendeten Modellmechanismen und die Offenlegung sämtlicher Eingangs- und Ergebnisdaten. Die Modellergebnisse sollten dabei die Unsicherheiten des Modells widerspiegeln; dies gilt insbesondere für die modellierten Verkehrsstärken.

Hierfür werden Konfidenzintervalle vorgeschlagen, die angeben, in welchem Wertebereich ein modellierter Erwartungswert in der Prognose streuen kann. Das Konfidenzintervall der Prognose errechnet sich aus einer multiplikativen Verknüpfung einer statistischen Sicherheit⁶ und der Standardabweichung des Analysefalls. Als Standardabweichung wird hierbei die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (vgl. Kapitel 3.2.2) über eine Gruppe von Zählstellen angenommen. Folgende Formel zeigt die Berechnung des absoluten Konfidenzintervalls *AKI* für den Bestandsfall:

$$AKI = 1.96 \cdot RMSE$$

mit

AKI absoluten Konfidenzintervalls einer Gruppe von Zählstellen
[Verkehrsstärkemengeneinheit/Zeiteinheit]

RMSE absolute Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers einer Gruppe von Zählstellen [Verkehrsstärkemengeneinheit/Zeiteinheit]

Die vorgestellte Berechnung der Konfidenzintervalle kann um Unsicherheitsfaktoren für verschiedene Zählstellenqualitäten oder Schwankungsbreiten aus verschiedenen Szenarien erweitert werden.

Es wird darüber hinaus ein Gütemass *EQI* («pseudo- R^2 ») als Erklärungsqualitätsindikator vorgestellt. Dieses Gütemass beschreibt einen Zusammenhang zwischen den modellierten und den erhobenen Verkehrsstärken des Bestandsplanfalles.

Transport for South Hampshire Evidence Base (UK, 2011)

Benbow et al. (2011) beschreiben in ihrem Bericht die Bedeutung der einzelnen Validierungsarten:

- Die Matrixvalidierung hat eine hohe Bedeutung, da durch die Matrizen die Nachfrage abgebildet wird und dies a priori korrekt sein muss.

⁶ Eine angenommene Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% führt zu einem Faktor von 1.96.

- Die Streckenbelastungvalidierung für einzelne Strecken hat eine geringe Aussagekraft, da es zum Teil mehrere Alternativrouten gibt und die Routenwahl täglich variieren kann, was durch Erhebungen aber nicht komplett abzudecken ist.
- Die Aussagekraft der Reisezeitvalidierung ist ebenso gering einzuschätzen, weil Reisezeiten keine fixierten Werte annehmen und das Modell vor allem die Änderungen innerhalb und zwischen den Modi abbilden können muss.

Weiterhin beschreiben sie Methoden zur Validierung des Netzmodells mithilfe von Routenchecks. Diese Vergleiche basieren jedoch häufig, aufgrund fehlender Vergleichsdaten, auf planerischer Erfahrung. Aus der Menge der möglichen Routen werden dabei nur solche betrachtet, die folgende Kriterien aufweisen:

- Es gibt eine relevante Anzahl an Verbindungen auf der Route,
- der Widerstand der Route ist hoch genug,
- die Route führt durch den Untersuchungsraum,
- die Route weist eine Hin- und Rückrichtung auf,
- die Route verbindet unterschiedliche Himmelsrichtungen.

Der Routencheck beinhaltet dann Aussagen zur Routenplausibilität, Vergleiche zwischen belastetem und unbelastetem Netz, Vergleiche für unterschiedliche Tageszeiten und Vergleiche für Hin- und Rückrichtung [8].

WebTAG (UK, 2013)

WebTAG⁷ ist eine onlinebasierte Modellierungsrichtlinie, die seit 2013 vom britischen Department for Transport zur Verfügung gestellt wird. Sie gliedert sich in verschiedene Teile, die jeweils andere Zielgruppen (Manager, Modellanwender, Modellersteller) ansprechen. Die Modellvalidierung wird im Teil für Modellentwickler vertieft.

Die Kalibrierung und Validierung des Angebotsmodells ist nicht unabhängig vom Nachfragemodell, da sämtliche Vergleiche bedeutungslos sind und wiederholt werden müssen, wenn das Angebot falsch abgebildet ist. Bezüglich des Netzmodells ist beispielsweise auf die korrekte Modellierung der Streckenlänge (sollte zwischen dem 1.1- und 1.3-fachen der Luftlinienlänge liegen), der Streckentypen, der Geschwindigkeiten eines Streckenzuges, der Knotenpunkte, der Abbieger, der Einbahnstrassen und Einfahrverbote sowie der Sättigungsverkehrsstärke zu achten. Hinweise auf eventuelle Fehler geben zeitliche und räumliche Abweichungen auf Routenebene. Wenn diese mehr als 25% von Erhebungen abweichen, sollten hier genauere Untersuchungen durchgeführt werden [20].

Die Routenwahlvalidierung sollte für eine begrenzte Auswahl von Verbindungen zwischen ausgewählten Quellen und Zielen stattfinden. Die Anzahl der auszuwählenden Verbindungen ist dabei von der Modellgröße abhängig und sollte sich an folgender Berechnungsformel orientieren:

$$\text{Verbindungsanzahl} = \sqrt[4]{\text{Zonenanzahl}} \times \text{Personengruppenanzahl}$$

Folgende Kriterien sind bei der Verbindungsauswahl zu berücksichtigen:

- Die Quellen und Ziele sollen wichtige Bevölkerungszentren, Arbeitsorte oder sonstige wichtige Orte sein.
- Die Verbindungen sollen eine signifikante Wegeanzahl sowie einen signifikanten Widerstand (Länge, Kosten, Zeit etc.) aufweisen.
- Der Untersuchungsraum soll durchquert werden.
- Die Verbindung solle in beide Richtungen bestehen und unterschiedliche Himmelsrichtungen miteinander verbinden.

⁷ WebTAG: Webbased Transport Analysis Guidance

Diese Untersuchung ist separat für jede Personengruppe durchzuführen. Da die Beurteilung der Routenwahlergebnisse selten durch Erhebungswerte möglich ist, sondern sich häufig an planerischer Erfahrung und regionaler Kenntnis orientiert, handelt es sich hierbei aber nicht im eigentlichen Sinne um eine Validierung [20].

Die Umlegungsvalidierung betrachtet die umgelegten Verkehrsstärken auf den Strecken, die Reisezeiten und das Abbiegeverhalten. Für die Einschätzung der Streckenbelastung wird eine Kombination aus zulässiger Abweichung (absolut bzw. relativ) und *GEH*-Wert gefordert, die von einem gewissen Anteil der Strecken erfüllt werden muss. Die Reisezeiten einer konkreten Route dürfen nur eine bestimmte zulässige Abweichung (absolut bzw. relativ) aufweisen. Die modellierte Streckenbelastung sowie die Routenreisezeiten sollten dabei für jeden Fahrzeugtyp und jedes Zeitintervall analysiert werden. Zusätzlich werden Screenlineauswertungen gefordert. Wenn möglich, sollte auch das Abbiegeverhalten analysiert werden. Für die ÖV-Umlegung werden Untersuchungen des Passagieraufkommens an Screenlines und Kordonpunkten sowie der Zu- und Ausstiegsszahlen in städtischen Zentren gefordert [20; 21].

Neben den genannten Prüfungen sollte die Konvergenz der Umlegung getestet werden. Mögliche Prüfgrößen sind der GAP, der Anteil der Strecken mit einer Nachfrageänderung > 1%, der Anteil der Strecken mit einer Aufwandsänderung > 1% und die prozentuale Änderung des Gesamtaufwands. Akzeptable Werte dieser Prüfungen werden genannt [20].

Bei sehr unsicheren Modellparametern werden Sensitivitätstests empfohlen. Hierbei werden die betreffenden Parameter systematisch verändert und es wird das Modellergebnis analysiert. Ziel dieser Tests ist eine bessere Abschätzung der Modellparameter. Für Realitätstests werden die Variablen des Verkehrsangebots oder der Strukturdaten in kontrollierter Weise verändert und es wird geprüft, ob die Wirkungen des Modells in der erwarteten Größenordnung liegen. 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 empfohlen [19]:

- Erhöhung der Treibstoffpreise um 10% oder 20%,
- Erhöhung der Ticketpreise um 10% oder 20%,
- Erhöhung der Fahrzeit im Kfz-Verkehr um 10%,
- Erhöhung der Bedienungshäufigkeit im ÖV um 50%,
- Erhöhung der Einwohner um 10%.

Für Matrixanpassungsverfahren ist es notwendig, zunächst die Matrix der Ausgangsnachfrage zu validieren. Als Bezugspunkte werden hierfür Screenlines und Kordonpunkte empfohlen, da diese die Abweichungen an Einzelzählstellen kompensieren und somit nicht zu sensibel auf kleinere Abweichungen reagieren. Die Übereinstimmung von einigen ausgewählten Screenlines und Kordonpunkten dient im Fortgang als Prüfkriterium der Matrixanpassung. Die angepassten Matrizen sollten dann wieder an allen Screenlines und Kordonpunkten überprüft werden. Zusätzlich müssen die Änderungen, die sich durch die Matrixanpassung ergeben, ausführlich dokumentiert werden. Hierfür bieten sich Punktwolken der Matrixwertepaare oder des Zielverkehrs an, inkl. einer Regressionsgerade und Bestimmtheitsmass. Weitere Möglichkeiten, die Abweichungen zu dokumentieren, sind die Auswertung von Reiseweitenverteilungen vor und nach der Anpassung (jeweils mit Mittelwert und Standardabweichung) und die sektorale Bestimmung von Matrixabweichungen. Güteschranken der zu bestimmenden Auswertungsgrößen werden in WebTAG (Unit 3.1) genannt. Diese Güteschranken sollen sicherstellen, dass die Änderungen durch eine Matrixschätzung nicht signifikant sind⁸ [20].

Generell sind sämtliche Kalibrierungs- und Validierungsschritte zu dokumentieren. Abweichungen, die in der Validierung festgestellt wurden, und deren Einfluss auf das

⁸ Bei inkrementellen Modellen basieren die Ausgangsmatrizen oft auf Zählwerten, daher bringt Vergleich hier wenig. Dies gilt ebenso für die angepassten Matrizen. Basieren die Ausgangsmatrizen jedoch auf einer anderen Datenquelle, lohnt sich eine Auswertung Ausgangsmatrizen sowie der angepassten Matrizen.

Modellerggebnis müssen immer dokumentiert und erläutert werden. In der Dokumentation sollte zudem immer betont werden, dass alle durchgeführten Tests dazu führen sollen, die Modellqualität zu erhöhen und nicht Misstrauen gegenüber dem Modell aufzubauen [20].

Travel Demand Modeling Policies and Procedures (Virginia (USA), 2014)

Das Travel Demand Modeling Policies and Procedures des Virginia Department of Transportation gibt modellstufenfeine Validierungsmassgaben und Problembehandlungsanleitung für häufig auftretende Fehler vor.

Zur Validierung der Verkehrserzeugung sollte unter anderem ein Abgleich der Erzeugungs- und Produktionsraten mit den Ergebnissen von Haushalterhebungen (allgemeine Auswertung, zweckfeine Auswertung und Auswertung für Hin- und Rückrichtung; immer unter Beachtung des externen Verkehrs) und eine Prüfung der Wegezanzahl pro Zweck, pro Haushalt, pro Nachfrageschicht und / oder pro geografischer Lage erfolgen [78].

Für die Verkehrsverteilungsvalidierung sollten folgende Untersuchungen durchgeführt werden, wobei die zulässige Abweichung des Vergleichskriteriums von der Modellraumgrösse abhängig ist [78]:

- Ein Vergleich von modellierten und erhobenen Verhaltensmustern bzgl. des Zellinnenverkehrs,
- ein Vergleich der Nachfrage für bestimmte Relationen,
- ein Vergleich der mittleren Reiseweite pro Zweck und
- ein Vergleich der Coincidence Ratios der zweckfeinen Reiseweitenverteilung.

Der modellierte externe Verkehr sollte durch Erhebungen abgesichert sein. Die modellierten mittleren Wegelängen sowie die Coincidence Ratios seiner Reiseweitenverteilungen sollten für jeden Zweck und alle Fahrzeugtypen geprüft werden. Ausserdem ist auf die Plausibilität der Grössenordnung von Quell- und Zielverkehr zu achten [78].

Die Validierung der Verkehrsaufteilung erfolgt über Vergleiche des Modal Splits, des Fahrzeugbesetzungsgrads, von ÖV-Wegelängen (allgemeine Auswertung sowie differenzierte Auswertung pro Zweck, pro Personengruppe und / oder pro Teilraum). Zusätzlich werden Realitätstests für die Variation der Modelleingangsvariablen Fahrzeit, Parkkosten, Treibstoff- und Unterhaltskosten für Privatfahrzeuge, ÖV-Auslastung auf bestimmten Routen und ÖV-Fahrpreise empfohlen. Weiterhin können bestimmte gebietsabhängige und haushaltsabhängige Verhaltensänderungen unterstellt werden [78].

Die Umlegungsvalidierung für den IV greift auf Verkehrszählungen und Geschwindigkeitsdaten zurück. Durch diese Datengrundlage werden gruppierte Auswertungen der Fahrzeugkm (z.B. nach Region oder Strassenklasse), Berechnungen des Bestimmtheitsmasses (R^2) und des %RMSE für Strecken, Kordonpunkte, Screenlines und Cutlines sowie Geschwindigkeitsauswertungen pro Strassenklasse möglich. Diese Auswertungen ist für alle modellierten Zeitintervalle durchzuführen. Ergänzend werden weitere Realitätstests (z.B. Änderungen im Netzmodell oder bei den Soziodaten) verlangt [78].

Für die ÖV-Umlegungsvalidierung sollten auf Grundlage von z.B. ÖV-Zählungen oder Fahrgastbefragungen die Ein- und Aussteigerzahlen pro Linie bzw. pro Verkehrsmittel verglichen werden. Diese Auswertung ist für alle modellierten Zeitintervalle durchzuführen. Analog zur Validierung der Verkehrsaufteilung sollten zusätzlich Realitätstests durchgeführt werden [78].

Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual – Second Edition (USA, 2014)

Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual der Federal Highway Administration stellt eine Art nationale Zusammenstellung von diversen regionalen Handbüchern dar. Das in diesem Handbuch beschriebene Vorgehen ähnelt daher z.B. dem Vorgehen des Travel Demand Modeling Policies and Procedures (Virginia (USA), 2014). Nach

einigen einleitenden Hinweisen zur Spezifizierung der Validierung (Zeitpunkt, Budget, Datenlage, Bestandteile, Erwartungen / Ziele und Validierungsarten / -tests) werden, bezogen auf die verschiedenen Modellstufen, Tests empfohlen. Dabei wird häufig in aggregierte und disaggregierte Tests unterschieden. Meist werden darüber hinaus noch Hinweise zu Realitätstests und Prognosewerten gegeben [18].

Zunächst werden die Input-Daten betrachtet. Es wird z.B. ein Abgleich von Bevölkerungsdaten, Netzdaten und (berechneten) Kenngrößen gefordert. Darüber hinaus wird die Erhebungsmethodik hinterfragt und die Daten aus verschiedenen Quellen werden auf ihre Plausibilität hin untersucht [18].

Im Folgenden beschreibt das Handbuch die Validierung der einzelnen Modellstufen, begonnen bei den sozioökonomischen Modellen über die Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsaufteilung, Abfahrtszeitwahl bis zur Verkehrsumlegung. Zusätzlich werden Problembehandlungsstrategien in jedem Kapitel aufgezeigt.

Bei sozioökonomischen Modellen werden Vergleiche haushaltsbezogener Daten mit statistischen Daten empfohlen, z.B. der Fahrzeugbesitz und –verfügbarkeit pro Haushalt [18].

Für Verkehrserzeugungsvalidierungen existieren Hinweise für den Binnenverkehr des Untersuchungsraums, jeweils für 4-Stufen-Modelle und aktivitätsbasierte Modelle, für den externen Verkehr, für Dienstleistungs- und Güterverkehr sowie für singuläre Verkehrserzeuger [18].

Die Validierung der Verkehrsverteilung prüft zunächst die Auswirkungen der gewählten Modellparameter. Bezüglich der Reiseweiten sollen für jeden Wegezweck mittlere Reiseweite (maximal 5% Abweichung; Ausnahmen können niedrigfrequentierte Wegezwecke sein), Reiseweitenverteilung und Reisezeitenverteilung analysiert werden. Bei den Verteilungen kann dies durch eine graphische Gegenüberstellung oder die Verwendung des Coincidence Ratios geschehen. Dieser sollte in der Regel grösser als 0.7 sein, Ausnahmen können auch hier für niedrigfrequentierte Wegezwecke gelten. Darüber hinaus sollten Quelle-Ziel-Relationen geprüft werden, wobei einzelne Verkehrszellen auch zu größeren Einheiten aggregiert werden können. Eine Hilfe ist dabei der Orientation Ratio, dessen Ergebnis sowohl in Matrixform als auch graphisch dargestellt werden kann. Werte nahe 1.0 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Erhebung und Modell. Ebenso wichtig ist die Analyse des Zellbinnenverkehrs, welcher modellseitig nicht mehr als 3% von der Erhebung abweichen sollte [18].

Bei der Modellstufe Verkehrsaufteilung sollten die Wege pro Modus und Zweck untersucht werden. Weiterhin sollen untersucht werden:

- für den Modus ÖV die Reiseweite bezüglich einer Relation und von Haltestelle zu Haltestelle,
- für den Modus MIV unter anderem die Besetzungsgrade.

Wird eine Abfahrtszeitwahl modelliert werden folgende Auswertungen / Vergleiche gefordert:

- Anteil Wege pro Zweck pro Zeiteinheit,
- Verkehrsstärke und Verkehrsleistung pro Zeiteinheit (siehe Analysen der Verkehrsumlegung),
- ÖV-Wege pro Zeiteinheit,
- Aktivitätendauern [18].

Die Validierung der Verkehrsumlegung betrachtet die Verkehrsleistung (in Fahrzeugkm), die Verkehrsstärke und Geschwindigkeitsdaten. Bezüglich der Verkehrsleistung ist auch eine regionale Aggregation möglich. Die Verkehrsstärkenanalyse bezieht sich auf Strecken, Screenlines, Cutlines, Kordonpunkte und aggregierte Streckengruppen mittels %RMSE und R^2 . Eine Darstellung der Modell- und Erhebungswerte in Punktwolken oder Differenzplots kann unterstützend wirken. Geschwindigkeitsvergleiche beziehen sich auf

die modellierten Zeitintervalle oder Spitzenstunden. Sie vergleichen die aus dem Modell abgeleiteten Streckengeschwindigkeiten mit gemessenen Geschwindigkeiten. Zunächst sollten die modellierten und gemessenen Geschwindigkeiten als Punktwolken dargestellt werden, eventuell gruppiert nach Streckentyp oder Belastungsklasse. Diese Gruppierung folgt aus den Forderungen, dass stark belastete Strecken besser übereinstimmen sollten, als Strecken mit niedriger Auslastung, und dass sich die Geschwindigkeiten von schwach belasteten Strecken an den Geschwindigkeiten bei freiem Verkehrsfluss orientieren sollten. Darauf aufbauend können die Geschwindigkeiten für Modell und Erhebung über der Streckenauslastung abgetragen werden. Disaggregiert kann die Reisezeit für ausgewählte Routen oder Routenteile untersucht werden [18].

Bezüglich der ÖV-Umlegung sollten die gesamten Zustiege sowie die Zustiege pro Linie und die Zustiege pro Verkehrsmittel evaluiert werden. Ausserdem sollen die ÖV-Wege und die Zustiege in Beziehung gesetzt werden. Die Einsteiger- und Aussteigerzahlen einer Linie ergeben die Passierzahlen, welche für Screenlines, Cutlines, Kordonpunkte und / oder Strecken verglichen werden können. Die modellierten Passagier-Km sollten pro Region, Linie, Verkehrsmittel, Zugangsmodus und / oder Abfahrtszeit verglichen werden. Wenn verfügbare Daten vorliegen, kann für ausgewählte Routen auch eine detaillierte Auswertung erfolgen [18].

Forschungsergebnisse zur Konvergenz von Verkehrsnachfragemodellen

Verkehrsnachfragemodelle müssen ein Gleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage aufweisen, um verlässliche Aussagen z.B. bei einem Vergleich von zwei Szenarien treffen zu können. Die Konvergenz ist hierbei ein Mass, anhand dessen der Gleichgewichtszustand quantifizierbar wird. In der Literatur werden zwei Arten von Konvergenz unterschieden:

- Konvergenz zwischen den Entscheidungsstufen (siehe Kapitel 2.2.3) und
- Konvergenz innerhalb von Umlegungsmodellen.

Boyce et al. (2018) beschreiben in ihrer Veröffentlichung «Solving the Sequential Travel Forecasting Procedure with Feedback» [12] drei iterative Methoden, um Konvergenz zwischen den Entscheidungsstufen herzustellen und somit die auslastungsabhängigen Widerstände zwischen den Verkehrszellen den Widerständen des Nutzergleichgewichts aus der Umlegung anzunähern. Bei den drei Methoden handelt es sich um:

- das Glätten, d.h. das Mittelwertbilden, der Nachfragematrizen mit festen Gewichten für den aktuellen und den vorherigen Iterationsschritt,
- das Glätten der Nachfragematrizen mit der «method of successive averages (MSA)», also mit variablen Gewichten für den aktuellen und den vorherigen Iterationsschritt und
- die Verwendung von ungeglätteten Nachfragematrizen (was einen Sonderfall der gemittelten Nachfragematrizen mit konstanten Gewichten darstellt: Gewicht des vorherigen Iterationsschrittes = 0, Gewicht des aktuellen Iterationsschrittes = 1).

Die Untersuchung zeigte, dass sich durch konstante Gewichte eine stabile und hohe Konvergenz einstellt. Die besten Gewichte sind dabei 0.25 für den vorherigen Iterationsschritt und 0.75 als Gewicht für den aktuellen Iterationsschritt. Diese Gewichte ergaben auch in diversen Planfällen stabile, konvergente Ergebnisse, was auf eine breite Übertragbarkeit schliessen lässt. Die Glättung der Matrizen mit MSA erwies sich als ineffektiv und sollte daher nur genutzt werden, wenn sich eine Glättung mit konstanten Gewichten als nicht effektiv herausstellt. Die Autoren raten von der Verwendung von ungeglätteten Nachfragematrizen ab, da dies ebenfalls ineffektiv ist. Es wird eine Mindestanzahl von 5 Iterationsschritten empfohlen, die maximale Anzahl muss für jedes Modell individuell bestimmt werden. Als Hilfestellung bei der Bestimmung der notwendigen Iterationsanzahl wird angegeben, dass das Verhältnis aus Gesamtnachfrage und fehlplatzierter Nachfrage (angegeben mit dem Konvergenzmass *TMF*) kleiner als 1% sein sollte. Abschliessend weisen die Autoren darauf hin, dass ein streckenbasierter Umlegungsalgorithmus mehr Iterationen benötigen könnte als sein routenbasierter Umlegungsalgorithmus. [12]

$$TMF = \sum_{od} \left| \bar{d}_{od,n-1} - d_{od,n} \right|$$

mit

TMF Anzahl der fehlplatzierten Nachfrage (total misplaced OD flow)

$\bar{d}_{od,n-1}$ mittlere Nachfragematrix aus aktuellem Iterationsschritt n und vorherigem Iterationsschritt $n-1$

$d_{od,n}$ Nachfragematrix aus aktuellem Iterationsschritt n

In einer weiteren Veröffentlichung «Convergence of Traffic Assignments» befassen sich Boyce et al. (2004) [13] mit der zweiten Art der Konvergenz: der Konvergenz innerhalb von Umlegungsmodellen. Es wird der Begriff des «Relative Gap» eingeführt, der das Verhältnis des Abstandes (= Gap) zwischen aktueller Lösung und der (idealen) Lösung des Nutzergleichgewichts zu eben dieser (idealen) Lösung des Nutzergleichgewichts ausdrückt. Laut den Autoren ist ein Relative Gap von 0.01 % bzw. 10^{-4} notwendig, um eine stabile Konvergenz (bezogen auf die streckenbasierten Verkehrsstärkenunterschiede) zu erhalten. [13]

4 Stand der Anwendung

Der Stand der Anwendung wurde auf drei Arten erfasst. Das Kernelement war die Durchführung und Auswertung einer Expertenbefragung. Diese wurde ergänzt durch eine Analyse zugänglicher Ausschreibungsunterlagen und Modellberichte.

4.1 Expertenbefragung

4.1.1 Ziel der Befragung

Mithilfe einer Online-Befragung ist im Sommer 2016 der aktuelle Stand der praktischen Anwendung von Verkehrsmodellen erfasst worden. 73 internationale Experten aus Wissenschaft, Verwaltung und Ingenieurbüros haben die Umfrage vollständig ausgefüllt und so in mehr als 50 Fragen und Antworten wertvolle Information bezüglich der Anwendung, der Erstellung und der Anforderungen von Verkehrsmodellen zur Verfügung gestellt.

Die Umfrage wurde von vier Nutzergruppen ausgefüllt: Modellersteller (30 Personen), Modellanwender in einem Ingenieurbüro (11 Personen), Modellanwender in einer öffentlichen Einrichtung oder in einem Verkehrsbetrieb (18 Personen) und Nutzer von Modellergebnissen (14 Personen). Im Folgenden wird ein Auszug der Ergebnisse dargestellt und erläutert. Wenn nicht anders vermerkt, dann zeigen die Auswertungen die Ergebnisse für die Grundgesamtheit (73 Personen). Falls sich für einzelne Gruppen (z.B. nur Befragte aus der Schweiz mit 28 Personen oder nur die Modellersteller) auffällige Unterschiede gegenüber der Grundgesamtheit zeigen, werden diese den Ergebnissen für die Grundgesamtheit gegenübergestellt. Damit soll der Fokus auf die Anwendung von Verkehrsmodellen in der Schweiz gelegt werden. Die Teilnehmenden wurden jeweils gebeten, Ihre Antworten auf Basis des zuletzt von Ihnen erstellten oder angewandten Modells zu geben.

4.1.2 Ergebnisse

Modellzweck

Das Ergebnis der Umfrage zeigt (Abb. 17), dass Verkehrsmodelle vor allem für die strategische Planung und für Vorplanungen angewendet werden. Auffällige Unterschiede zwischen Modellerstellern und allen Befragten zeigen sich bei der Nutzung von Modellen für die Angebotskonzeption im ÖV. Etwa 85% der Modellersteller setzen Modelle hierfür ein, während es bei Berücksichtigung aller Befragten weniger als 60% sind (Abb. 18).

Auffallend wenig genutzt werden Modelle für formale Planungsverfahren (ca. 35% der Befragten). Weitere genannte Einsatzgebiete sind Gebietsentwicklungen, Auswirkungen von demografischen Veränderungen, Verkehrsstabilitätsuntersuchungen, Verkehrssicherheitsuntersuchungen und Untersuchungen zum Energieverbrauch.

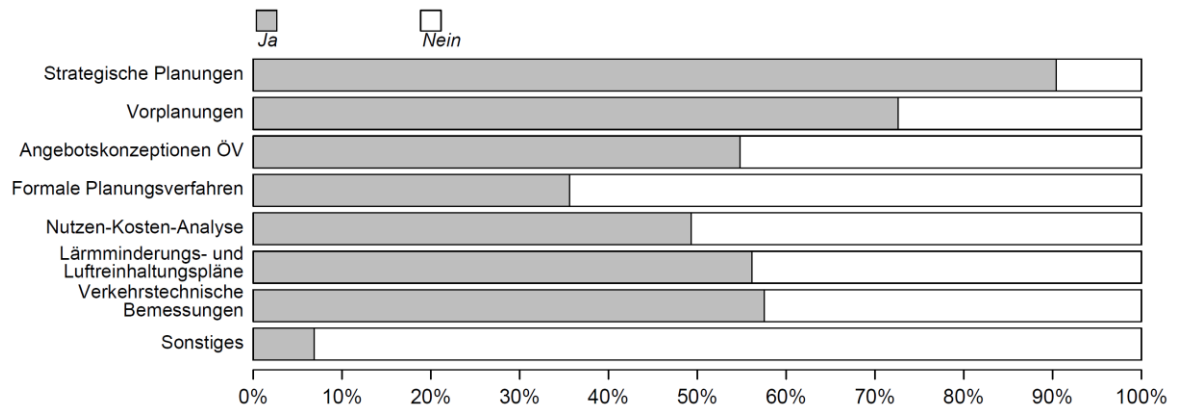


Abb. 17 Wofür wird das Modell eingesetzt? (alle Befragte, $n = 73$).

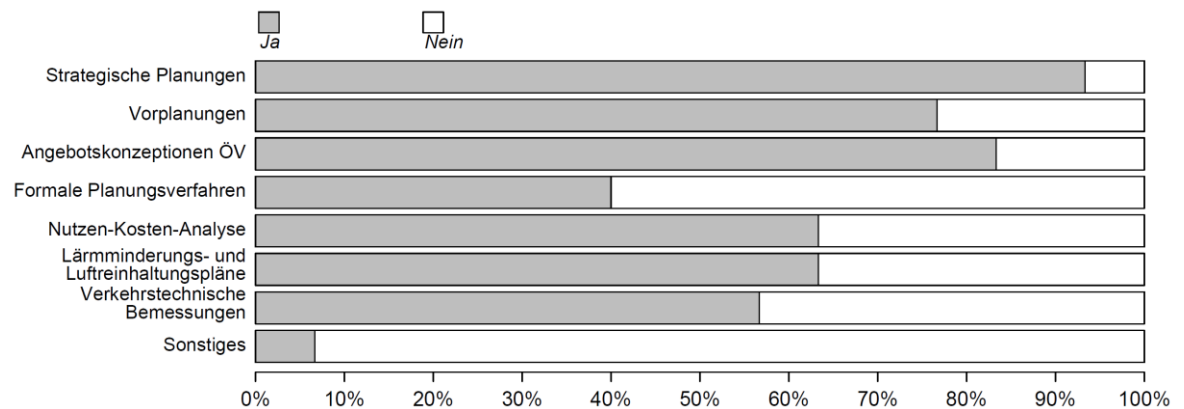


Abb. 18 Wofür wird das Modell eingesetzt? (nur Modellersteller, $n = 30$).

Ausdehnung

Laut den Umfrageergebnissen werden in der Schweiz keine städtischen Verkehrsmodelle eingesetzt. Dominierend sind in der Schweiz eindeutig überregionale Modelle (z.B. kantonale Modelle, siehe Abb. 19). Regionale Modelle werden je nachdem für Anwendungen in den Städten verfeinert. Im Ausland sind die städtischen Modelle verbreiteter. Nationale Verkehrsmodelle werden seltener genannt, da es diese in Vergleich zu den regionalen und überregionalen Modellen weniger gibt.

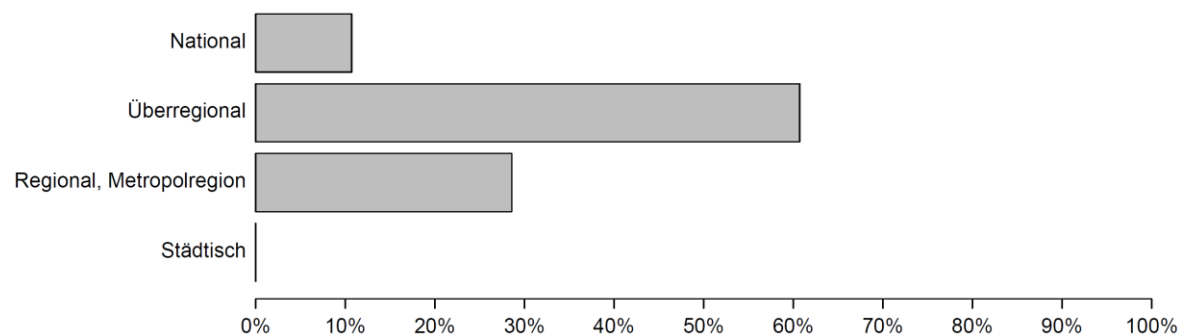


Abb. 19 Welche Ausdehnung hat das Modell? (nur Befragte in der Schweiz, $n = 28$).

Siedlungsstrukturelle Effekte

Demografische Effekte, Effekte singulärer Verkehrserzeuger sowie Änderungen der Siedlungsstruktur werden durch die Mehrheit aller Modelle abgebildet. In diesen drei Kategorien fällt auf, dass jeweils 10% der Modelle diese Effekte nicht berücksichtigen können (Abb. 20).

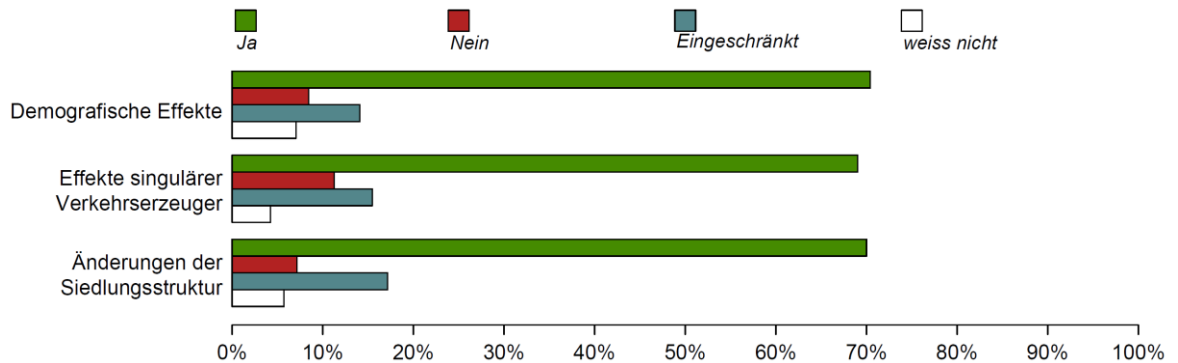


Abb. 20 Welche siedlungsstrukturellen Effekte können mit dem Modell evaluiert werden? (alle Befragte, n = 73).

Kostenbeeinflussende Massnahmen

Fahrpreisänderungen sowie die Strassenbenutzungsgebühren können bei etwa der Hälfte der Befragten mit dem Modell evaluiert werden (Abb. 21). Dies gilt nicht für die Effekte von Parkraumbewirtschaftung, welche meistens nur eingeschränkt im Modell berücksichtigt werden können, insbesondere bei den in der Schweiz verwendeten Modellen (Abb. 22).

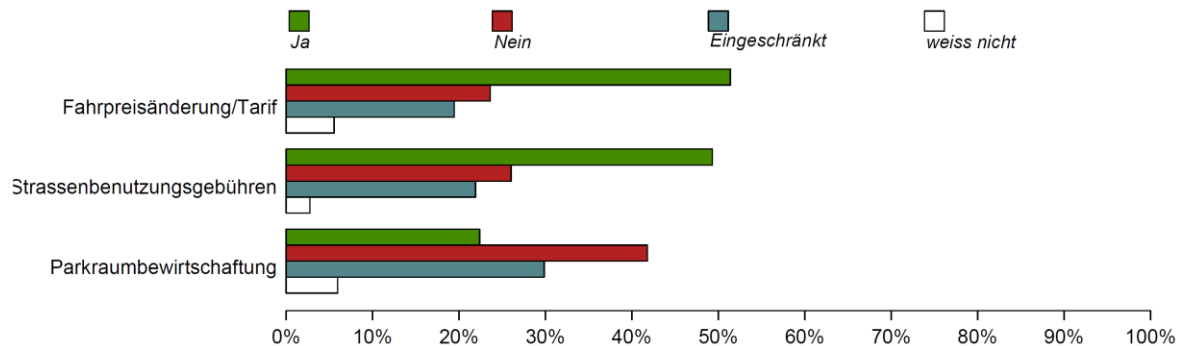


Abb. 21 Welche kostenbeeinflussenden Massnahmen können mit dem Modell evaluiert werden? (alle Befragte, n = 72).

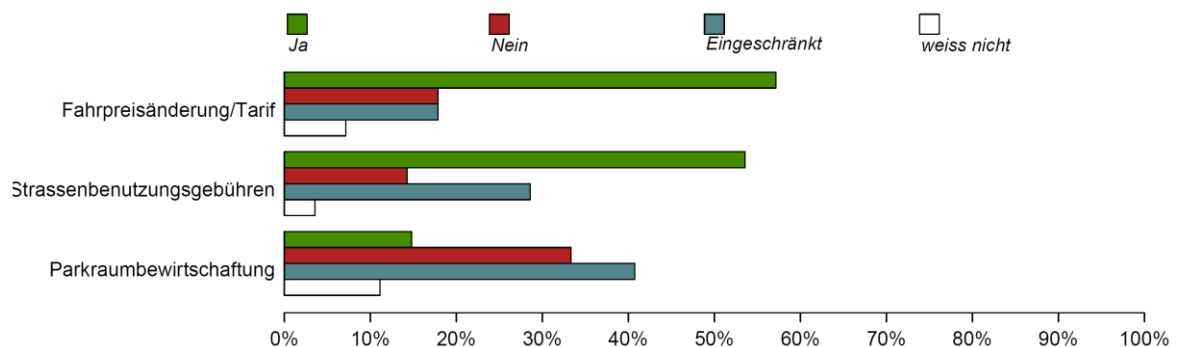


Abb. 22 Welche kostenbeeinflussenden Massnahmen können mit dem Modell evaluiert werden? (nur Befragte in der Schweiz, n = 28).

Verkehrs-/Fahrzeugtechnische Massnahmen

Fast die Hälfte der Befragten gibt an, dass mit ihren Modellen die Dimensionierung von Knotenpunkten und Verflechtungsbereichen möglich ist (Abb. 23). Für Verkehrsleitsysteme bzw. Verkehrsmanagementsysteme gilt dies nur in rund einem Drittel der Fälle. Die Evaluation der Flottenzusammensetzung wird eher durch Modellersteller als Modelleigenschaft genannt. Insgesamt ist dies jedoch die Massnahme, die mit den wenigsten Modellen evaluiert werden kann.

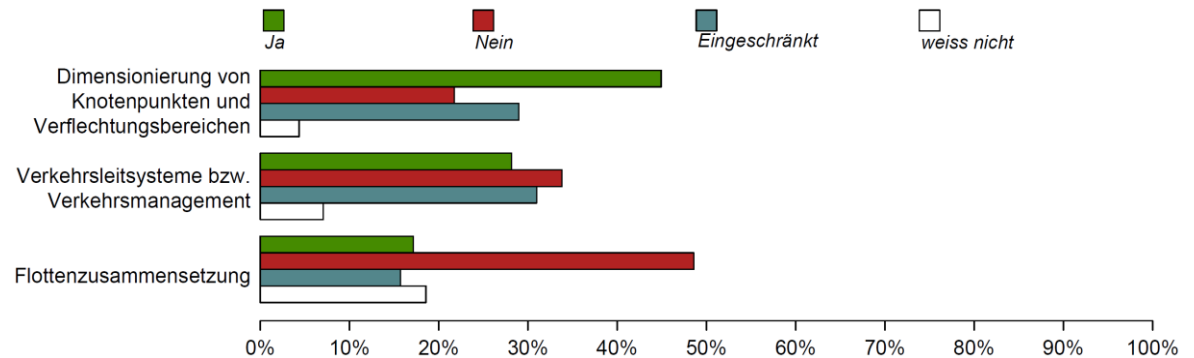


Abb. 23 Auswertung der Frage: Welche verkehrstechnischen / fahrzeugtechnischen Massnahmen des MIV können evaluiert werden? (alle Befragten, n = 69).

MIV-Mitfahrer

Die MIV-Mitfahrer werden gemäss rund 75% der Befragten in ihrem Modell abgebildet, mehrheitlich über Besetzungsgrade. Als eigener Modus werden MIV-Mitfahrer nur in etwa 25% der Fälle modelliert.

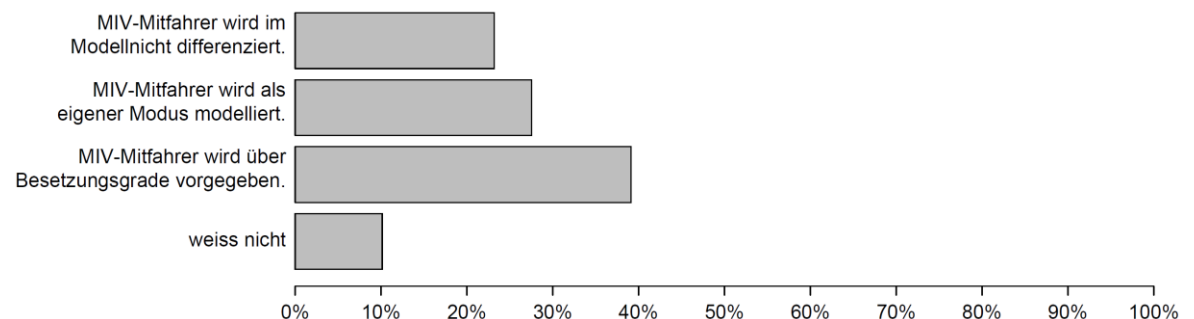


Abb. 24 Wird bei der Modellierung des MIV ein eigener Modus MIV-Mitfahrer modelliert? (alle Befragte, n = 69).

Personengruppen

Die eingesetzten Verkehrsmodelle differenzieren in der Regel zwischen mehreren Personengruppen. Die Anzahl von Personengruppen variiert stark. Während 34% der von den Befragten beschriebenen Modelle mehr als 15 Personengruppen unterscheiden, differenziert ein ähnlich grosser Anteil nach 10 Personengruppen oder weniger. Ein Faktor dabei ist wahrscheinlich der Ansatz zum Einbezug der Mobilitätswerkzeuge. Werden diese über Personengruppen modelliert, führt dies zu mehr Personengruppen als wenn Mobilitätswerkzeuge in der Nutzenfunktion der Verkehrsmittelwahl berücksichtigt werden.

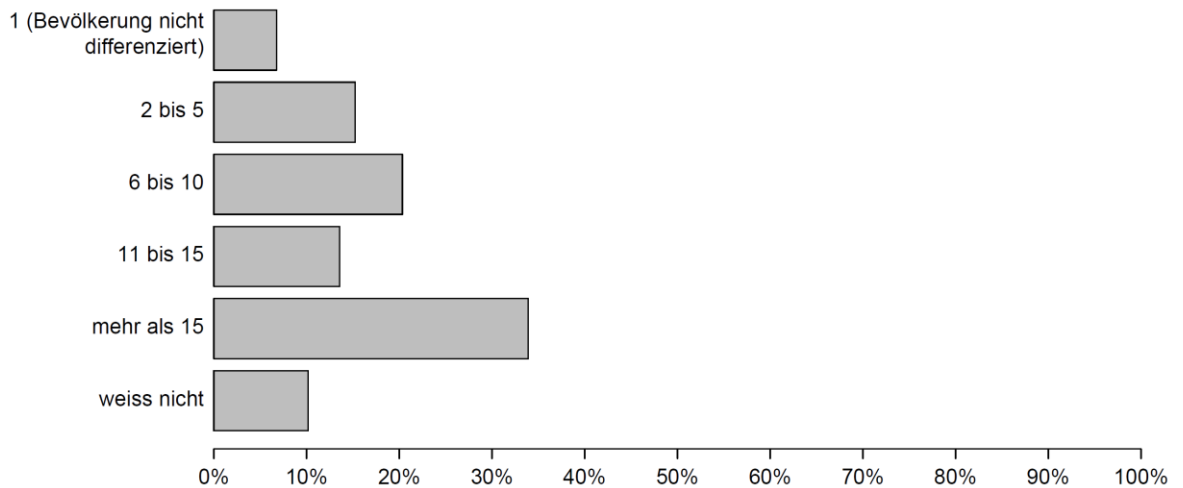


Abb. 25 Wie viele Personengruppen werden im Modell differenziert? (alle Modellersteller und Modellanwender, $n = 59$).

Modellstufen

Die klassischen vier Berechnungsschritte eines Verkehrsmodells (Modellstufen) werden fast immer berücksichtigt. Die Abfahrtszeitwahl hingegen ist oft nicht integriert. Die Verkehrserzeugung und die Verkehrsumlegung werden in der Regel separat gerechnet. 50% der Befragten gaben an, dass in ihrem Modell die Verkehrsverteilung und die Verkehrsaufteilung simultan gerechnet wurde.

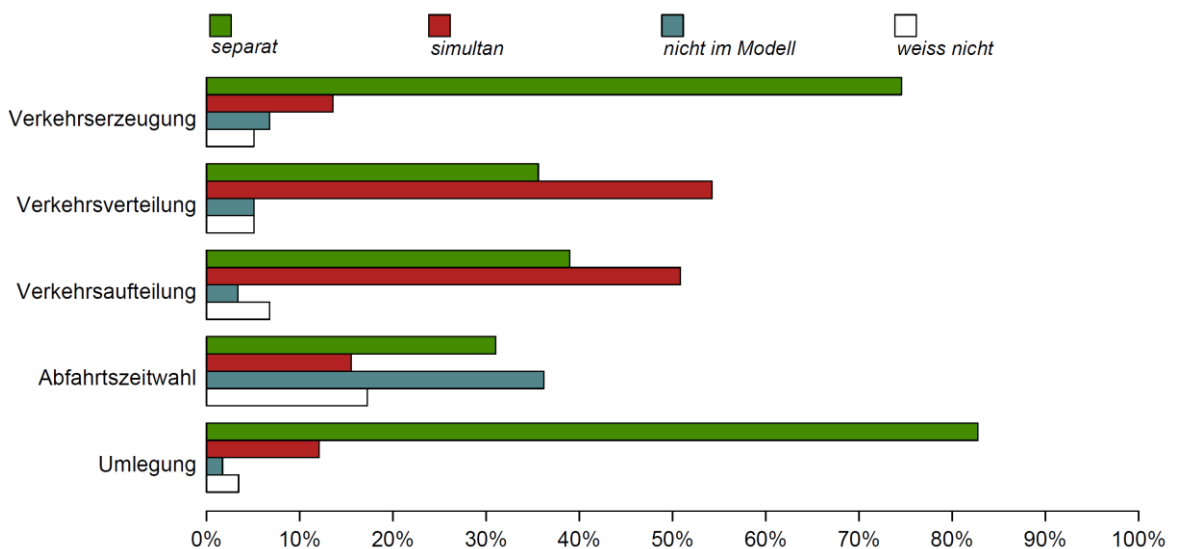


Abb. 26 Welche Modellstufen werden berücksichtigt und wie werden diese berechnet? (alle Modellersteller und Modellanwender, $n = 59$).

Abbruchskriterium für die Gleichgewichtsumlegung

Für die Gleichgewichtsumlegung wird in der Regel ein Konvergenz- bzw. Abbruchkriterium festgelegt. In rund 30% der Fälle war dieses Kriterium jedoch dem Befragten nicht bekannt.

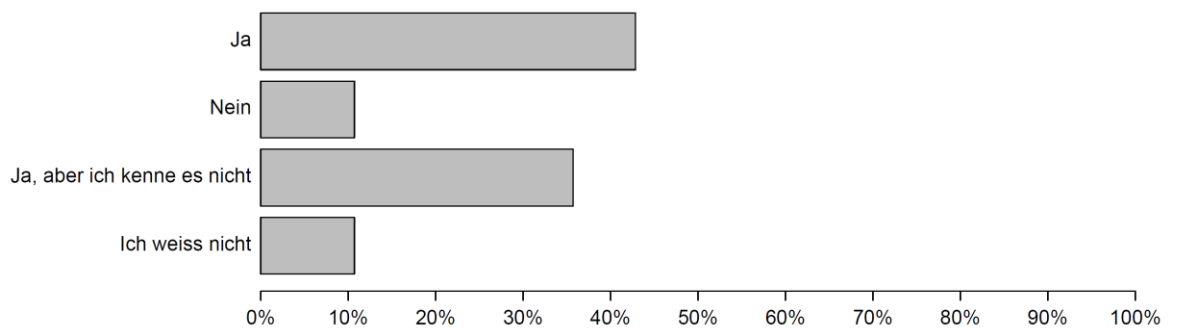


Abb. 27 Wurde für die Gleichgewichtsumlegung ein Konvergenz- bzw. Abbruchskriterium festgelegt? (Modellersteller und Modellanwender, nur Modelle mit Gleichgewichtsumlegung, $n = 28$).

Lieferung

Nach Erstellung eines Modells wird oft das komplette Modell an die Anwender übergeben. Ein erläuternder Modellbericht wird aber nur in 40% der Fälle mitgeliefert. Weitere technische Informationen fehlen bei rund 65% der gelieferten Verkehrsmodellarbeiten. Es stellt sich die Frage, warum so selten die Modelldokumentation nicht mitgeliefert wird, insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich Modellanwender derzeit mehr Transparenz wünschen. Wird der Modellbericht nicht standardmässig mitgeliefert? Wird er nur selten von den Anwendern eingefordert? Im Rahmen der Befragung konnten diese Fragen nicht beantwortet werden, sie sind aber allenfalls wichtig für die Diskussion zu Richtlinien.

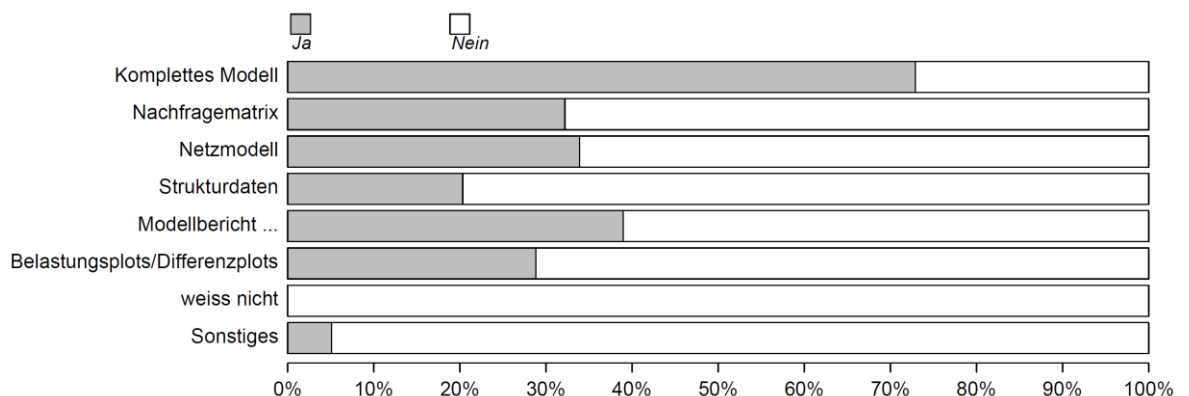


Abb. 28 Was wurde nach Fertigstellung des Modells an die Modellanwender der Ergebnisse geliefert? Für die detaillierten Ergebnisse zu Antwort «Modellbericht...» siehe Abb. 29 (alle Modellersteller und Modellanwender, $n = 59$).

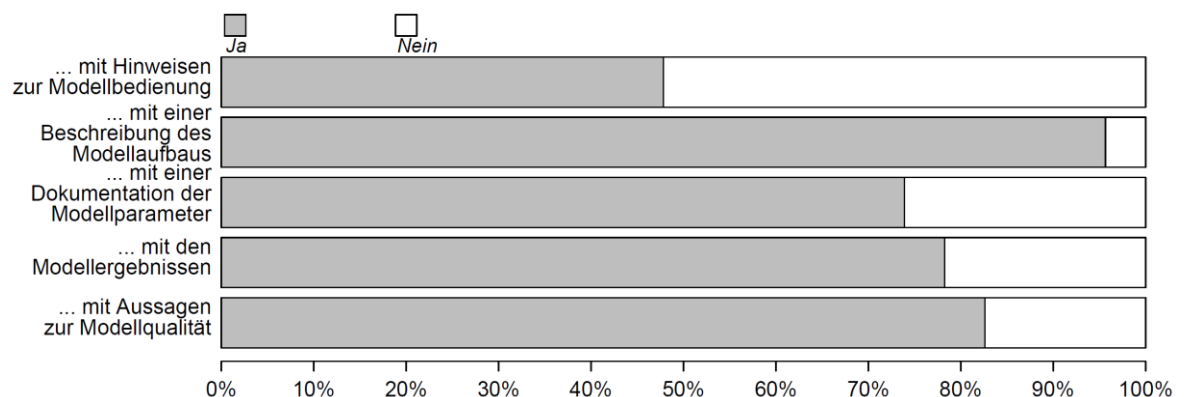


Abb. 29 Detaillierte Ergebnisse zu Antwort «Modellbericht...» von Abb. 28 ($n = 23$).

Definition Modellqualität

Bei der offenen Frage «Wie definieren Sie Modellqualität?» wurde ein «plausibles Verhalten von Verkehrsmodellen» und die «Übereinstimmung mit der Realität» (oder ähnliche Merkmale) am häufigsten genannt. «Transparenz und Verständlichkeit» ist bei manchen Befragten auch ein Merkmal von Qualität. Die Modelldokumentation wurde eher selten im Zusammenhang mit der Qualität eines Verkehrsmodells genannt.

Prioritäten für die Modellverbesserung

In der Befragung gab es die Möglichkeit, drei Modellbereiche auszuwählen, die für die Verbesserung der Modellqualität von grosser Wichtigkeit sind. Für die Befragten stellen bessere Daten das wichtigste Verbesserungspotenzial (Tab. 1) dar. Insbesondere eine Qualitätssteigerung der Vergleichsdaten für die Modellvalidierung wird gewünscht.

Tab. 1 «Stellen Sie sich vor, Sie bekommen Geld bzw. Personal, um Ihr Modell in drei Bereichen zu verbessern. Welche Bereiche wären das?» (alle Modellersteller).

Anzahl	Modellbereich
40	bessere Vergleichsdaten für die Modellvalidierung, z.B. mehr Zählstellen, genauere Erhebungen
33	bessere Verhaltensdaten aus einer Haushaltsbefragung, z.B. genauere Daten zum Mobilitätsverhalten der Haushalte
26	bessere Netzdaten, z.B. genauere Abbildung von Knotenpunktwideständen
23	bessere Strukturdaten, z.B. genauere Einwohner- oder Arbeitsplatzdaten
21	bessere räumliche Segmentierung des Modells, z.B. feinere Verkehrszelleneinteilung
14	Wahl eines anderen Modellansatzes, z.B. Modellierung von Wegeketten, Wahl anderer Umlenungsverfahren
10	bessere Software, z.B. für andere / bessere Funktionalitäten
10	weitere Modellstufen, z.B. Modellierung der Abfahrtszeitwahl
10	weitere Segmentierung der Nachfrage, z.B. mehr Personengruppen und / oder Wegezwecke
3	bessere Hardware, z.B. um Modelle schneller konvergieren zu lassen

4.2 Analyse zugänglicher Ausschreibungsunterlagen

4.2.1 Vorbemerkungen

Um den Stand der praktischen Anwendung zu erfassen, wurde eine Analyse zugänglicher Ausschreibungsunterlagen durchgeführt. Die Unterlagen der folgenden Verkehrsnachfragemodelle wurden berücksichtigt. In Klammern ist dabei jeweils das Jahr der Ausschreibung aufgeführt.

- Gesamtverkehrsmodell Bern (2008)
- Verkehrsnachfragemodell Stuttgart (2009)
- Gesamtverkehrsmodell Basel (2011)
- Landesverkehrsmodell Bayern (2014)
- Verkehrsnachfragemodell Freiburg (2016)
- Verkehrsmodell Kanton Aargau (2016)

4.2.2 Einsatzbereiche

Alle Ausschreibungen geben die geforderten Einsatzbereiche des zu erstellenden Modells vor. Bezüglich der geplanten Einsatzbereiche gibt es jedoch Unterschiede. Alle analysierten Ausschreibungen fordern, dass mit dem Modell die Wirkung von Massnahmen auf Strasse und ÖV sowie die Auswirkungen von demografischen Effekten abgebildet werden können. Nur das neue Verkehrsmodell des Kantons Aargau verlangt explizit, dass verkehrstechnische Dimensionierungen nach VSS-Norm möglich sein müssen. Dies setzt implizit voraus, dass die Knotenströme im Spitzenstundenmodell eine ausreichende Güte aufweisen müssen, um Aussagen über die Knotenkapazität zu machen. Die Modelle der Kantone Aargau und Bern verlangen zudem, dass mit den Modellen auch die Wirkungen von monetären Entwicklungen wie z.B. Erhöhung von Treibstoff- oder Ticketpreisen modelliert werden können.

4.2.3 Modellbildung: Räumliche und zeitliche Abgrenzung

Bezüglich der räumlichen und zeitlichen Abgrenzung des zu erstellenden Nachfragemodells unterscheiden sich die analysierten Ausschreibungen kaum. Da es sich bei diesen Randbedingungen um wesentliche Merkmale des Modells handelt, sind die Vorgaben hierzu jeweils vollständig. Alle Ausschreibungen definieren den Untersuchungs-, Planungs- und Aussenperimeter, teilweise mit Angaben zur Differenzierung der Modellgranularität (Anzahl Verkehrszellen). Auch die Vorgaben in Bezug auf die zeitliche Abgrenzung (Tagesmodell, Stundenmodell, Zeithorizonte) sind in allen Ausschreibungen vollständig.

4.2.4 Modellbildung: Angebot

MIV-Netz

Die Vorgaben bezüglich des MIV-Netzmodells sind sehr heterogen. Die Ausschreibung von Basel z.B. verlangt z.B., dass das Netz des Vorgängermodells verwendet werden soll. Für das Modell Bern werden in der Ausschreibung zwei mögliche Vorgehensweisen bei der Netzmodellierung vorgeschlagen, die auf unterschiedliche Datengrundlagen zurückgreifen und es werden gewisse Mindestanforderungen in Bezug auf die Attributierung gestellt. In den Ausschreibungen für Freiburg und für Aargau wird ein einfaches Netzmodell gefordert, in dem die komplexen Knoten eines Navigationsnetzes zu einem Knoten zusammenfasst werden.

Nicht alle Ausschreibungen geben vor, dass Knotenkapazitäten modelliert werden müssen. Die Ausschreibungen für die Modelle Bern, Basel, Aargau und Bayern verlangen belastungsabhängige Widerstandsfunktionen der Knoten respektive der Abbieger. Für das Modell Freiburg sind Knotenkapazitäten optional, Abbiegezuschläge jedoch zwingen zu berücksichtigen. Die Ausschreibung für das Modell Stuttgart macht keine Aussagen zur Knotenpunktmodellierung.

ÖV Netz

Bis auf die Ausschreibung des Modells Basel, das eine Zwischenstufe aus takt- und fahrplanbasierter Umlegung fordert, und des Modells Stuttgart, das keine Angaben hierzu macht, müssen alle Modelle mit einer fahrplanbasierten Umlegung gerechnet werden.

Anbindungen

Die Erstellung von Anbindungen wird in den Ausschreibungen i.d.R. nicht spezifiziert («angemessen abzubilden»). In manchen Ausschreibungen werden jedoch gewisse Vorgaben wie z.B. die Forderung nach Mehrfachanbindungen (Modell Bayern), um die Konzentration von Einspeiseverkehr zu vermeiden oder die Unterbindung von Anbindungen an Kreuzungen (Modell Aargau) gemacht. Zwei Ausschreibungen verlangen eine Spezifizierung von Anbindungskonzepten (Modelle Aargau und Bayern). Die Ausschreibungen der Modelle Freiburg und Stuttgart erwähnen Anbindungen nicht.

4.2.5 Modellbildung: Nachfrage

Die Ausschreibungen geben die Segmentierung der Nachfrage jeweils relativ genau vor. Die zu berücksichtigenden Wegezwecke sind im Sinne einer Mindestvorgabe stets angegeben. Die zu modellierenden Verkehrsmodi werden ebenfalls in allen Ausschreibungen angegeben. Bezüglich der Modellierung von multimodalen Wegen werden v.a. in der Ausschreibung des Modells Basel konkrete Konzepte verlangt.

In Bezug auf die Definition von Personengruppen werden nur in den Ausschreibungen von Basel und Bayern Mindestvorgaben gemacht. Für die anderen Modelle wird zwar erwähnt, dass diese zu definieren sind, ohne genauere Angaben zu machen.

Vorgaben in Bezug auf die Modellierung der Mobilitätswerkzeugen werden in den Ausschreibungen Bern, Basel und Aargau gemacht. Konkretere Vorstellungen zur Implementierung sind nur beim Modell Aargau ersichtlich.

Alle Ausschreibungen thematisieren den Umgang mit gebietsfremdem Verkehr und dem Güterverkehr. Der gebietsfremde Verkehr soll in allen Modellen in Form von externen Matrizen in das Modell integriert werden, wobei in einigen Fällen konkrete Quellenangaben gemacht werden, in anderen hingegen nicht. Der Güterverkehr soll nur in den Modellen Aargau und Freiburg mit einfachen Mitteln modelliert werden. Die anderen Ausschreibungen geben vor, den Güterverkehr aus anderen Quellen bzw. Modellen zu integrieren.

Bezüglich der Modellierung des ruhenden Verkehrs sind die Ausschreibungen sehr heterogen. Einige thematisieren ihn gar nicht (Freiburg, Stuttgart), andere geben lediglich vor, ihn zu berücksichtigen (Basel) und wiederum andere geben die Art der Modellierung vor (Bern, Aargau und Bayern).

4.2.6 Modellbildung: Modelltyp

Die Ausschreibungen geben jeweils klar vor, welche Modellstufen zu modellieren sind. Manche weisen explizit darauf hin, dass eine simultane Berechnung der Stufen sinnvoll sein kann. Für kein Modell wird die Modellierung der Abfahrtszeitwahl verlangt, vier Ausschreibungen weisen sogar explizit darauf hin, dass dies nicht gefordert ist. Bis auf die Ausschreibungen Bern und Bayern wird eine Rückkopplung bei der Modellerstellung explizit verlangt. Vorgaben zu den in den Nutzenfunktionen zu berücksichtigenden Kenngrößen macht nur die Ausschreibung des Modells Aargau.

Nur die Ausschreibung des Modells Aargau verlangt, dass das neue Modell mit VISUM erstellt werden muss. Für das Modell Freiburg wird ebenfalls VISUM als Softwarelösung gewünscht, stellt aber keine Bedingung dar. Die anderen Ausschreibungen lassen die Wahl der Software offen, fordern aber eine Kostenschätzung für die Lizenzgebühren der vom Anbieter vorgeschlagenen Softwarelösung.

4.2.7 Kalibrierung / Validierung

Die Ausschreibungen der Modelle Aargau, Bayern, Freiburg und Stuttgart machen in Form von Tabellen konkrete Vorgaben, welche Kenn- und Vergleichsgrößen bei der Validierung zu berücksichtigen sind. Ebenso werden tolerierbare Abweichungen vorgegeben. Für diese Modelle wird auch verlangt, dass mittels Elastizitätstests die Sensitivität der Modelle geprüft wird (Erhöhung der PW-Fahrzeit um 10%, Erhöhung der ÖV-Bedienungshäufigkeit um 10%). In der folgenden Tabelle sind die Spannbreiten der zulässigen Abweichungen der Modelle Aargau, Freiburg und Stuttgart zusammengestellt. Die Vorgaben für das Modell Bayern sind weniger ausführlich und verweisen nicht auf einen GEH-Wert, sondern geben relative Abweichungen in Abhängigkeit der absoluten Verkehrsbelastung vor (siehe Abb. 30 und Abb. 31). Die Anforderungen an die Modelle Bern und Basel sind weniger konkret. Beide Ausschreibungen verlangen zwar, dass die Modelle kalibriert und validiert werden müssen, quantitative Aussagen dazu finden sich aber in den Unterlagen keine.

Tab. 2 Validierungskenngrößen und zulässige Abweichungen in den Ausschreibungen.

Kenngrösse	inhaltlich	räumlich	Kontrolldaten	Zulässige Abweichung
Anzahl Wege einer Person / Werktag	Pro Nachfrageklasse	Untersuchungsraum	HH-Befragung	≤2%
Mittlere Reiseweite einer Person / Werktag	Pro Nachfrageklasse	Untersuchungsraum	HH-Befragung	≤ 4-5% oder ≤ 0.2-0.5 km
Mittlere Reisezeit einer Person / Werktag	Pro Nachfrageklasse	Untersuchungsraum	HH-Befragung	≤ 10% oder ≤ 5-10 min
Modal Split	Pro Nachfrageklasse	Untersuchungsraum	HH-Befragung	≤ 2-3% (Prozentpunkte)
Modal Split	Über alle Nachfrageklassen	Untersuchungsraum	HH-Befragung	≤ 1-2% (Prozentpunkte)
Verkehrsstärke MIV (Fz / Werktag)	PW / LW	Zählstelle	Verkehrszählungen	80-85% der Zählstellen mit $GEH \leq 10-20$, Mittelwert über alle Zählstellen ≤ 6-10
Verkehrsstärke ÖV (Personen / Werktag)	ÖV	Zählstelle	Verkehrszählungen	80-85% der Zählstellen mit $GEH \leq 10-12$, Mittelwert über alle Zählstellen ≤ 6-8
Verkehrsleistung ÖV (P-km / Werktag)	Pro Betriebszweig	Kanton / Planungsregion	Angaben TU	≤ 5-10%
Verkehrsstärke MIV MSP und ASP (Fz / h)	PW / LW	Zählstelle	Verkehrszählungen	80-85% der Zählstellen mit $GEH \leq 5$, Mittelwert über alle Zählstellen ≤ 4 Abweichung der abs. Verkehrsstärke max. 100 für Strecken mit Belastung < 700 und max. 400 für Strecken mit Belastung > 700, bei Belastungen von 700-2'700 max. 15% Abweichung
Verkehrsstärke ÖV MSP und ASP (P / h)	ÖV	Zählstelle	Verkehrszählungen	80-85% der Zählstellen mit $GEH \leq 5$, Mittelwert über alle Zählstellen ≤ 4
PW-Fahrzeiten unbel. Netz, MSP und ASP (min.)	PW	Ausgewählte Streckenzüge	Fahrzeitdaten	In Abhängigkeit der Fahrzeit: bis 15 min: ≤ 20% bis 30 min: ≤ 15% ab 30 min: ≤ 10%

Zählwert [DTV bzw. DTVw] Kfz bzw. PKW bzw. Lkw	Abweichungstoleranz
• 0 bis < 250	+/- 100,0%
• 250 bis < 500	+/- 60,0%
• 500 bis < 1000	+/- 30,0%
• 1000 bis < 2500	+/- 20,0%
• 2500 bis < 5000	+/- 15,0%
• 5000 bis < 15.000	+/- 10,0%
• 12.500 bis < 25.000	+/- 7,5%
• ≥ 25.000	+/- 5,0%

Abb. 30 Validierungskenngrößen Landesverkehrsmodell Bayern, MIV.

Zählwert [DTV bzw. DTVw] Personen	Abweichungstoleranz
• 400 bis < 600	+/- 45%
• 600 bis < 800	+/- 40%
• 800 bis < 1000	+/- 35%
• 1000 bis < 3000	+/- 30%
• 3000 bis < 6000	+/- 25%
• 6000 bis < 9.000	+/- 20%
• 9000 bis < 12.000	+/- 15%
• ≥ 12.000	+/- 10%

Abb. 31 Validierungskenngrößen Landesverkehrsmodell Bayern, ÖV.

4.2.8 Dokumentation

Die Anforderungen an die Dokumentation in den Ausschreibungen sind unterschiedlich. Manche Ausschreibungen sind diesbezüglich sehr knapp und fordern lediglich eine «ausführliche Dokumentation», während in anderen vorgegeben ist, welche abzugebende Dokumente welche Inhalte zu behandeln haben. Keine Ausschreibung gibt eine Dokumentationsvorlage im Sinne eines (kommentierten) Inhaltsverzeichnis vor.

4.3 Analyse zugänglicher Modellberichte

4.3.1 Vorbemerkungen

Zusätzlich zur Auswertung der Ausschreibungsunterlagen wurde eine Analyse von zugänglichen Modelldokumentationen durchgeführt, um den Stand der Anwendung zu erfassen. Die Unterlagen der folgenden Verkehrsnachfragemodelle wurden berücksichtigt:

- Verkehrsmodell der Kantone Luzern, Obwalden und Nidwalden
- Gesamtverkehrsmodell für den Personenverkehr des Kantons Zürich
- Nationales Personenverkehrsmodell für den öffentlichen und privaten Verkehr
- Gesamtverkehrsmodell Basel
- Verkehrsnachfragemodell Stuttgart

Die Analyse zeigt, dass der Umfang und die Struktur der Dokumentation sehr variiert. Die Modellberichte reichen von eher knappen (< 100 Seiten) bis sehr ausführlichen und umfangreichen (> 300 Seiten) Dokumentationen. Auch die Struktur der Dokumentation unterscheidet sich je nach Modell. Für manche Modelle wird ein einzelner Bericht erstellt, andere Modelle werden in mehreren Dokumenten mit unterschiedlichen Schwerpunkten (Modellerstellung, Modellergebnisse etc.) dokumentiert. Inhaltlich betrachtet sind alle Dokumentationen mehr oder weniger vollständig. In den folgenden Abschnitten werden die Berichte bezüglich einzelner Themen etwas vertiefter miteinander verglichen.

4.3.2 Anforderungen an das Modell

Grundsätzlich werden in den Modellberichten die Anforderungen an das Modell eher knapp beschrieben. Prognosefähigkeit und Massnahmensensitivität sind Stichworte, die sich in den meisten Dokumentationen in unterschiedlicher Ausführlichkeit finden. Aussagen zu den Einsatzgrenzen des Modells oder Hinweise zur Granularität der abzubildenden Massnahmen werden nicht gemacht.

4.3.3 Modellbildung

Die Modellbildung wird in allen Berichten dokumentiert: Die Beschreibung des Modellperimeters, Präzisierungen zur räumlichen und zeitlichen Segmentierung sind eine Folge davon, dass diese Rahmenbedingungen an das Modell in den Ausschreibungsunterlagen jeweils sehr klar vorgegeben werden. Die Modellierung von Aussenverkehr und Güterverkehr wird ebenfalls in allen Modellberichten mit Hinweisen zur Quelle erläutert.

4.3.4 Datengrundlagen

Auch die für die Modellerstellung verwendeten Datengrundlagen werden in allen Berichten vollständig dokumentiert. Allerdings werden die Grundlagen nicht in einem separaten Berichtskapitel in der Übersicht dargestellt, sondern jeweils in den verschiedenen Arbeitsschritten (Verkehrsangebot, Verkehrserzeugung etc.) erwähnt. Eine Nachvollziehbarkeit im Sinne eines schnellen Nachschlagens nach den verwendeten Grundlagen ist dadurch erschwert.

4.3.5 Aufbereitung Angebot

Die Aufbereitung des Angebots ist ebenfalls in allen Modellberichten beschrieben. Dieser Arbeitsschritt wird oft im Zusammenhang mit den Datengrundlagen beschrieben, da das Angebot in einigen Modellen auf bestehenden Grundlagen aufbaut und dieses gegebenenfalls ergänzt oder korrigiert wird.

4.3.6 Modellierung Verkehrsnachfrage

Die Erzeugungsraten, Nutzenfunktionen und dessen Parameter sind in allen Modellberichten allerdings in unterschiedlicher Ausführlichkeit erläutert. Angaben zu den Umlegungsparametern finden sich nicht in allen Dokumentationen. Das Nationale Personenverkehrsmodell und das Modell Stuttgart machen hierzu keine Angaben. Die übrigen Berichte zeigen die Einstellungen und Parameter anhand von Screenshots.

4.3.7 Validierung und Kalibrierung

Die Validierungsergebnisse werden in den meisten Modellberichten in keinen Zusammenhang mit allfällig geordneten Qualitätsanforderungen gestellt. Nur für das Modell Stuttgart werden die Ergebnisse der Validierung konsequent tabellarisch zusammengestellt und mit den zulässigen Abweichungen verglichen. Eingehaltene Werte werden in der Tabelle mit «OK» vermerkt. Die anderen untersuchten Modellberichte liefern ebenfalls eine Menge Diagramme und Grafiken wie z.B. Differenzbelastungsplots, Scatterplots mit Angaben zum R^2 oder Verteilungsplots mit Vergleichen von Modelldaten mit Erhebungsdaten. Die Ergebnisse werden z.T. qualitativ eingeordnet («gute Übereinstimmung»), ohne jedoch auf eine vorgegebene quantitative zulässige Abweichung Bezug zu nehmen. Grund für diese fehlende Einordnung ist vor allem in fehlende Anforderung seitens der Modellbesteller. Der Modellbericht Basel beispielsweise stellt modellierte und gezählte Werte in einem Scatterplot dar und definiert Abweichungen von < 15% eigenständig als «gute Qualität». Die entsprechende Ausschreibung hat diesbezüglich keine Vorgaben gemacht und lediglich verlangt, dass das Modell kalibriert und validiert wird. Im Modellbericht Luzern werden Fahrtlängenverteilungen aus dem Modell mit denjenigen gemäss Mikrozensus optisch und ohne quantitative Messgrössen verglichen und qualitativ eingestuft («ähnliche Struktur»).

4.4 Fazit

Mit der ausführlichen Erhebung des Standes der Anwendung sollte aufgezeigt werden, welche Massnahmen zur Qualitätssicherung von Verkehrsmodellen heute bereits umgesetzt werden und wo noch Handlungsbedarf besteht. Werden die Ergebnisse dieser Bestandsaufnahme den in den nachfolgenden Kapiteln 6 und 0 beschriebenen Empfehlungen gegenübergestellt, ergeben sich daraus die folgenden Erkenntnisse:

Die in der Schweiz eingesetzten Verkehrsmodelle umfassen alle die Wegezwecke Wohnen, Arbeit und Freizeit und mehr als 90% der Modelle auch die Wegezwecke Ausbildung und Einkaufen. Darüber hinaus beinhaltet eine Mehrheit der Modelle auch den Fahrtzweck Nutzfahrt. Der als «Nutzfahrt» modellierte Personenwirtschaftsverkehr wird in der Schweiz folglich in der Regel als Teil des Personenverkehrs und nicht als Güterverkehr betrachtet. Damit entsprechen die heutigen Modelle in der Schweiz mehrheitlich der in Kapitel 5.6 formulierten Empfehlung für grossräumige bzw. nationale Modelle. Eine feinere Differenzierung der Wegezwecke Einkaufen (Einkaufen täglicher Bedarf vs. Einkaufen sonstiger Bedarf) und Ausbildung (Ausbildung Schule vs. Ausbildung Hochschule) wird nicht vorgenommen.

Mit einer Ausnahme erfolgt gemäss den Befragungsergebnissen in allen Schweizer Modellen eine Unterteilung der Bevölkerung in Personengruppen. Der grösste Teil der Modelle weist zwei bis zehn Personengruppen auf. Die wichtigsten Kriterien sind das Alter und die Erwerbstätigkeit. Dies entspricht den optionalen Empfehlungen zur Bildung von Personengruppen in Kapitel 5.6. Der grösste Handlungsbedarf besteht bei den Mobilitätswerkzeugen. Während etwa 70% der Befragten angaben, PW-Besitz bei der Bildung von Personengruppen zu berücksichtigen, wurde der Besitz von ÖV-Abonnements nur bei etwa 35% der beschriebenen Modelle berücksichtigt.

Eine weitere wichtige Empfehlung ist die Implementation von kapazitäts- und steuerungsabhängigen Abbiegezeiten in städtischen bzw. regionalen Modellen (vgl. Kapitel 5.5). Im Rahmen der Experten-Befragung wurde diese Modelleigenschaft leider nicht abgefragt. Aus dem Studium der Modellberichte (vgl. Kapitel 4.3) ging jedoch hervor, dass bisher in der Schweiz nur sehr wenige Modelle eine explizite Modellierung von Knotenwiderständen enthalten. Dies wird in den kommenden Jahren eine wesentliche Herausforderung für die Verkehrsmodellierung in der Schweiz sein.

Hinsichtlich der MIV-Umlegung wird in Kapitel 5.2 empfohlen, deterministische oder stochastische Umlegungsverfahren und keine Sukzessivumlegung zu verwenden. Gemäss unserer Befragung wird diese Empfehlung bereits heute von der überwiegenden Mehrheit umgesetzt, vereinzelt wird jedoch noch eine Sukzessivumlegung eingesetzt. Bezüglich des Konvergenzkriteriums wurden viele verschiedene Kriterien (z.B. relative Abweichung, Relative Gap, Anzahl Iterationen) und eine grosse Spannweite von Grenzwerten genannt. Mit der neuen konkreten Empfehlung von einem Relative Gap < 0.0001 wird hierbei in Zukunft hoffentlich eine Vereinheitlichung erreicht.

Ein grosser Teil der Befragung behandelte die bisher eingesetzten Methoden und Kriterien zur Validierung der Verkehrsmodelle, zu welchen in Kapitel 6.2 Empfehlungen formuliert sind. Eine Mehrheit der Befragten setzt die empfohlene Validierung des Verkehrsaufkommens mit diversen Differenzierungen bereits um. Welches Gütemass dabei verwendet wird, wurde nicht erfragt.

Eine Validierung der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwandes wird von den meisten Befragten durchgeführt, häufig werden jedoch nur Mittelwerte betrachtet und allenfalls die Verteilung optisch mit der Verteilung der Kontrolldaten verglichen. Die Möglichkeit der Überprüfung des Koinzidenz-Verhältnis ist vielen unbekannt und wird nur von einer Minderheit genutzt.

Ähnlich steht es um die Überprüfung der modellierten Verkehrsstärke. Diese wird von allen Befragten durchgeführt, als Kriterium wird dabei in der Regel jedoch nur die relative Abweichung verwendet. Weiter entwickelte Gütemasse wie der GEH oder die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers sind hingegen vielen nicht bekannt und werden entsprechend wenig eingesetzt. Es zeigt sich, dass hierbei noch ein gewisser Informationsbedarf besteht.

Dies gilt auch für die Bedeutung der Validierung der Fahrtzeiten im Netz, welche derzeit von weniger als der Hälfte der Befragten durchgeführt wird. Nur etwa 40% der Befragten prüfen Fahrtzeiten auf Relationsebene und / oder für einzelne Strassenkategorien. 35% der Befragten gaben sogar an, gar keine differenzierte Auswertung der Fahrtzeiten vorgenommen zu haben.

Die Bedeutung von Sensitivitätstests wird hingegen von den meisten Schweizer Befragten erkannt. Knapp 90% der Befragten gaben an, Sensitivitätstests durchgeführt zu haben. Weitere Details zu diesen Tests wurden nicht erhoben.

Die Erhebungen zum Stand der Anwendung zeigen, dass viele der in den folgenden Kapiteln gemachten Empfehlungen bei der Erstellung und Validierung von Modellen in der Schweiz bereits berücksichtigt werden. Das Ziel der Empfehlungen für diese Aspekte ist daher primär eine Vereinheitlichung und die Etablierung eines gemeinsamen Standards. Hinsichtlich einzelner Themen besteht jedoch noch grösserer Verbesserungs- und Informationsbedarf. Namentlich gilt dies insbesondere für die Modellierung von kapazitäts- und steuerungsabhängigen Knotenwiderständen, für die Überprüfung von Fahrtzeiten im Netz und für weiter entwickelte Gütemasse für die Validierung von Verteilungen und Einzelwerten.

Ein weiteres wichtiges Thema ist lückenlose Dokumentation des Modells und die Weitergabe der Dokumentation an die Anwender. Im Rahmen der Befragung zeigte sich, dass der Modellbericht nur in etwa 40% der Fälle an die Anwender übergeben wird, wobei unklar ist, ob dies daran liegt, dass er von den Modellinhabern nicht ausgegeben oder von den Modellanwendern nicht eingefordert wird. Zudem werden nur in 50% der Modellberichte Hinweise zur Bedienung des Modells gegeben und nur in 75% die Modellparameter dokumentiert, und es fehlen häufig Aussagen zu den Einsatzgrenzen des Modells oder Hinweise zur Granularität der abzubildenden Massnahmen. Hier besteht Verbesserungsbedarf.

5 Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle

Die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells lässt sich in drei Stufen unterteilen, die vom Modellersteller durchgeführt werden:

- Erstellung einer Modellspezifikation,
- Erstellung des Modells entsprechend der Spezifikation einschliesslich der Qualitätsprüfung und
- optionale Erstellung eines Referenzzustandes für einen oder mehrere Prognosehorizonte.

Nach der Modellerstellung steht ein geprüftes Verkehrsnachfragemodell zur Verfügung, dass der Modellanwender für seine Zwecke nutzen kann.

Dieses Kapitel gibt Hinweise und Empfehlungen zur Verkehrsnachfragemodellierung im Personenverkehr, die Modellbesteller und Modellersteller bei der Erstellung einer Modellspezifikation unterstützen sollen. Eine Modellspezifikation soll Aussagen zu den folgenden Punkten beinhalten:

- Einsatzbereiche des Modells und Kenngrössen, die mit dem Modell ermittelt werden sollen,
- Modelltypen, erforderliche Modellstufen und Abbildung von Wahlentscheidungen,
- Abgrenzung des Planungs- und Untersuchungsraums,
- Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur,
- Abbildung des Verkehrsangebots,
- Abbildung der Verkehrsnachfrage,
- Abbildung externer Verkehre und des Wirtschaftsverkehrs,
- Anforderungen an die Prognose und
- verfügbare und erforderliche Daten.

Das Kapitel gibt Hinweise und Empfehlungen für zwei Arten von Verkehrsnachfragemodellen:

- Modellart 1: Der in diesen Modellen abgebildete Untersuchungsraum wird maximal ein Gebiet von 100 km x 100 km abdecken. Der Anteil des Fernverkehrs an der Verkehrsleistung, der mit dem Modell berechnet wird, ist dementsprechend gering. Die Dauer der meisten im Modell abgebildeten 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: Der in diesen Modellen abgebildete Untersuchungsraum umfasst einen Grossraum mit mehreren Zentren von nationaler Bedeutung oder ein ganzes Staatsgebiet. Der Anteil des Fernverkehrs an der Verkehrsleistung ist hoch. Wege im Untersuchungsraum, die länger als 60 Minuten dauern, werden im Modell explizit abgebildet. 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.

5.1 Einsatzbereiche des Modells

Die Anforderungen an die Verkehrsnachfragemodellierung ergeben sich aus den geplanten Einsatzbereichen des Modells. Ein Modell soll die Wirkungen von Entwicklungen und Massnahmen für einen oder mehrere Bezugszeiträume ermitteln. Tab. 3 zeigt mögliche Bezugszeiträume in einem Verkehrsnachfragemodell, für die die Verkehrsnachfrage ermittelt wird. Tab. 4 gibt einen Überblick über typische Entwicklungen und Massnahmen, deren Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage für die Verkehrsplanung von Bedeutung sind. Die

Tabelle enthält auch Massnahmen, die mit einem Verkehrsnachfragemodell nicht, nur eingeschränkt oder nur mit besonderen Annahmen abbildbar sind:

- Massnahmen im Fussverkehr: Diese Massnahmen sind für Nachfragemodelle meist zu kleinräumig und können in den Netzmodellen nicht ausreichend genau abgebildet werden. Für spezielle Anwendungen, z.B. Fussgängerströme an Bahnhöfen, sind hochaufgelöste Netzmodelle mit kleinen Verkehrszellen erforderlich. Detailliertere Informationen diesbezüglich finden sich z.B. im SVI-Forschungsauftrag 2014/001 «Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs» [42].
- Massnahmen des Marketings: Diese Massnahmen ändern nicht das Verkehrsangebot, sondern informieren Verkehrsteilnehmer. Damit diese Massnahmen zu Verhaltensänderungen führen, müssen sich die Präferenzen der Verkehrsteilnehmer ändern. Hierfür liegen in der Regel keine Daten vor und müssten mit Stated Preference Untersuchungen („Was würden Sie tun, wenn Sie folgende Informationen bekommen“) geschätzt werden.
- Massnahmen der Verkehrsleittechnik und des Verkehrsmanagements: Nachfragemodelle bilden Lernprozesse von Verkehrsteilnehmern nach. Sie berücksichtigen regelmässig auftretende Störungen, aber keine zufälligen Störungen. Die Wirkung dynamischer Massnahmen, die auf zufällige Störungen und Ereignisse reagieren, lassen sich deshalb in Nachfragemodellen nur mit zusätzlichen Annahmen zum Verhalten abschätzen.

Aus den Einsatzbereichen leiten sich dann die Anforderungen an die Kenngrössen ab, die mit dem Modell ermittelt werden sollen. Tab. 5 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.

Anlass einer Modellerstellung können auch bestimmte, meist formalisierte Planungsverfahren sein, die mit dem Modell unterstützt werden sollen. Dazu gehören

- die Erstellung von Verkehrsentwicklungsplänen und Nahverkehrsplänen für den ÖV,
- verkehrstechnische Leistungsfähigkeitsuntersuchungen,
- volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Untersuchungen von Massnahmen und
- die Erstellung von Luftreinhalte- und Lärminderungsplänen.

Diesen Planungsverfahren lassen sich bestimmte Massnahmen aus Tab. 4 zuordnen. Meist sind mit den Planungsverfahren bestimmte Anforderungen an Kenngrössen und deren Differenzierung verknüpft.

Tab. 3 Checkliste Bezugszeiträume: Welche Zeiträume sollen das Modell abbilden?

Bezeichnung	Bezugszeitraum	Hinweise
Werktagmodell (DWV)	Es wird ein mittlerer Werktag Montag bis Freitag in der Schulzeit abgebildet	• Es wird angenommen, dass sich Menschen an jedem Werktag weitgehend gleich verhalten. • Mithilfe wegeweckspezifischer Ganglinien können mittlere Verkehrsstärken für die Tageszeiten (z.B. Spitzenstunde) eines Werktags ermittelt werden.
Tagesmodell (DTV)	Es wird ein mittlerer Tag des Jahres abgebildet	• Da sich das Mobilitätsverhalten zumindest zwischen Werktagen und Wochenenden deutlich unterscheidet, kann das Mobilitätsverhalten eines durchschnittlichen Tages nicht modelliert werden. • Lösung 1: Es werden ausgewählte Tage (Mo-Fr, Sa, So) modelliert und dann gewichtet aufsummiert. • Lösung 2: Die Werktagmatrix wird mit einem Matrixkorrekturverfahren an gezählte DTV-Werte angepasst.
Verkehrstagesmodell	Es wird ein ausgewählter Verkehrstag abgebildet. Dieser Verkehrstag umfasst eine Menge von Kalendertagen mit ähnlichen Eigenschaften, Verkehrstagesmodelle können für Gebiete geeignet sein, in denen hohe Nachfrage nicht an Werktagen auftritt (z.B. Urlaubsgebiete).	• Es sind Daten zum Mobilitätsverhalten für den gewählten Verkehrstag erforderlich. • Mithilfe wegeweckspezifischer Ganglinien können mittlere Verkehrsstärken für die Tageszeiten (z.B. Spitzenstunde) des Verkehrstags ermittelt werden.
Wochenmodell	Für Dimensionierungsaufgaben in Gebieten mit täglich schwankender Verkehrsnachfrage kann ein Wochenmodell sinnvoll sein (z.B. Schienenfernverkehr)	• Es sind Daten zum Mobilitätsverhalten und zum Verkehrsangebot (Fahrpläne) für jeden Wochentag erforderlich.

Tab. 4 Checkliste Einsatzbereiche: Welche Entwicklungen und Massnahmen sollen berücksichtigt werden?(Tabelle in Anlehnung an [52])

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

Tab. 5 Checkliste Kenngrößen: Welche Kenngrößen soll das Modell liefern und in welcher Differenzierung?

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

Tageszeitlich differenzierte Kenngrößen sind dann erforderlich, wenn die Ergebnisse für die Dimensionierung des Verkehrsangebots genutzt werden sollen oder wenn die Wirkungen für einzelne Zeitintervalle benötigt werden (z.B. für die Lärmemission nachts).

Teilräumlich differenzierte Kenngrößen können für die Untersuchung besondere Auswirkungen erforderlich sein. Beispiele hierfür sind CO₂-Emissionen oder Erlöse im ÖV, die für Bilanzierungen nach Gebieten benötigt werden.

Verkehrsstärken werden für alle Strecken und Abbieger ausgewiesen. Für spezielle Fragestellungen kann aber eine weitere Differenzierung der Netzelemente erforderlich sein. So können die Verkehrsstärken einer ÖV-Linie oder einer Fahrplanfahrt oder die Umsteiger an einer Haltestelle von Interesse sein.

5.2 Abbildung der Entscheidungsprozesse (Modellstufen)

5.2.1 Diskrete Entscheidungsmodelle

Ein Nachfragemodell für den Personenverkehr bildet die verkehrsrelevanten Entscheidungsprozesse der Einwohner eines Untersuchungsraums ab. Modelle, die Entscheidungsprozesse nachbilden, basieren auf folgenden Annahmen:

- Die Entscheider wählen eine Alternative i aus einer endlichen (= zählbaren) Menge von diskreten (= eigenständigen) Alternativen I , dem sog. Choice Set aus.
- Die Entscheidung wird durch Eigenschaften g des Entscheiders beeinflusst.
- Die Entscheidung wird durch Eigenschaften x der Alternativen beeinflusst.
- Mit den Eigenschaften der Entscheider und der Alternativen kann für jede Alternative mit einer sog. Nutzenfunktion ein Wert quantifiziert werden, der den Nutzen der Alternative beschreibt. Die Eigenschaften der Alternativen stellen dabei objektive und die Eigenschaften der Entscheider (individuelle Präferenzen) subjektive Einflussgrößen im Entscheidungsprozess dar.
- Die Alternativen i sind eigenständig, d.h. sie beinhalten keine Elemente einer konkurrierenden Alternative (siehe hierzu Abb. 40).
- Die Entscheider wählen die Alternative mit dem für sie höchsten Nutzen.

Wenn alle Entscheider einer Gruppe auf der Basis perfekter Informationen entscheiden, wird das Entscheidungsmodell deterministisch genannt. Der Nutzen ergibt sich dabei direkt aus den objektiv messbaren Eigenschaften der Alternativen. Das kann dazu führen, dass alle Entscheider dieselbe Alternative wählen. Beim deterministischen Nutzergleichgewicht werden die Entscheider so auf die Alternativen aufgeteilt, dass der Aufwand für alle Alternativen des Choice Sets gleich gross ist.

Wenn die Entscheider nur über unvollständige Informationen verfügen, wird das Entscheidungsmodell stochastisch genannt. Der Nutzen umfasst dann neben den objektiv messbaren Eigenschaften einen subjektiven Anteil, der über eine Bewertungsfunktion beschrieben wird.

Nutzenfunktion		$v_{gi} = \beta_{0gi} + \beta_{1g}x_{1i} + \beta_{2g}x_{2i} + \dots$ $= \beta_{0gi} + \sum_k \beta_{kg}x_{ki}$	Beispiel einer linearen Nutzenfunktion
• Nutzen V der Alternative i für Entscheider der Gruppe g			
Bewertungsfunktion		$b_{gi} = f(v_{gj})$	
• Bewerteter Nutzen b der Alternative i für Entscheider der Gruppe g			
Anteil einer Alternative		$p_{gi} = \frac{b_{gi}}{\sum_{i \in I} b_{gi}} = \frac{f(v_{gj})}{\sum_{i \in I} f(v_{gj})}$	
• Anteil p der Alternative i für Entscheider der Gruppe g			
Parameter			
I	Menge der Alternativen (Choice Set)		
g	Nachfragegruppe: Eine Menge von Entscheidern mit ähnlichen Präferenzen		
β_{0gi} (alternativenspezifische Konstante)	Parameter der Aufwandsempfindlichkeit der Gruppe g bei der Alternativenwahl für die k . Kenngrösse der Alternative.		
β_{kg}			
Variablen			
x_{ki}	Wert der Kenngrösse k zur Beschreibung der Eigenschaften der Alternative i		
Beispiele für Bewertungsfunktionen (Auswahl)			
$f(v_{gi}) = e^{\alpha_g \cdot v_{gi}}$		Bezeichnung: Logit Model	
		Funktionsform: • Exponentialfunktion • abfallend ohne Wendepunkt • ein Funktionsparameter α Eigenschaften: • bei der Berechnung des Anteils ist ausschliesslich die Nutzendifferenz entscheidend • Elastizität steigt linear an • Reagiert im Nahbereich schwächer als im Fernbereich	
$f(v_{gi}) = v_{gi}^{\alpha_g}$		Bezeichnung: Kirchhoff Model	
		Funktionsform: • Potenzfunktion • abfallend ohne Wendepunkt • ein Funktionsparameter α Eigenschaften: • bei der Berechnung des Anteils ist ausschliesslich das Nutzenverhältnis entscheidend • Elastizität konstant • Reagiert im Nahbereich stärker als im Fernbereich	

$$f(v_{gi}) = \frac{1}{(1 + v_{gi})^{\varphi(v_{gi})}}$$

$$\varphi(v_{gi}) = \frac{\alpha_{1g}}{1 + e^{(\alpha_{2g} - \alpha_{3g} \cdot v_{gi})}}$$

Bezeichnung: EVA Modell

Funktionsform:

- Halbglockenkurve
- abfallend mit Wendepunkt
- drei Funktionsparameter α

Eigenschaften:

- Die EVA-Funktion kombiniert die Eigenschaften der Exponential- und der Potenzfunktion
- Elastizität steigt im Nahbereich und sinkt dann wieder
- Reagiert im Nahbereich und im Fernbereich schwächer als im mittleren Wertebereich

Abb. 32 Grundstruktur stochastischer Entscheidungsmodelle.

Hinweise und Empfehlungen zu Entscheidungsmodellen

Hinweise

- In einem Verkehrsnachfragemodell werden nicht alle Entscheidungen der Realität durch Entscheidungsmodelle abgebildet. Die Anteile oder die Nutzungshäufigkeit einer Alternative können auch als Modellparameter vorgegeben werden. Beispiele hierfür sind bei der Aktivitätenwahl die Häufigkeiten einzelner Wegezwecke einer Personengruppe und bei der Abfahrtszeitwahl die Vorgabe von Anteilen für einzelne Zeitintervalle.
- In mikroskopischen Nachfragemodellen entscheidet sich ein Entscheider für genau eine Alternative, in makroskopischen Modellen werden für eine Gruppe von Entscheidern die Anteile bestimmt, die auf die jeweilige Alternative entfallen.

Empfehlungen

- Für städtische und regionale Modelle sind Bewertungsfunktionen vom Typ Logit angemessen.
- Grossräumige Modelle, die Entscheidungssituationen im Nahbereich und im Fernbereich nachbilden, müssen entweder Bewertungsfunktionen mit mehr als einem Parameter einsetzen (Halbglockenkurven) oder die Nachfrage in Gruppen des Nahverkehrs- und des Fernverkehrs segmentieren.

Abb. 33 Hinweise und Empfehlungen zu Verkehrserzeugungsmodellen.

5.2.2 Aktivitätenwahl und Verkehrserzeugung

Verkehrserzeugungsmodelle bilden die Aktivitätenwahl der Bewohner des Untersuchungsraumes nach. Sie ermitteln das Verkehrsaufkommen, d.h. die Zahl von Ortsveränderungen, die von der Bevölkerung einer Verkehrszelle innerhalb eines bestimmten Zeitraumes (z. B. eines Werktages) durchgeführt werden. Verkehrserzeugungsmodelle berechnen das Verkehrsaufkommen einer Verkehrszelle differenziert nach Wegezwecken aus Strukturgrößen dieser Zelle (z.B. Einwohner, Arbeitsplätze, Einkaufsflächen) und spezifischen Mobilitätsraten. Dabei wird zwischen dem produzierten Verkehr an der Quelle einer Ortsveränderung und dem angezogenen Verkehr am Ziel einer Ortsveränderung unterschieden.

Bei Einzelwegmodellen wird die Verkehrserzeugung auf der Ebene von Quelle-Ziel-Gruppen (z.B. Wohnen-Arbeiten) durchgeführt. Die Mobilitätsraten einer Quelle-Ziel-Gruppe können direkt aus Haushaltsbefragungen mit Mobilitätstagebüchern übernommen werden. Bei der Verkehrserzeugung sollten drei Wegetypen differenziert werden:

- Wege, die am Wohnort beginnen (Wohnort = Quelle)
- Wege, die am Wohnort enden (Wohnort = Ziel)
- Wege ohne direkten Wohnortsbezug (Wohnort ist weder Quell- noch Zielseite)

Wege vom Typ 1 und 2 sind sogenannte heimatgebundene Wege, deren Zahl sich unmittelbar aus der Zahl der Einwohner an der Quelle (Typ 1) oder am Ziel (Typ 2) ableiten lassen. Um sicherzustellen, dass innerhalb eines Tages für jede Zelle die Zahl der produzierten Wege der Zahl der angezogenen Wege entspricht, sind bei Wegen vom Typ 3 in der Erzeugung und in der Zielwahl zusätzliche Randbedingungen einzuhalten.

Bei Aktivitätenkettenmodellen werden in der Verkehrserzeugung in der Wohnzelle nicht einzelne Wege, sondern ganze Aktivitätenketten erzeugt, die eine Folge von Aktivitäten vom

Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr beschreiben. Die Häufigkeiten von Aktivitätsketten können ebenfalls aus Mobilitätstagebüchern abgeleitet werden. Lange Aktivitätsketten, die selten auftreten (z.B. Wohnen – Einkaufen – Einkaufen – Einkaufen – Wohnen), müssen dabei auf einfachere Ketten reduziert werden.

Verkehrserzeugung	
von der Gruppe g in Zelle o produzierte Ortsveränderungen d	$d_{go}^p = u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K \beta_{kg}^p \cdot z_{ok}$
von der Gruppe g in Zelle d angezogene Ortsveränderungen d	$d_{gd}^a = u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K \beta_{kg}^a \cdot z_{dk}$
Parameter	
g	Nachfragegruppe: Eine Menge von Ortsveränderungen mit gleichen Eigenschaften bezüglich des Wegezwecks. Folgende zusätzliche Differenzierung sind möglich: - Personengruppe - Raumtyp, wenn Personen abhängig vom Wohnstandort (Stadt, Land) eine unterschiedliche Anzahl von Ortsveränderungen erzeugen.
$\beta_{kg}^p, \beta_{kg}^a$	Produktions- bzw. Anziehungsrate: Zahl der Ortsveränderungen, die von einer Strukturgröße k produziert oder angezogen werden. - abhängig von: Nachfragegruppe - Datenquelle Analyse: Mobilitätstagebücher, Literatur - Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse
u_{gz}^p, u_{gz}^a	Untersuchungsraumanteil: Anteil der Ortsveränderungen des produzierten bzw. des angezogenen Verkehrs in Zelle z, deren Quelle und Ziel im Untersuchungsraum liegt. - abhängig von: Verkehrszelle, Nachfragegruppe - Datenquelle Analyse: Erhebungen, Abschätzungen - Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse
Variablen	
z_{zk}	Wert einer Strukturgröße k (z.B. Personen einer Personengruppe, Arbeitsplätze, Einkaufsgelegenheiten) - abhängig von: Verkehrszelle z - Datenquelle: Statistische Ämter, eigene Recherche, kommerzielle Datenanbieter - Datenquelle Prognose: Flächennutzungspläne, Regionalpläne, eigene Recherche

Abb. 34 Grundstruktur eines Verkehrserzeugungsmodells.

Hinweise zu und Empfehlungen Verkehrserzeugungsmodellen

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 Aussenraum. 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.
- Bei manchen Wegezwecken (z.B. Ausbildung) liegen Quellen und Ziele des Weges in einem Teilraum des Untersuchungsraumes (z.B. innerhalb einer Gemeinde). Dann muss bei der Verkehrserzeugung sichergestellt werden, dass in jedem Teilraum die Zahl der produzierten und angezogenen Wege übereinstimmt.

Modellparameter

- Produktionsraten: Produktionsraten 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 [10].

Empfehlungen

- Die Verkehrserzeugung sollte differenziert nach Wegezwecken erfolgen (siehe Kapitel 5.6).
- Wenn eine Prognose erstellt wird, sollte die Verkehrserzeugung Personengruppen unterscheiden (siehe Kapitel 5.6 und 5.8).
- Die gewählten Produktionsraten, Anziehungsraten und die Untersuchungsraumanteile sollten für jeden Wegezweck im Modell hinterlegt werden.

Abb. 35 Hinweise und Empfehlungen zu Verkehrserzeugungsmodellen.

5.2.3 Zielwahl

Bei der Zielwahl wird der in einer Zelle produzierte Verkehr auf mögliche Zielzellen verteilt. Die Zahl der Ortsveränderungen zwischen zwei Zellen o und d , die auf eine Nachfragegruppe g (z.B. Erwerbstätige zur Arbeit) entfallen, hängt ab

- von den Eigenschaften der Quellzelle (z.B. Zahl der Erwerbstätigen), die das produzierte Verkehrsaufkommen bestimmen,
- von den Eigenschaften der Zielzelle (z.B. Zahl der Arbeitsplätze), die das angezogene Verkehrsaufkommen bestimmen,
- vom Aufwand, der erforderlich ist, um von der Quelle o das Ziel d zu erreichen (z.B. Entfernung, Reisezeit),
- vom Wegezweck (Weg zu einer Pflichtaktivität mit festem Ort oder zu sonstigen Aktivitäten mit freier Wahl des Ortes) und
- von der Bewertung des Aufwands durch die Verkehrsteilnehmer.

Bei der Verteilung der Nachfrage müssen besondere Bedingungen eingehalten werden:

- Gewisse Aktivitätenorte können nur von einer fest vorgegebenen Anzahl von Personen aufgesucht werden. Das gilt für Wohnorte und für Orte von Pflichtaktivitäten, wie Arbeitsplätze und Ausbildungsplätze, die pro Platz von genau einer Person genutzt werden können. Diese Bedingungen werden als harte Randsummenbedingungen bezeichnet. Die Zielwahl berücksichtigt die Erreichbarkeit und gleichzeitig die Kapazität. Zielwahlmodelle mit harten Randsummenbedingungen halten die in der Verkehrserzeugung ermittelten produzierten und angezogenen Wege sowohl auf der Wohnortseite als auch auf der Seite der Pflichtaktivität genau ein.
- Viele Aktivitätenorte, die nicht bestimmten Personen zugeordnet sind, haben trotzdem eine Untergrenze oder Obergrenze an Nutzern. Ein vorhandener Einkaufsort wird auch bei schlechter Erreichbarkeit immer eine Mindestanzahl von Kunden anziehen, sonst

gäbe es diesen Ort nicht. Gleichzeitig gibt es eine maximale Anzahl von Kunden, die durch den Einkaufsort bedient werden können. Diese Bedingungen werden als weiche Randsummenbedingungen bezeichnet. Die Zielwahl wird von der Erreichbarkeit der Orte und von den Unter- und Obergrenzen beeinflusst. Weiche Randsummenbedingungen sind für Versorgungsstandorte, Krankenhäuser, Freizeiteinrichtungen mit begrenzter Kapazität sinnvoll.

- Bei Aktivitätenorten, die nicht bestimmten Personen zugeordnet sind und für die es keine oberen oder unteren Nutzungsgrenzen gibt, wird die Zielwahl dann nur von der Erreichbarkeit und der Attraktivität der Orte beeinflusst. Hier sind auf der Seite des Aktivitätenortes keine besonderen Randsummen einzuhalten. Man spricht deshalb von offenen Randsummenbedingungen. Sie eignen sich beispielsweise für Freizeitaktivitäten im Grünen.
- Bei Aktivitätenketten, die Pflichtaktivitäten mit festem Ort und Aktivitäten mit freier Ortswahl umfassen, wird die Wahl des freien Ortes von der Lage des Wohn- und Pflichtaktivitätenorts dominiert. Verkehrsteilnehmer bevorzugen Orte, die zwischen Wohnort und Pflichtaktivitätenort liegen.

Häufig stehen den Verkehrsteilnehmern mehrere Verkehrsmodi zur Verfügung, mit denen das Ziel erreicht werden kann. Deshalb sollte der Aufwand zum Erreichen eines Zieles nicht nur die Angebotsqualität eines Verkehrsmodus berücksichtigen. Ein Ziel ist dann umso besser erreichbar und hat damit einen hohen Nutzen, wenn es mit mehreren Modi erreicht werden kann. Hierfür eignet sich das Konzept der Logsums. Dabei wird in einem ersten Schritt die Moduswahl mit einem Logit-Modell berechnet (siehe Kapitel 5.2.4). Die Summe des Nutzens über alle Verkehrsmittel wird dann logarithmiert und geht so als Aufwand in die Zielwahl ein. Diese Kombination von Ziel- und Moduswahl wird als gekoppeltes Modell bezeichnet. Eine Kombination von Ziel- und Moduswahl lässt sich auch durch die Vorgabe einer weiteren harten Randbedingung erreichen. Diese harte Randbedingung fordert, dass der Anteil jedes Modus im gesamten Untersuchungsraum dem beobachteten Anteil entsprechen muss. Lohse [75] erweitert hierfür das bilineare Gleichungssystem der Zielwahl auf trilineares Gleichungssystem. In diesem Fall spricht man von einem simultanen Modell (siehe auch [59] und [24]).

Zielwahl

- Zahl der Ortsveränderungen in Gruppe g von der Quellzelle o in die Zielzelle d

$$d_{god} = d_{go}^p \frac{d_{gd}^a \cdot \exp(v_{god})}{\sum_{d \in Z} d_{gd}^a \cdot \exp(v_{god})}$$

- Nutzenfunktion bei sequenziellem Ansatz

$$v_{god} = \sum_k \beta_{kg}^d \cdot x_{kod}$$

- Nutzenfunktion bei gekoppeltem Ansatz mit Logsums

$$v_{god} = \beta_g^d \cdot \ln \left(\sum_{m \in M} \exp(v_{godm}) \right)$$

Parameter

g	Nachfragegruppe
β_{kg}^d	Parameter der Aufwandsempfindlichkeit der Gruppe g bei der Zielwahl für die k. Kenngrösse der Angebotsqualität • abhängig von: Nachfragegruppe • Datenquelle Analyse: Parameterschätzungen mit beobachteten Reisezeit- und Reiseweitenverteilungen • Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse

Variablen

d_{go}^p und d_{go}^a	Produzierte und angezogene Ortsveränderungen. Ergebnisse der Verkehrszeugung
x_{kod}	Wert der Kenngrösse k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Zellen o und d • typische Kenngrössen: mittlere Zeit über alle Modi, Entfernung • abhängig von: Verkehrsangebot • Datenquelle Analyse: Netzmodell Analysezustand • Datenquelle Prognose: Netzmodell Prognosezustand
v_{godm}	Nutzen des Modus m (siehe Abb. 38). Bei Modellen mit gekoppelter Ziel- und Moduswahl erfolgt die Kopplung dadurch, dass anstelle von x_{kod} die logarithmierte Nutzensumme (Logsums) über alle Modi herangezogen wird.

Abb. 36 Grundstruktur eines Zielwahlmodells basierend auf einem quellseitig gekoppelten Entscheidungsmodell vom Typ Logit.

Zielwahlmodelle können die Realität nur vereinfacht abbilden. Gewachsene Strukturen können für Arbeitswege durch die Einbeziehung einer Pendlermatrix in die Nutzenfunktion berücksichtigt werden. Dazu wird die Nutzenfunktion für jede Relation um eine relations-spezifische Konstante β_{od} erweitert. Sie ergibt sich aus dem Quotienten des beobachteten Anteils $p_{\text{Soll},od}$ und dem modellierten Anteil $p_{\text{Ist},od}$ über folgenden Ansatz:

$$p_{Ist,od} = \frac{\exp(v_{od})}{\sum_{o,d} \exp(v_{od})}$$

$$p_{Ist,od}^* = \frac{\exp\left(v_{od} + \ln\left(\frac{p_{Soll,od}}{p_{Ist,od}}\right)\right)}{\sum_{o,d} \exp\left(v_{od} + \ln\left(\frac{p_{Soll,od}}{p_{Ist,od}}\right)\right)} = \frac{\exp(v_{od} + \beta_{od})}{\sum_{o,d} \exp(v_{od} + \beta_{od})}$$

$$\beta_{od} = \ln\left(\frac{p_{Soll,od}}{p_{Ist,od}}\right)$$

mit

$p_{Ist,od}$	Anteil der Nachfrage, der im Zielwahlmodell auf die Relation von Zelle o nach Zelle d entfällt. Der Anteil ergibt sich aus dem Nutzen V_{od} der Relation.
$p_{Soll,od}$	Anteil der Nachfrage, der in der empirischen Nachfragematrix (z.B. Pendlermatrix) auf die Relation von Zelle o nach Zelle d entfällt.
β_{od}	Relationsspezifische Konstante
$p_{Ist,od}^*$	Korrigierter Anteil der Nachfrage, der im Zielwahlmodell auf die Relation von Zelle o nach Zelle d entfällt. Durch die relationsspezifische Konstante wird sichergestellt, dass $p_{Ist,od}^* = p_{Soll,od}$

Die relationsspezifische Konstante repräsentiert die gewachsenen Strukturen. Wird diese Konstante in die Modellprognose übernommen, wird angenommen, dass die gewachsenen Strukturen auch die zukünftige Zielwahl beeinflussen. Bei der Modellprognose muss entschieden werden, ob die Konstante beibehalten wird.

Hinweise und Empfehlungen zu Zielwahlmodellen

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 - wie oben beschrieben - für Arbeitswege durch die Einbeziehung der 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.
- Harte Randsummenbedingungen erfordern eine sorgfältige Überprüfung der Strukturdaten, da die Strukturdaten einen grossen Einfluss auf die Zielwahl haben. Im Prognosefall muss für jede Strukturgrösse geprüft werden, ob eine Änderung der Einwohnerzahl eine Änderung bei den Strukturgrössen (z.B. Schulplätze) erfordert.

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 die verfügbaren Arbeits- und Ausbildungsorte am Zielort berücksichtigen. Hierfür eignen sich Modelle mit harten Randsummenbedingungen.
- Der Aufwand muss mindestens die Reisezeit berücksichtigen. Bei sequenziellen Modellen sollte die mittlere Reisezeit der modellierten Modi, gewichtet mit den relationsspezifischen Modal Split Anteilen herangezogen werden.
- Modelle mit simultaner oder gekoppelter Ziel- und Moduswahl sind einfachen Zielwahlmodellen vorzuziehen, da so der Aufwand aller Verkehrsmodi (Reisezeit PW, ÖV, usw.) berücksichtigt werden kann.

Abb. 37 Hinweise und Empfehlungen zu Zielwahlmodellen.

5.2.4 Verkehrsmoduswahl

Ein Modus umfasst die Menge der Verkehrsmittel, die ein Verkehrsteilnehmer für eine Ortsveränderung benötigt. Ein Moduswahlmodell verteilt die Verkehrsnachfrage einer Relation auf die verfügbaren Modi (z.B. Fuss, Velo, ÖV, PW). Bei Modi, die mehrere Verkehrsmittel umfassen, erfolgt die Aufteilung auf einzelne Verkehrsmittel (z.B. Bus und Bahn) in einem eigenen Schritt. Diese Aufteilung, die man als Verkehrsmittelwahl oder als Sub-Mode Choice bezeichnen kann, erfolgt häufig bei der Routenwahl. Hier wird festgelegt, welcher Anteil eines Weges auf ein Verkehrsmittel entfällt.

Die Moduswahl wird von Eigenschaften des Verkehrsteilnehmers, des Modus und der Ortsveränderung beeinflusst, die auf geeignete Weise in das Verkehrsnachfragemodell integriert werden müssen:

Eigenschaften des Verkehrsteilnehmers:

- Lage des Wohnorts:
Die Lage des Wohnorts kann die Notwendigkeit des PW-Besitzes beeinflussen. An Orten mit schlechter ÖV-Qualität kann der Motorisierungsgrad höher sein. Diese Eigenschaft kann durch ein vorgeschaltetes Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell abgebildet werden oder vereinfacht durch ein zellenspezifisches Attribut, das die ÖV-Qualitätsstufe beschreibt.
- PW-Verfügbarkeit, Führerscheinbesitz und ÖV-Abobesitz:
Diese Eigenschaften können über Personengruppen oder über Verkehrszellenattribute (Anteil der Personen mit PW-Verfügbarkeit bzw. ÖV-Abo) abgebildet werden.
- Haushaltsstruktur:
Eigenschaften der Haushaltsstruktur (z.B. PW-Verfügbarkeit) können nur sehr vereinfacht über Personengruppen abgebildet werden.

Eigenschaften der Verkehrsmittel des Modus:

- Zeitaufwand (Zu- und Abgangszeit, Wartezeiten, Fahrzeiten) und Umsteigehäufigkeiten:
Diese Eigenschaften können direkt mit einem Verkehrsnachfragemodell berechnet und in die Nutzenfunktion integriert werden.
- Kosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Strassen- und Parkplatznutzungsgebühren):
Kosten, die nicht entfernungsabhängig sind, erfordern ein Kostenberechnungsmodell. Die damit ermittelten Kosten können dann in die Nutzenfunktion integriert werden. Parkplatznutzungsgebühren hängen von der Parkdauer ab und müssen deshalb nach Wegezweck differenziert werden.
- Zeitliche Verfügbarkeit (Bedienungshäufigkeit):
Aus der Bedienungshäufigkeit kann eine fiktive Wartezeit am Startort und eine Startwartezeit an der Starthaltestelle abgeleitet und in die Nutzenfunktion integriert werden. Die fiktive Wartezeit beschreibt die Zeitdifferenz zwischen der Wunschabfahrtszeit des Fahrgastes und der angebotenen Abfahrtszeit. Sie kann als Anpassungszeit bezeichnet werden. Die Startwartezeit beschreibt den Zeitpuffer, den ein Fahrgast für die Ankunft an der Haltestelle einplant.
- Parkplatzverfügbarkeit:
Die Parkplatzverfügbarkeit kann über ein Verkehrszellenattribut abgebildet werden.
- Komfort, Bequemlichkeit, Sicherheit:
Diese Eigenschaften werden üblicherweise nicht explizit modelliert und gehen nur über eine modusspezifische Konstante in die Nutzenfunktion ein.
- Regelmässigkeit und Zuverlässigkeit:
Regelmässigkeit und Zuverlässigkeit werden in Modellen bisher nicht abgebildet. Sie gehen im PW-Verkehr indirekt durch die Fahrtzeit im belasteten Netz ein, die auf Relationen mit hoher Auslastung (= geringere Zuverlässigkeit) stärker steigt als auf Relationen mit geringer Zuverlässigkeit. Im ÖV wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge nach Fahrplan verkehren.

Eigenschaften der Ortsveränderungen:

- Wegezweck, da man bei regelmässigen Wegezwecken bessere Kenntnisse über das Verkehrsangebot hat,
- Zeitpunkt der Fahrt, da z.B. in den Abendstunden das ÖV-Angebot schlechter sein kann.

Verkehrsmoduswahl

- Zahl der Ortsveränderungen in Gruppe g von der Quellzelle o in die Zielzelle d mit dem Verkehrsmodus m

$$d_{godm} = d_{god} \cdot \frac{\exp(v_{godm})}{\sum_{m \in M} \exp(v_{godm})}$$

- Nutzenfunktion

$$v_{godm} = \beta_{0mg}^m + \sum_k \beta_{kmg}^m \cdot x_{kodm}$$

Parameter

g	Nachfragegruppe
β_{0mg}^m (modusspezifische Konstante)	Parameter der Aufwandsempfindlichkeit der Gruppe g bei der Moduswahl für die k . Kenngrösse der Angebotsqualität. • abhängig von: Nachfragegruppe und Modus
β_{kmg}^m	• Datenquelle Analyse: Parameterschätzungen mit beobachteten Verkehrsmoduswahlentscheidungen • Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse

Variablen

d_{god}	Zahl der Ortsveränderungen von o nach d . Ergebnisse der Verkehrszeugung
x_{kodm}	Wert der Kenngrösse k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Zellen o und d mit dem Modus m • typische Kenngrössen: Fahrtzeit, Zu- und Abgangszeit, Wartezeiten, Umsteigehäufigkeit, Kosten • abhängig von: Verkehrsangebot • Datenquelle Analyse: Netzmodell Analysezustand • Datenquelle Prognose: Netzmodell Prognosezustand

Abb. 38 Grundstruktur eines Moduswahlmodells basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit.

Hinweise und Empfehlungen zu Moduswahlmodellen

Allgemein

Hinweise

- Entfernungsabhängige Verkehrsmiteileignung: 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 $\ln(\text{Luftlinienweite in Kilometer})$.
- Besetzungsgrad: Der Besetzungsgrad kann durch einen eigenständigen Modus PW-Mitfahrer abgebildet 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.

Modellparameter

- 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, aus Stated-Preference-Befragungen oder mit den Daten des Mikrozensus MZMV geschätzt werden.
- Bewertung der Kosten: Die Bewertung der Kosten hängt von der Kostenart und der Reiseweite ab [2].

Modellart 1 (städtische / regionale Modelle)

Empfehlungen

- Attribute der Nutzenfunktion: Fahrzeit im Verkehrsmittel, Zu- und Abgangszeit, Umsteigewartezeit, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit, Umsteigehäufigkeit.
- Verkehrsmittelverfügbarkeit: Verfügbarkeit von ÖV-Abonnement und PW als Teil der Nutzenfunktion oder über Personengruppen.

Optional

- Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Strassen- und Parkplatznutzungsgebühren), Parksuchzeit.

Modellart 2 (grossräumige / nationale Modelle)

Empfehlungen

- Attribute der Nutzenfunktion: Reisezeit, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit, Umsteigehäufigkeit.
- Verkehrsmittelverfügbarkeit: Verfügbarkeit von ÖV-Abonnement und PW als Teil der Nutzenfunktion oder über Personengruppen.

Optional

- Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Strassen- und Parkplatznutzungsgebühren), Parksuchzeit, Zu- und Abgangszeit.

Abb. 39 Hinweise und Empfehlungen zur Verkehrsmoduswahl.

5.2.5 Umlegung, Routenwahl und Verbindungswahl

Umlegungsmodelle bilden die Routenwahl bzw. die Verbindungswahl der Verkehrsteilnehmer ab und ermitteln so Verkehrsstärken im Netz. Bei einer statischen Umlegung wird die Nachfrage auf eine Menge von räumlich unterschiedlicher Routen verteilt, deren Eigenschaften sich im Betrachtungszeitraum nicht ändern. Bei einer dynamischen Umlegung wird die Nachfrage auf Verbindungen verteilt. Eine Verbindung entspricht einer Zeit-Weg-Trajektorie entlang einer Route. Grundlage einer Umlegung ist das Verkehrsangebot und eine Nachfragematrix. Die Umlegung umfasst die folgenden Teilschritte:

- Routen- oder Verbindungssuche:
In diesem Teilschritt wird die Menge der Routen oder Verbindungen generiert, aus denen die Verkehrsteilnehmer wählen können. Die Eigenschaften jeder Alternative wird durch Kenngrößen (Zeiten, Entfernungen, Umsteigehäufigkeiten, Kosten) beschrieben.
- Routen- oder Verbindungswahl:
In diesem Teilschritt wird die Verkehrsnachfrage auf die verfügbaren Routen oder Verbindungen verteilt. Dabei werden die Eigenschaften der Alternativen berücksichtigt, die zu einem Nutzenwert bzw. einem Widerstandswert zusammengefasst werden.

- **Netzbelastung:**
In diesem Teilschritt wird aus der Nachfrage einer Route oder Verbindung die Verkehrsstärke im Netz ermittelt. Bei einer dynamischen Umlegung wird die zeitabhängige Verkehrsstärke für jedes Netzelement entlang der Zeit-Weg-Trajektorie jeder Verbindung abgetragen. Hierzu kann im IV ein Verkehrsflussmodell eingesetzt werden.
- **Ermittlung der Widerstände der Netzelemente:**
In diesem Teilschritt wird aus der Verkehrsstärke und der Kapazität für jedes Netzelement und in dynamischen Modellen für jedes Zeitintervall eine Auslastung oder eine Verkehrsdichte ermittelt. Im IV ergibt sich aus der Auslastung bzw. der Verkehrsdichte eine Fahrtzeit im belasteten Netz. Im ÖV reduziert eine hohe Auslastung den Komfort (Sitzplatzverfügbarkeit) oder die Nutzbarkeit einer Alternative.
- **Prüfung einer Abbruchbedingung:**
Die Auslastungen der Netzelemente ändern den Nutzen bzw. den Widerstand einer Alternative, was wiederum die Wahlentscheidungen beeinflusst. Um diese Wechselwirkungen zu berücksichtigen, werden in Umlegungsmodellen Rückkopplungen in Form von Iterationen durchgeführt. In diesem Teilschritt wird geprüft, ob vorgegebene Abbruchbedingungen eingehalten werden. Die Abbruchbedingung eines Umlegungsverfahrens kann eine feste vorgegebene Zahl an Iterationen oder im Falle einer Gleichgewichtsumlegung ein zu erreichendes Konvergenzniveau sein.

Da sich IV und ÖV in ihrer Charakteristik zum Teil deutlich unterscheiden, kommen unterschiedliche Umlegungsmodelle zum Einsatz.

Umlegung im IV

Umlegungsmodelle

Umlegungsmodelle unterstellen, dass die Verkehrsteilnehmer aufgrund ihrer Erfahrungen über die zu erwartende Verkehrslage im Netz informiert sind und ihre Routenwahl so anpassen, dass sich das System in einem Gleichgewichtszustand befindet. In diesem Zustand wechseln die Verkehrsteilnehmer ihre Routen nicht mehr und die Fahrzeiten bleiben konstant. Für den Gleichgewichtszustand existieren zwei Hypothesen, die zu unterschiedlichen Modellen führen:

- **Deterministisches Nutzergleichgewicht:**
Das deterministische Nutzergleichgewicht (Deterministic User Equilibrium DUE) unterstellt, dass alle Verkehrsteilnehmer die gleiche perfekte Information über den Widerstand im Strassennetz haben. Das führt zu einem Zustand, bei dem sich die Verkehrsteilnehmer so auf die Routen verteilen, dass der Widerstand auf allen alternativen Routen gleich ist und jeder Wechsel auf eine andere Route den persönlichen Widerstand erhöhen würde [85]. Für alle benutzten alternativen Routen R (Verkehrsstärke $q > 0$) muss also folgende Bedingung für den Widerstand w erfüllt sein:

$$\frac{w_i}{w_r} = 1, \forall i, r = 1 \dots R \text{ und } q_i > 0 \text{ bzw. } q_r > 0$$

- **Stochastisches Nutzergleichgewicht:**
Das stochastische Nutzergleichgewicht (Stochastic User Equilibrium SUE) geht davon aus, dass die Verkehrsteilnehmer über keine vollständigen Informationen verfügen und ihre subjektive empfundene Fahrdauer optimieren. Beim stochastischen Nutzergleichgewicht wird die Nachfrage abhängig vom Widerstand der Routen mit einem ökonomischen Entscheidungsmodell (siehe Kapitel 5.2.1) auf die Alternativen verteilt. In diesem Fall ist bei der Aufteilung die Ähnlichkeit bzw. die Eigenständigkeit der Routen zu berücksichtigen, wenn sich die alternativen Routen einer Quelle-Ziel-Beziehung überlappen. Für das Logit-Modell ergibt sich so die folgende Form:

$$p_i = \frac{e^{\beta \cdot w_i} \cdot E_i}{\sum_{i \in R} (e^{\beta \cdot w_i} \cdot E_i)}$$

mit

p_i Anteil der Nachfrage auf Alternative i

W_i Widerstand der Alternative i

N Anzahl der Alternativen

E_i Eigenständigkeit der Alternative i , $0 \leq E_i \leq 1$ (siehe Abb. 40)

β Skalierungsparameter

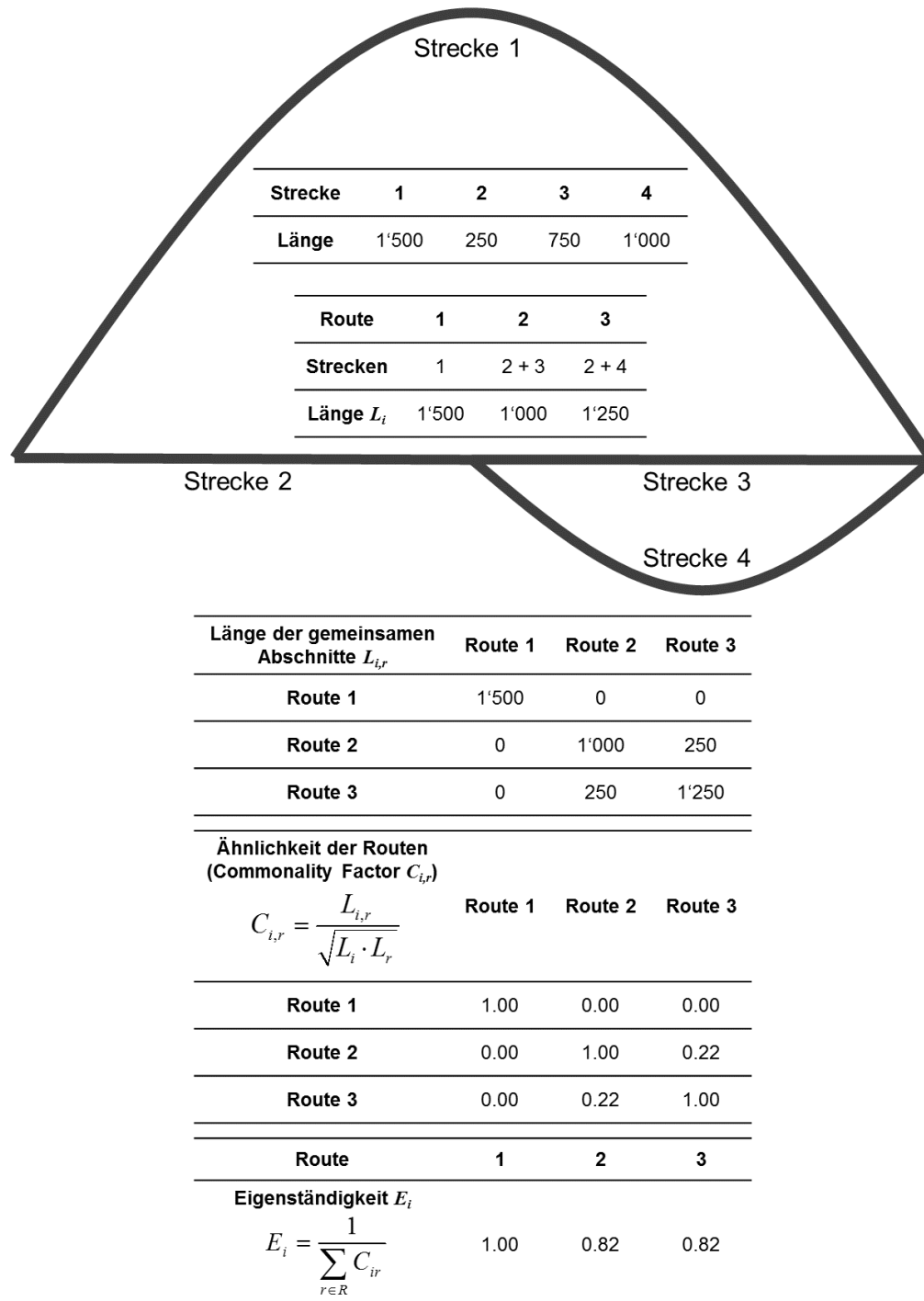
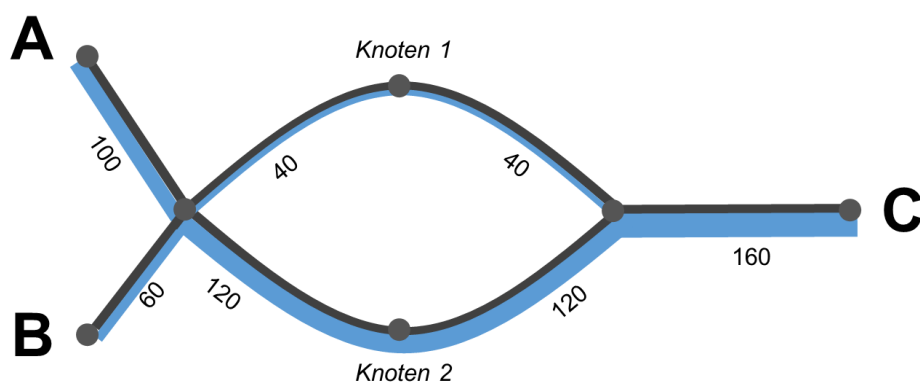


Abb. 40 Eigenständigkeit von Routenwahlalternativen.

Die Annahme perfekter Information im deterministischen Nutzergleichgewicht wird an einem konkreten Tag angesichts zufälliger Störungen im motorisierten Strassenverkehr nur eingeschränkt wirklichkeitsnah sein. Aufgrund seiner mathematischen Eigenschaften, bietet sich dieses Modell trotzdem für die Analyse und Bewertung konkurrierender Massnahmen im Rahmen der Strassennetzplanung an, da hier nicht ein konkreter Tag, sondern ein mittlerer Tag betrachtet wird. Stochastische Gleichgewichtsumlegungen können die Nachfrage in Teilräumen und in Zeit mit geringer Nachfrage besser verteilen, da hier für den deterministischen Ansatz häufig nur eine Route erforderlich ist. Sie können ausserdem die spezifische Informationsverfügbarkeit (z.B. bei einer Netzsteuerung) nachbilden.

Für Umlegungen im Veloverkehr sind stochastische Umlegungen besser geeignet als deterministische Umlegungen, da es kaum auslastungsabhängige Fahrzeiterhöhungen gibt und bei Velofahrern die individuelle Wahrnehmung von Sicherheit, Komfort und Anstrengung eine grosse Rolle spielt. Weitere Informationen finden sich z.B. im SVI-Forschungsauftrag 2014/001 «Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs» [42].

Die mit einer Umlegung ermittelten Verkehrsstärken sollten nicht nur auf der Ebene der Strecken mit beobachteten Verkehrsstärken übereinstimmen. Die Umlegung sollte auch plausible Routen und Routenbelastungen liefern. Eine gute Umlegung erfüllt das Kriterium proportionaler Routenbelastungen [11]. Dieses Kriterium fordert, dass die Nachfrage, die über eine Netzmasche abgewickelt wird, unabhängig von der Quelle und dem Ziel immer mit einem einheitlichen Verhältnis, d.h. proportional, auf die zwei alternativen Teilrouten der Netzmasche aufgeteilt wird (siehe Abb. 41).



Route Von – Nach – Über	Verkehrsstärke je Route			
	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung n
1. A – C über Knoten 1	25	40	0	...
2. A – C über Knoten 2	75	60	100	...
3. B – C über Knoten 1	15	0	40	...
4. B – C über Knoten 2	45	60	20	...
proportionale Routenbelastung	ja	nein	nein	nein

In der Netzmasche ergeben sich über Knoten 1 und Knoten 2 nur dann gleiche Fahrzeiten, wenn 40 Fahrzeuge (25%) über Knoten 1 und 120 Fahrzeuge (75%) über Knoten 2 fahren. Diese Aufteilung liefert die einzige Lösung auf Streckenebene, die die Bedingungen des deterministischen Nutzergleichgewichts erfüllt. Auf der Ebene der Routen gibt es aber (unendlich) viele Möglichkeiten, um die Nachfrage auf die vier Routen zu verteilen. Nur die Lösung 1 erfüllt die Anforderung nach proportionalen Routenbelastungen, da für jede Relation 25% der Nachfrage über Knoten 1 und 75% der Nachfrage über Knoten 2 abgewickelt werden. Damit ergibt sich eine eindeutige Lösung auf Routenebene.

Abb. 41 Beispiel für proportionale und nicht proportionale Routenbelastungen in einer Netzmasche.

Dynamische Umlegungsmodelle

Bei einer statischen Umlegung wird von einer konstanten Nachfrage und einem konstanten Verkehrsangebot innerhalb des Umlegungszeitraums ausgegangen. Dynamische Umlegungsverfahren betrachten zusätzlich eine Zeitachse. Auf diese Weise können tageszeitabhängige Änderungen der Nachfrage und des Angebots berücksichtigt werden. Hierbei wird die Fortbewegung der Verkehrsteilnehmer entlang einer Route nachvollzogen. Somit entsteht die Information, zu welchem Zeitpunkt wie viel Nachfrage auf welchem Netzelement auftritt. Damit ermöglichen dynamische Umlegungsverfahren eine genauere Abbildung von Überlastungen.

Im MIV sind dynamische Umlegungsmodelle bisher in praktischen Anwendungen noch die Ausnahme, da die Attribuierung des Netzmodells mit realistischen Kapazitäten aufwändig ist und fehlerhafte Kapazitäten die Routenwahl über mehrere Zeitintervalle beeinflussen können. Eine dynamische Umlegung ist im MIV immer dann erforderlich, wenn stündliche Verkehrsstärken in Fernverkehrsmodellen ermittelt werden sollen. Hier überlagern sich die Ganglinien der Fernverkehre mit langen Reisezeiten und die Ganglinien der Regionalverkehre mit relativ kurzen Reisezeiten.

In regionalen Verkehrsnachfragemodellen mit begrenzter räumlicher Ausdehnung, in denen die mittlere Reisezeit unter einer Stunde liegt, kann man bei einer Stundenumlegung vereinfacht annehmen, dass alle Fahrzeuge ihr Ziel innerhalb der betrachteten Stunde erreichen. Dann genügt eine quasi-dynamische Umlegung, bei der die Nachfrage für jedes Zeitintervall eines Tages unabhängig von der Verkehrsnachfrage im vorangegangenen Zeitintervall mit sequenziellen statischen Umlegungen im Netz verteilt wird.

Widerstandsfunktion

Für die Routenwahl werden alle entscheidungsrelevanten Kenngrößen in einer Widerstandsfunktion bzw. in einer Nutzenfunktion zusammengefasst. Eine Funktion, die die Komponenten Zeit, Länge, Kosten und Steigung umfasst kann dann folgende Form haben:

$$w_{s,g}(q) = \beta_g^s(s) \cdot \beta_{STyp,g}^t \cdot t_{s,g}(q) + \beta_g^c \cdot c_{s,g} + \beta_g^l \cdot l_s$$

mit

g	Gruppe von Fahrzeugen mit besonderen Eigenschaften im Hinblick auf die Fahrzeugeigenschaften (z.B. PW und LW) oder im Hinblick auf die Nutzereigenschaften (privater Personenverkehr, Wirtschaftspersonenverkehr)
$w_{s,g}(q)$	Widerstand für Strecke s für Fahrzeuge der Gruppe g bei Verkehrsstärke q
$t_{s,g}(q)$	Fahrzeit für Strecke s für Fahrzeuge der Gruppe g bei Verkehrsstärke q . Die Fahrtzeit kann bei den Gruppen PW und LW unterschiedlich sein.
$c_{s,g}$	Kosten für die Nutzung der Strecke s für Fahrzeuge der Gruppe g , z.B. Straßenbenutzungsgebühren
l_s	Länge der Strecke s
$\beta_g^s(s)$	fahrzeuggruppenspezifischer und steigungsspezifischer Parameter für die Steigung s
$\beta_{STyp,g}^t$	nutzergruppen- und streckentypspezifischer Parameter für die Zeit t
β_g^c	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Kosten c
β_g^l	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Länge l

Der streckentypspezifische Parameter Zeit ermöglicht es spezielle Streckentypen zu bevorzugen. Das ist insbesondere bei hochrangigen Strassen (Autobahnen) sinnvoll, da

diese Strassen durch eine gute Beschilderung den nicht ortskundigen Fahrern oft als einzige Alternative bekannt sind oder da diese Strassen besonders gut für LW geeignet sind.

Nachstehende Tabelle zeigt Wertebereiche für die Parameter. Die Parameter können im Rahmen der Kalibrierung so angepasst werden, dass die Umlegungsergebnisse möglichst

gut mit den Zählwerten übereinstimmen. Eine Erhöhung des Wertes von β^l führt zu einer Bevorzugung von direkten Routen.

Parameter	Wertebereich PW	Wertebereich LW
$\beta_{STyp,g}^t$ [1/s]		
• Städtische Nebenstrassen	1.1 bis 1.3	1.1 bis 1.5
• Städtische Hauptverkehrsstrassen	0.9 bis 1.0	0.9 bis 1.0
• Regionale Strassen	1.0 bis 1.1	1.0 bis 1.1
• Überregionale Strassen	0.8 bis 1.0	0.8 bis 1.0
• Autobahnen	0.7 bis 0.9	0.6 bis 0.9
$\beta_g^s(s)$ [-]	≈ 1.0	≈ 1.0 für $ s < 4\%$ > 1.0 für $ s > 4\%$
β_g^l [1/m]	0.01 bis 0.03	0.01 bis 0.03
β_g^c [1/CHF]	300 bis 112 (entspricht 12 bis 32 CHF/h)	1090 bis 131 (entspricht 3.3 bis 27.4 CHF/h)

Quellen für β_g^c siehe z.B. [54; 53; 84; 83]

Abb. 42 Wertebereich für die Parameter einer Widerstandsfunktion für PW und LW.

Fahrtzeiten und Kapazitäten

Die Fahrtzeiten im motorisierten Strassenverkehr werden in der Verkehrsumlegung durch auslastungsabhängige Fahrtzeitfunktionen beschrieben, die als Capacity-Restraint-Funktion (CR-Funktion⁹) bezeichnet werden. Bei freiem Verkehrsfluss ergibt sich die Fahrtzeit t_s^{free} für eine Strecke s aus der Streckenlänge und der Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss v_s^{free} . Für Abbiegebeziehungen an einem Knotenpunkt n wird die Abbiegezeit t_n^{free} direkt angegeben. Sie hängt von der Art der Knotensteuerung ab und wird in der Verkehrstechnik als Grundwartezeit bezeichnet. Im belasteten Netz ergeben sich die Streckenfahrzeit und die Abbiegezeit mit der gewählten CR-Funktion aus der aktuellen Verkehrsstärke q und der Kapazität q^{max} . Bei Strecken wird die Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss mit einem auslastungsabhängigen Faktor erhöht. Bei Abbiegevorgängen an Knoten, wird die Grundwartezeit um einen absoluten Wert erhöht, da die Wartezeit an einem Knoten nicht von der Grundwartezeit abhängt. Die CR-Funktion entspricht dann einem deterministischen Warteschlangenmodell, bei dem nach Erreichen der Kapazität jedes zusätzliche Fahrzeug die Fahrtzeit erhöht. Es ergeben sich so zwei Ausprägungen für die Fahrzeitermittlung:

⁹ Auch wenn Capacity Restraint ein englischer Begriff ist, wird in englischsprachigen Ländern von volume-delay functions (VDF) gesprochen.

Fahrtzeit für eine Strecke s :

$$t_s(q) = t_s^{free} \cdot CR\left(\frac{q_s}{q_s^{max}}\right)$$

Fahrtzeit für einen Knotenabbieger n : $t_n(q) = t_n^{free} + CR\left(\frac{q_n}{q_n^{max}}\right)$

Es gibt zahlreiche Ausprägungen der CR-Funktion. Die wohl gängigste Variante für Strecken ist die sogenannte BPR-Funktion aus dem Traffic Assignment Manual des U.S.-amerikanischen Bureau of Public Roads (1964):

$$t_s(q) = t_s^{free} \cdot \left(1 + \beta_1 \left(\frac{q_s}{q_s^{max}}\right)^{\beta_2}\right)$$

mit

t_s^{free} Fahrzeit auf Strecke s bei freiem Verkehrsfluss

$t_s(q)$ Fahrzeit auf Strecke s bei Verkehrsstärke q

β_1 Funktionsparameter $\beta_1 \in [0; \infty)$, üblicherweise gilt $0.1 \leq \beta_1 \leq 1.0$

β_2 Funktionsparameter $\beta_2 \in [0; \infty)$, üblicherweise gilt $2.0 \leq \beta_2 \leq 8.0$

CR-Funktionen benötigen für jedes Netzelement die Angabe einer Kapazität. Bei einer Stundenumlegung können die Kapazitätswerte für Strecken und Knotenströme aus den Schweizer Normen (z.B. [55; 56; 58; 57]) oder dem Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS, [29]) abgeleitet werden. Bei einer statischen Umlegung über einen längeren Zeitraum wird angenommen, dass sich die Nachfrage gleichmässig auf den Zeitraum verteilt. Deshalb müssen Schwankungen der Nachfrage über eine Anpassung der Kapazität abgebildet werden. Je nach Ausprägung der Nachfrageganglinie liegen die Hochrechnungsfaktoren von der Stundenkapazität auf die Tageskapazität in folgenden Bereichen:

- Strecken mit gering ausgeprägter Spitze: 12.0 bis 14.0
- Strecken mit mittel ausgeprägter Spitze: 10.0 bis 12.0
- Strecken mit stark ausgeprägter Spitze: 8.0 bis 10.0

Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den IV

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 (siehe Kapitel 0).
- 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 [29] entspricht (80.-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 β -Parametern die Art der CR-Funktion und die Kapazität.
- Parameter der CR-Funktion: Anpassung über beobachtete Fahrtzeiten.
- Parameter für die Kosten, z.B. [2].

Empfehlungen

- Umlegungsmodelle Kfz: Deterministisches oder stochastisches Nutzergleichgewicht, keine Sukzessivumlegung.
- Umlegungsmodelle Velo: Stochastische Umlegung.
- Konvergenz beim deterministischen Nutzergleichgewicht: Relative 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.

Abb. 43 Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den IV.

Umlegung im ÖV

Umlegungsmodelle

Für die Modellierung von Ortsveränderungen mit dem ÖV gibt es drei Modellklassen. Sie unterscheiden sich durch die erforderlichen Eingangsdaten, die Modellannahmen und die Genauigkeit der Ergebnisse:

- **Streckenbasierte Modelle:**
Streckenbasierte Modelle sind ÖV-spezifische Bestwegumlegungen, bei der die gesamte Nachfrage einer Route zugeordnet wird. Diese Verfahren erfordert kein Liniennetz mit einem Fahrplan, es genügen Fahrtzeiten auf Strecken und Umsteigewiderstände bei Übergängen zwischen Strasse und Schiene.

Streckenbasierte Modelle ermöglichen Fahrzeitabschätzungen. Umsteigehäufigkeiten und Umsteigewartezeiten sowie Bedienungshäufigkeiten können nicht berechnet werden. Die Modelle bilden die Routenwahl nicht realistisch ab. Sie geben einen Überblick über die Struktur der Verkehrsnachfrage und eignen sich im Rahmen einer Grobplanung zur Ermittlung eines „Wunschliniennetzes“, bei dem die Fahrgäste ohne Beschränkungen durch Linienwege und Fahrpläne die für sie schnellste Route im Netz wählen.

- **Taktbasierte Modelle:**
Taktbasierte Modelle ermitteln die Umsteigewartezeit beim Linienwechsel aus der mittleren Fahrzeugfolgezeit der Folgelinie. Bei Bedarf können Koordinierungen sowohl beim Umstieg zwischen Linien als auch zwischen den Fahrplänen mehrerer Linien auf gemeinsam bedienten Abschnitten berücksichtigt werden.
Taktbasierte Modelle eignen sich für städtische Netze mit kurzen Fahrzeugfolgezeiten, in denen die Koordinierung des Fahrplans nicht berücksichtigt werden muss. Sie sind auch für konzeptuelle Planungen mit langem Vorlauf sinnvoll, bei denen der exakte Fahrplan noch unbekannt ist.
- **Fahrplanbasierte Modelle:**
Fahrplanbasierte Modelle berücksichtigen den genauen Fahrplan des Untersuchungszeitraums und ermitteln für jeden Umstieg die exakte Umsteigewartezeit.
Fahrplanbasierte Modelle eignen sich für städtische, regionale und grossräumige Modelle. Sie müssen immer dann angewendet werden, wenn das ÖV-Angebot grosse Fahrzeugfolgezeiten aufweist und die Koordinierung des Fahrplans für Umsteigevorgänge wichtig ist. Der Einsatz fahrplanbasierter Modelle führt in der Prognose zu Schwierigkeiten, wenn für den Prognosezeitpunkt keine koordinierten Fahrpläne, sondern nur Takte vorliegen. Um in diesem Fall fahrplanbasierte Modelle trotzdem nutzen zu können, kann der Parameter für die Bewertung der Umsteigewartezeit auf 0 gesetzt und der Parameter für die Bewertung der Umsteigehäufigkeit erhöht werden.

Ergebnis der strecken- und taktbasierten Umlegungsmodelle sind Routen mit Verkehrsstärken. Fahrplanbasierte Modelle ermitteln dagegen Verbindungen, d.h. sie enthalten zusätzliche Informationen über den Abfahrtszeitpunkt.

Tab. 6 Eigenschaften von Umlegungsmodellen für den ÖV.

	Streckenbasiert	Taktbasiert	Fahrplanbasiert
Input	Fahrtzeiten auf Strecken	Linienwege Fahrtzeiten Takte	Linienwege Fahrtzeiten Fahrplanfahrten
Umsteigewartezeit	-	abhängig vom Takt	aus Fahrplan
Routenwahl	kürzester Weg	Menge kürzester Wege für jede mögliche Kombination von Abfahrtszeiten	Aufteilung mit einem diskreten Entscheidungsmodell
Zeitachse	nein	nein	ja
Output pro Relation	eine Route Reisezeit	≥ 1 Route Reisezeit Umsteigezeit Umsteigehäufigkeit Bedienungshäufigkeit	≥ 1 Verbindung Reisezeit Umsteigezeit Umsteigehäufigkeit Bedienungshäufigkeit Anpassungszeit

Dynamische Umlegungsmodelle

Fahrplanbasierte Umlegungsmodelle fallen in die Klasse der dynamischen Umlegungen. Sie sind Stand der Technik und eignen sich für die Ermittlung tageszeitabhängiger Verkehrsstärken und Auslastungen. Die Ergebnisqualität wird massgeblich von der zeitlichen Aufteilung der Nachfrage beeinflusst.

Widerstandsfunktion

Für die Routen- bzw. Verbindungswahl werden alle entscheidungsrelevanten Kenngrößen in einer Widerstandsfunktion bzw. in einer Nutzenfunktion zusammengefasst. Eine Funktion, die die Komponenten Zeitaufwand, Umsteigehäufigkeit, Kosten und zeitliche Nutzbarkeit umfasst kann dann folgende Form haben:

$$w_{r,g} = \beta_g^{ERZ} \cdot t_{r,g}^{ERZ} + \beta_g^c \cdot c_{r,g} + \overbrace{\beta_g^{früh} \cdot \Delta t_r^{früh} + \beta_g^{spät} \cdot \Delta t_r^{spät}}^{\text{nur bei fahrplanbasierten Modellen}}$$

$$t_{r,g}^{ERZ} = \beta_g^{FZ} \cdot t_r^{FZ} + \beta_g^{ZAZ} \cdot t_r^{ZAZ} + \beta_g^{UWZ} \cdot t_r^{UWZ} + \beta_g^{UH} \cdot n_r^{UH}$$

mit

g	Gruppe von Nutzern mit ähnlichen Eigenschaften (Wegezzweck, Personen- gruppe)
$w_{r,g}$	Widerstand für die Route / Verbindung r für Nutzer der Gruppe g
t_r^{ERZ}	Empfundene Reisezeit für die Route / Verbindung r für Nutzer der Gruppe g
t_r^{FZ}	Fahrtzeit im Fahrzeug für die Route / Verbindung r
t_r^{ZAZ}	Zu- und Abgangszeit für die Route / Verbindung r
t_r^{UWZ}	Umsteigewartezeit für die Route / Verbindung r
n_r^{UH}	Anzahl Umsteigevorgänge für die Route / Verbindung r
$c_{r,g}$	Kosten für die Nutzung der Route / Verbindung r für Nutzer der Gruppe g
$\Delta t_r^{früh}$	Zeitdifferenz zwischen angebotener Abfahrtszeit und Wunschabfahrtszeit für den Fall, dass die angebotene Abfahrtszeit vor der Wunschabfahrtszeit liegt
$\Delta t_r^{spät}$	Zeitdifferenz zwischen angebotener Abfahrtszeit und Wunschabfahrtszeit für den Fall, dass die angebotene Abfahrtszeit nach der Wunschabfahrtszeit liegt
β_g^{ERZ}	nutzergruppenspezifischer Parameter für die empfundene Fahrtzeit
β_g^{FZ}	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Fahrtzeit
β_g^{ZAZ}	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Zu- und Abgangszeit
β_g^{UWZ}	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Umsteigewartezeit
β_g^{UH}	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Umsteigehäufigkeit
$\beta_g^{früh}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für Abfahrten vor der Wunschabfahrts- zeit
$\beta_g^{spät}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für Abfahrten nach der Wunschab- fahrtszeit
β_g^c	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Kosten c

Fahrtzeiten und Kapazitäten

Die Fahrtzeiten im ÖV sind im Fahrplan niedergelegt. In den Modellen wird davon ausgegangen, dass die Fahrtzeiten eingehalten werden. Verspätungen werden nicht abgebildet. Umlegungsmodelle im ÖV können trotzdem, analog zu IV-Umlegungen, auslastungsabhängige Komponenten aufweisen, die die Platzverfügbarkeit berücksichtigen. Dazu wird die Widerstandsfunktion um eine auslastungsabhängige Komponente ergänzt, die die Auslastung jedes Fahrplanfahrabschnitts, d.h. jeder Fahrplanfahrt zwischen zwei Haltestellen auswertet:

$$w_{r,g} = \beta_g^{ERZ} \cdot t_{r,g}^{ERZ} + \beta_g^c \cdot c_{s,g} + \beta_g^{früh} \cdot \Delta t_r^{früh} + \beta_g^{spät} \cdot \Delta t_r^{spät} + \underbrace{\beta^{Ausl} \cdot w_r^{Ausl}}_{\text{Auslastungsabhängige Komponente}}$$

$$w_r^{Ausl} = \sum_{v \in V} \frac{q_v}{q_v^{max}} \cdot t_v^{FZ} \quad (\text{Beispiel für eine lineare Auslastungsfunktion})$$

mit

g Gruppe von Nutzern mit ähnlichen Eigenschaften (Wegezzweck, Personen-
gruppe)

w_r^{Ausl} Auslastungsabhängiger Widerstand für die Route / Verbindung r . Dieser Wi-
derstand ergibt sich aus der Auslastung aller Fahrplanfahrt-Abschnitte v der
Verbindung

q_v Verkehrsstärke eines Fahrplanfahrt-Abschnitts v

q_v^{Max} Platzkapazität eines Fahrplanfahrt-Abschnitts v

β^{Ausl} Parameter für die Auslastung

Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den ÖV

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.
- Bei taktbasierten Modellen sollte als Umlegungszeitraum ein Zeitraum des Tages mit weitgehend konstantem Angebot (z.B. die Spitzenstunde) gewählt werden.
- Bei fahrplanbasierten Modellen sollte für den Umlegungszeitraum ein Nachfrageganglinie hinterlegt. Dadurch wird bei der Kenngrössenberechnung die tageszeitabhängige Angebotsqualität mit der Nachfrage gewichtet.

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, z.B. [2].

Empfehlungen

- Umlegungsmodelle: Fahrplanbasiert, in städtischen Modellen auch taktbasiert.

Optional

- Auslastungsabhängige Umlegung.

Abb. 44 Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den ÖV.

5.2.6 Rückkopplungen zwischen den Modellstufen

Wie bereits im Kapitel 2.2.3 und 3.4 erläutert, sollte eine Rückkopplungen zwischen den Modellstufen vorgesehen werden. Mit dieser Rückkopplung lassen sich Aufwandsänderungen, die sich erst in späteren Modellstufen ergeben (i.d.R. in der Umlegung), in den vorgelegerten Entscheidungsprozessen berücksichtigen. Stand der Technik ist es, die Modellstufen Zielwahl, Verkehrsmoduswahl und Umlegung über eine Rückkopplung zu verknüpfen, so dass die in der Umlegung berechneten Reisezeiten in die Zielwahl und die Verkehrsmoduswahl eingehen. Gleichzeitig gibt es auch Ansätze, die die Modellstufen Zielwahl, Verkehrsmoduswahl und Umlegung in eine Modellstufe zu integrieren.

In mikroskopischen Nachfragemodellen, die Einzelpersonen als diskrete Objekte modellieren, kann die Rückkopplung durch die Nachbildung von Lernprozessen realisiert werden. Jedes Personenobjekt bekommt dazu ein „Gedächtnis“, in dem Erfahrungen (insbesondere Reisezeiten) aus vorangegangenen Tagen gespeichert werden und bei späteren Entscheidungen als Erfahrungswerte mit einfließen.

Bei einer Rückkopplung der Modellstufen Zielwahl, Verkehrsmoduswahl und Umlegung werden die Modellstufen iterativ solange durchgeführt, bis sich im System ein Gleichgewichtszustand einstellt. Das ist dann der Fall, wenn sich die Struktur der Verkehrsnachfrage oder die Reisezeitmatrix zwischen zwei Iterationsschritten n und $n - 1$ nicht mehr ändert. In der Praxis müssen dafür Grenzwerte ε definiert werden. Diese Grenzwerte müssen entweder auf Ebene einzelner Netzelemente (Verkehrsstärken auf Strecken), auf der Ebene einzelner Relationen (Wege oder Reisezeiten zwischen Verkehrszellen) oder auf der Ebene des gesamten Netzes eingehalten werden.

Grenzwerte auf der Ebene von Netzelemente und Relationen

Üblich sind Grenzwerte für die absolute und die relative Abweichung, die mit einer ODER-Bedingung verknüpft werden.

- absolute Abweichung $|x_n - x_{n-1}| < \varepsilon_a$ ODER
- relative Abweichung $\left| 1 - \frac{x_n}{x_{n-1}} \right| < \varepsilon_r$

mit

x Kenngrösse, die im Gleichgewicht sein muss (Reisezeit oder Verkehrsstärke)

ε_r Grenzwert für die relative Abweichung (z.B. 5 Fahrten oder 10 Sekunden)

ε_a Grenzwert für die absolute Abweichung (z.B. 0,01)

Die Kenngrösse x kann sich dabei auf Strecken, auf Routen oder auf Relationen beziehen. Die Grenzwerte müssen für einen vorgegebenen Anteil (z.B. 95%) der betrachteten Objekte eingehalten werden.

Grenzwerte auf der Ebene des gesamten Netzes

Alternativ kann die Konvergenz auch mit einem globalen Wert ausgedrückt werden. Ein globales Abbruchkriterium hat den Vorteil, dass die iterative Rückkopplung auch beendet werden kann, wenn im Laufe der Iteration immer wieder wechselnde Änderungen zwischen wenigen Netzelementen auftreten, z.B. wiederkehrende Verkehrsstärkenverschiebungen zwischen denselben zwei Routen. Die Konvergenz mit einem globalen Kriterium wahrscheinlich schneller ein, allerdings kann in diesem Fall kein Rückschluss auf die Konvergenz einzelner Routen oder Relationen gemacht werden. Zur Bestimmung der Konvergenz mit einem globalen Wert, schlagen Boyce et al. (2008) [12] die «Anzahl der fehlplatzierten Nachfrage (Total misplaced OD flow (TMF))» vor. Daneben kann die Konvergenz auch mit der «Wurzel des quadrierten Quelle-Ziel-Fehlers (Root squared OD error (RSE))»

quantifiziert werden. Beide Werte sollen am Ende der Iteration jeweils kleiner als ein Grenzwert $\mathcal{E}$ sein.

$$\bullet \quad TMF = \sum_{od} |d_{od,n-1} - d_{od,n}|$$

$$\bullet \quad RSE = \sqrt{\sum_{od} (d_{od,n-1} - d_{od,n})^2}$$

mit

$d_{od,n-1}$ Nachfrage zwischen den Zellen o und d aus dem vorherigem Iterationsschritt $n - 1$. Boyce et al. (2008) [12] verwenden hierfür einen geglätteten Wert $\bar{d}_{od,n-1}$ aus dem vorherigem und aktuellem Iterationsschritt.

$d_{od,n}$ Nachfrage zwischen den Zellen o und d aus aktuellem Iterationsschritt n

Glättung der Modellergebnisse

Damit die Modellergebnisse konvergieren, können die Kenngrößen X zwischen zwei Iterationsschritten über eine Glättungsfunktion gedämpft werden. Die exponentielle Glättungsfunktion arbeitet mit einer Glättungskonstanten (λ), der ein Wert zwischen 0 und 1 zugeordnet wird:

$$x_n^* = \lambda \cdot x_n + (1 - \lambda) \cdot x_{n-1}^*$$

mit

x_n^* geglättete Kenngrösse für den aktuellen Iterationsschritt n

x_{n-1}^* geglättete Kenngrösse für den vorherigen Iterationsschritt $n - 1$

x_n tatsächliche Kenngrösse für den aktuellen Iterationsschritt n

λ Glättungsparameter $0 \leq \lambda \leq 1$

Die Glättungskonstante λ bzw. der Teilterm $1 - \lambda$ repräsentieren die Gewichte, mit denen der vorherige und der aktuelle Iterationsschritt gemittelt werden. Für $\lambda = 0.5$ ermittelt die Methode den Durchschnitt zwischen der tatsächlichen und der geglätteten Kenngrösse. Boyce et al. (2008) [12] empfehlen ein $\lambda = 0.75$, also ein Gewicht von 0.75 für den aktuellen Iterationsschritt und ein Gewicht von 0.25 für den vorherigen Iterationsschritt

Je kleiner λ , desto grösser ist der Einfluss des vorherigen Iterationsschritts. Um zu erreichen, dass mit zunehmender Zahl von Iterationsschritten der Einfluss des tatsächlichen Widerstands abnimmt, kann λ als Funktion von n definiert werden:

$$\lambda = \frac{1}{n}$$

Damit ergibt sich

$$x_n^* = \frac{1}{n} \cdot x_n + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot x_{n-1}^* = \frac{1}{n} \cdot x_n + \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot x_{n-1}^* = \frac{x_n + x_{n-1}^* \cdot (n-1)}{n}$$

Diese Methode wird als «Method of Successive Averages (MSA)» bezeichnet. Die Glättung kann als Lernprozess der Verkehrsteilnehmer interpretiert werden, die die unterschiedlichen Erfahrungen mehrerer Tage verknüpfen. Der geglättete Widerstand entspricht dann dem für den aktuellen Iterationsschritt (Tag) erwarteten Widerstand.

Laut Boyce et al. (2008) [12] sollten mindestens 5 Iterationsschritte durchgeführt werden. Die notwendige Anzahl an Iterationsschritten n ist erreicht, wenn das Verhältnis aus fehlplatzierte Nachfrage (TMF) und Gesamtnachfrage kleiner als 1% ist:

$$\frac{TMF}{\sum_{od} d_{od,n}} < 0.01$$

Es ergibt sich demzufolge ein einzuhaltender Grenzwert ε von:

$$TMF < 0.01 \cdot \sum_{od} d_{od,n} = \varepsilon$$

Hinweise und Empfehlungen zu Rückkopplungen zwischen den Modellstufen

Hinweis

- Die Konvergenz zwischen den Modellstufen ist nachzuweisen. Ein Modell ist konvergent, wenn sich die relationsbezogenen Aufwände oder Nachfragewerte zwischen zwei Iterationsschritten nicht mehr ändern.
- Ein Modell konvergiert schneller, wenn die erste Reisezeitberechnung im PW-Verkehr in einem belasteten Netz erfolgt. Hierfür kann eine historische Matrix oder eine Matrix aus einem geeigneten Modell auf herangezogen werden.
- Für die Reisezeitberechnung im PW-Verkehr müssen die LW-Nachfragematrizen bekannt sein.
- Bei der Rückkopplung müssen die Reisezeitmatrizen für den ÖV nur dann in jedem Iterationsschritt neu berechnet werden, wenn eine kapazitätsabhängige ÖV-Umlegung durchgeführt wird.

Empfehlungen

- Idealerweise konvergiert das Modell ohne Glättung. Wenn nachgewiesen werden kann, dass ein Modell nur mit Glättung konvergiert, dann sollte eine Glättung mit konstanten Gewichten ($\lambda = 0.75$) durchgeführt werden.
- Es sollten mindestens 5 Iterationsschritte durchgeführt werden. Die notwendige Anzahl an Iterationsschritten ist erreicht, wenn die fehlplatzierte Nachfrage (TMF) kleiner als 1% der Gesamtnachfrage ist.
- Wichtige globale Kenngrößen (Modal-Split, Personenkilometer) sollten für jeden Iterationsschritt protokolliert und verglichen werden.
- Wenn das Modell nach 5 Iterationsschritten nicht konvergiert, sollten die Gründe hierfür untersucht werden. Falls die Differenz des TMF -Wertes und die Differenz der Modal-Split-Werte PW und ÖV zwischen zwei Iterationsschritten sinken, dann können weitere Iterationen sinnvoll sein. Wenn die Werte schwanken, kann eine Glättung notwendig sein.

Optional

- Niedrigere Grenzwerte und weitere Iterationsschritte erhöhen die Konvergenz, verlängern aber die Rechenzeit.

Abb. 45 Hinweise und Empfehlungen zu Rückkopplungen zwischen den Modellstufen.

5.3 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 werden kann.

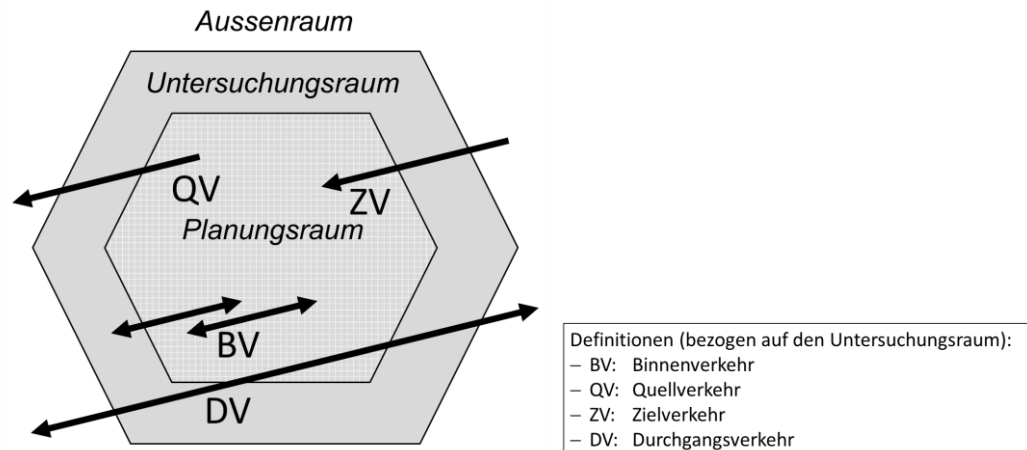


Abb. 46 Planungsraum, Untersuchungsraum und Aussenraum.

Allgemein

Empfehlungen

- Verkehrszellen im Aussenraum sollten nicht direkt an den Grenzen des Untersuchungsraums, sondern an ein vereinfachtes Verkehrsnetz im Aussenraum angebunden werden.

Modellart 1 (städtische / regionale Modelle)

Empfehlungen

- 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.

Modellart 2 (grossräumige / nationale Modelle)

Hinweise

- Bei nationalen Modellen können Planungsraum und Untersuchungsraum der Staatsfläche entsprechen.

Empfehlungen

- Bei grossräumigen Modellen sollte der Untersuchungsraum 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.

Abb. 47 Hinweise und Empfehlungen zum Planungsraum und Untersuchungsraum.

5.4 Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur

In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden Daten der Raum- und Siedlungsstruktur (Einwohner nach Alters- oder Personengruppen, Art und Grösse von Aktivitätsorten) 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 Baublocken üblich, so dass auf eine Verkehrszelle 500 bis 5'000 Einwohner entfallen.

Die meisten Verkehrszelleneinteilungen orientieren sich an amtlich festgelegten Gebieten. Kleinräumige Zelleneinteilungen nutzen Baublöcke, Verkehrswege und natürliche Grenzen für die Abgrenzung von Zellen. Es gibt aber auch die Möglichkeit mit Rasterzellen (Kantenlänge zwischen 100 m und 1000 m) zu arbeiten, sofern die Daten hierfür zur Verfügung stehen. Bisher bestehen noch keine Untersuchungen zu den Vor- und Nachteilen von Rasterzellen. Vorteilhaft ist die einfache Handhabung. Nachteile können sich daraus ergeben, dass die Zahl der Zellen bei kleinen Kantenlängen sehr gross werden kann. In städtischen Gebieten mit einem dichten Verkehrswegenetz werden die Rasterzellen die Verkehrswege schneiden, so dass hier Baublöcke eine bessere Abgrenzung ermöglichen.

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 entscheidet das Umlegungsverfahren, über welchen Knoten die Verkehrsnachfrage eingespiesen wird. Bei einigen Umlegungsverfahren gibt es die Möglichkeit, 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 anzustreben. 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.

AllgemeinHinweise

- 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 und ob das auch die Kenngrössenermittlung einbezieht.
- Bei der Nutzung prozentualer Anbindungen müssen die Anteile in der Prognose dann manuell angepasst werden, wenn sich die Siedlungsschwerpunkte in einer Zelle verändern.
- Weitere Hinweise zur Generierung von Anbindungen finden sich in [41].

Empfehlungen

- Die Abgrenzung der Zellen sollte sich an den verfügbaren Strukturdaten orientieren. Ausserdem sollen organisatorische Raumeinheiten (Gemeindegrenzen, Stadtteile), natürliche Grenzen (Flüsse) und trennende Verkehrswege (Autobahnen, Schienenwege) berücksichtigt werden,
 - 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 (städtische / regionale Modelle)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.
 - Kleinere Zellengrössen, wenn eine Modellierung des Veloverkehrs oder Fussverkehrs vorgesehen ist. Laut dem SVI-Forschungsauftrag 2014/001 «Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs» [42] sind Zellen mit einer Seitenlänge von etwa 400 m für den Veloverkehr empfehlenswert. Für den Fussverkehr werden Seitenlängen von durchschnittlich 200 m bzw. hektargrosse Zellen empfohlen.
-

Modellart 2 (grossräumige / nationale Modelle)Empfehlungen

- Zellenanzahl: 2'000 bis über 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 als die Haltestellen in der Zelle 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.
 - Verkehrszellen als Rasterzellen.
-

Abb. 48 Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur.

5.5 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.

5.5.1 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, 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, Velo und Fuss unterscheiden.

Die Aufteilung des Modus PW in PW-Selbstfahrer und PW-Mitfahrer ermöglicht eine bessere Berücksichtigung der Führerscheinvfügbarkeit. Ausserdem müssen dann Personenfahrten nicht in Fahrzeugfahrten 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.

5.5.2 Strassennetz

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

Tab. 7 Unterteilung von Strassen in Strassenfunktionsklassen.

Strassenfunktionsklasse	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, Velostrassen, Fusswege

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 planfreie Knoten werden mit ihren Rampen abgebildet.

Für die Zwecke der Verkehrsnachfragemodellierung bieten einfache Netzmodelle Vorteile, da sie eine einfachere Abbildung von Knotenpunkten, Haltestellen und Velowegen ermöglichen. Sie benötigen ausserdem weniger Rechenzeit und Speicherplatz. Da Fahrzeitemessungen 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.

5.5.3 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.

Der Haltestelleneinzugsbereich ist ein fiktives Gebiet, von dem angenommen wird, dass der Weg zu den Aktivitätenorten in diesem Gebiet über die zugehörige Haltestelle führen könnte. Er beschreibt damit den Bereich in dem die Haltestelle noch eine gewisse Attraktivität für den ÖV-Nutzer hat. Die Attraktivität nimmt dabei mit zunehmender Distanz zu Haltestelle ab. Der Einfachheit halber wird hierbei häufig die Luftlinienentfernung zur der Haltestelle angenommen, es ist jedoch auch eine Umlegung auf das Netzmodell und damit eine realistischere Darstellung der Wegstrecke denkbar [50; 51]. Die Grösse des Haltestelleneinzugsbereiches, d.h. der Bereich, in dem die Haltestelle noch attraktiv ist, entscheidet darüber, ob eine Haltestelle von einer Verkehrszelle erreicht werden kann. Diese Grösse ist dabei hauptsächlich von den verfügbaren Verkehrssystemen bzw. den verfügbaren Linien an der Haltestelle abhängig. Folgende Grössenbereiche werden häufig angenommen [41], [80]:

- Bus/Strassenbahn: 300 m bis 600 m,
- U-Bahn/S-Bahn: 400 m bis 1'000 m
- Fernbahn: bis 1'400 m

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 der mittleren Fahrzeit 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.

5.5.4 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, Zeitkarte) basierend auf Entfernungen oder Zonen.

Empfehlungen zur Abbildung des Verkehrsangebots

Allgemein

Hinweise

- Sollen Wirkungen von Ridesharing abgebildet werden, ist hierfür ein eigener Sharingmodus mit differenzierten Preisen und Fahrzeugkapazitäten vorzusehen. Derzeit fehlen allerdings Erkenntnisse über die Bereitschaft Ridesharing zu nutzen.
- Strassen im nachgeordneten 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 nachgeordneten Netz bereits im Analysezustand durch ein geeignetes Streckenattribut erhöht werden.

Empfehlungen

- Für die Beschreibung der Strassenklasse nach Baulasträger 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 (städtische / regionale Modelle)

Empfehlungen

- Modi: PW, ÖV Schiene & Strasse, Velo, Fuss, LW.
- Strassennetz: einfache Abbildung ohne komplexe Knoten, mindestens alle Strassen bis zur Strassenfunktionsklasse 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,
- Velowegenetz,
- Fusswege zur ÖV-Haltestelle,
- Nutzungsgebühren.

Modellart 2 (grossräumige / nationale Modelle)

Empfehlungen

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

Optional

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

Abb. 49 Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung des Verkehrsangebots.

5.6 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-Abo) 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. Tab. 8 zeigt mögliche Segmentierungen für Wegezwecke, Tab. 9 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-Abo 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 Tageszeitangablinien 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 durch eine Segmentierung bei der Routenwahl zu berücksichtigen. Dazu gehören Kosten und die Umsteigehäufigkeit.

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.

Tab. 8 Beispiele für eine Segmentierung von Wegezwecken.

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
Einkaufen	Ausbildung Hochschule
	Einkaufen täglicher Bedarf
Freizeit, private Erledigung	Einkaufen sonstige Waren
	private Erledigung (Arzt, Bank, Post)
	Freizeit (Besuche)
	Freizeit (Restaurant, Kultur)
	Freizeit (Sport, Grünanlagen)
Sonstige	Freizeit (Tagesausflug)
	Rundwege
	Bringen / Holen

Tab. 9 Beispiele für eine Segmentierung von Personengruppen.

Personengruppen Segmentierung 1	Personengruppen Segmentierung 2	Segmentierung nach PW- und Abo-Verfügbarkeit
Kinder	Kinder	
Personen in der Ausbildung	Grundschüler	
	Schüler	
	Lernende	
	Studenten	☒
Erwerbstätige	Angestellte qualifiziert	☒
	Angestellte einfach	☒
	Selbständige und freiberuflich Tätige	☒
	Teilzeitbeschäftigte	☒
Nicht Erwerbstätige	Arbeitslose	☒
	Hausmann/-frau	☒
Rentner	Rentner ≤ 75	☒
	Rentner > 75	☒

Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage

Allgemein

Hinweise

- 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.

Modellart 1 (städtische / regionale Modelle)

Empfehlungen

- Mindestens folgende Wegezwecke: Wohnen, Arbeit, Ausbildung Schule, Ausbildung Hochschule, Einkaufen täglicher Bedarf, Einkaufen sonstiger Bedarf, Freizeit, Sonstiges.
- Verfügbarkeit PW und ÖV-Abo über Personengruppe oder Zellenattribut.

Optional

- Personengruppen aus Tab. 9.
- Weitere Wegezwecke aus Tab. 8.
- Für Modelle in touristischen Regionen eine weitere Personengruppe Urlaubsgast mit zugehörigen Wegezwecken Anreise, Abreise, Urlaubsausflug.
- Bei fehlenden Daten: Mobilitätsbefragung.

Modellart 2 (grossräumige / nationale Modelle)

Empfehlungen

- Mindestens folgende Wegezwecke: Wohnen, Arbeit, Ausbildung, Einkaufen, Freizeit, Sonstiges.
- Verfügbarkeit PW und ÖV-Abo über Personengruppe oder Zellenattribut.

Optional

- Personengruppen aus Tab. 9.
- Weitere Wegezwecke aus Tab. 8.
- Einen oder mehrere weitere Wegezwecke für den Fernverkehr.
- bei fehlenden Daten: Mobilitätsbefragung.

Abb. 50 Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung des Verkehrsangebots.

5.7 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, des Personenwirtschaftsverkehrs, des Güterverkehrs und des externen Verkehrs.

5.7.1 Eventverkehr

Der Eventverkehr umfasst private Personenfahrten, die aufgrund besonderer wiederkehrender Ereignisse (z.B. Messe, Sportveranstaltungen) auftreten. Sie müssen dann im Modell berücksichtigt werden, wenn für die zusätzliche Nachfrage besondere Massnahmen geplant und untersucht werden sollen.

Eventverkehre können im Modell als weitere Wegezwecke abgebildet werden. Eventverkehre zeichnen sich dadurch aus, dass die Aktivitätenorte auf eine Verkehrszelle (z.B. Messegelände) oder wenige Verkehrszellen (Event mit mehreren Veranstaltungsorten) im Planungsraum begrenzt sind. Die Zielwahl erfolgt über ein zweiseitig gekoppeltes Modell, d.h. die vom Event zweiseitig angezogenen Wege werden auf möglichen Quellen verteilt. Die Verkehrsnachfrage je Modus wird in einer eigenen Nachfragematrix gespeichert, die dann bei Bedarf in der Umlegung berücksichtigt wird.

5.7.2 Personenwirtschaftsverkehr

Zum Personenwirtschaftsverkehr zählen alle Ortsveränderungen, die in Ausübung des Berufes durchgeführt werden (Wege zu Kunden und Besprechungen, Wege von Handwerkern). Auch Kleintransporte mit dem Velo oder dem PW zählen zum Personenwirtschaftsverkehr.

Der Personenwirtschaftsverkehr kann im Modell entweder als ein oder mehrere Wegezwecke «Dienstlicher Weg» abgebildet werden oder als Teil eines eigenständigen Wirtschaftsverkehrsmodells.

5.7.3 Güterwirtschaftsverkehr

Der Güterwirtschaftsverkehr umfasst Transporte von Gütern, die mit speziellen Fahrzeugen (Lastwagen, Lastzüge), Zügen oder Schiffen transportiert werden.

Für städtische und regionale Verkehrsnachfragemodelle wird in der Regel ein Modell für den LW-Verkehr ausreichen. Wie bei den Personenverkehrsmodellen wird die Nachfrage für einzelne Nachfragesegmente berechnet. Diese werden jedoch nicht aus Personengruppen und Aktivitäten gebildet. Stattdessen wird die Nachfrage für eine Kombination aus Quellbranche, Empfängerbranche und Logistikkonzept (Fahrzeuggrösse, Anzahl Wege pro Tour) berechnet. Im einfachsten Fall werden alle regionalen LW-Fahrten durch ein einziges Nachfragesegment mit dem Fahrzeugtyp LW abgebildet. Hinweise zur Modellierung des Wirtschaftsverkehrs finden sich u.a. in Lohse und Uhlig (2007) [60], in Kapitel 4.2.11 (Wirtschaftsverkehrsmodell) des PTV Visum Handbuchs [69] und in Friedrich et al. (2003) [34].

5.7.4 Externer Verkehr

Der externe Verkehr umfasst alle Ortsveränderungen im Personen- und Wirtschaftsverkehr, deren Quellen und / oder Ziele ausserhalb des Untersuchungsraums liegen. Diese Ortsveränderungen müssen aus übergeordneten Modellen (nationale Modelle) übertragen werden oder durch besondere Erhebungen erfasst werden:

- Externer Verkehr aus übergeordneten Modellen: Da übergeordnete Modelle mit gröberen Verkehrszelleneinteilungen arbeiten, müssen die Nachfragematrizen mit geeigneten Gewichten (z.B. Einwohner und Arbeitsplätze) gesplittet werden. Für eine zeitliche Differenzierung der übergeordneten Nachfrage eignen sich erhobene Nachfrageganglinien an der Grenze des Untersuchungsraums. Näherungsweise kann aus den tageszeitabhängigen Nachfragematrizen im Untersuchungsraum eine aggregierte Ganglinie abgeleitet werden. Im motorisierten Individualverkehr müssen Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr enthalten sein. Im öffentlichen Verkehr kann der Durchgangsverkehr dann unberücksichtigt bleiben, wenn er mit Fernverkehrszügen oder Fernbussen erfolgt, die nicht Gegenstand der Planung sind.

- Externer Verkehr aus Erhebungen: Im MIV können Quell- Ziel- und Durchgangsverkehre durch Kordonerhebungen an der Grenze des Untersuchungsraums erfasst werden. Dazu werden Zählungen mit Befragungen (Interview einer Stichprobe aller Fahrzeugführer) oder Beobachtungen (Kennzeichenerfassung) kombiniert. Die Quellen- und Ziele im Untersuchungsraum werden sich mit dieser Methode allerdings nicht statistisch abgesichert auf einzelnen Zellen zuordnen lassen. Deshalb müssen die Erhebungsdaten wie bei den Daten aus übergeordneten Modellen mit geeigneten Gewichten gesplittet und auf die Grundgesamtheit der gezählten Fahrzeuge hochgerechnet werden. Im ÖV können externe Verkehre durch Zählungen und Befragungen im ÖV-Fahrzeug erfasst werden. Möglicherweise können zukünftig Nachfragematrizen aus Mobilfunkdaten für den externen Verkehr genutzt werden.

Empfehlungen zu Eventverkehr, Wirtschaftsverkehr und externem Verkehr

Allgemein

Hinweise

- Eventverkehre müssen dann im Modell berücksichtigt werden, wenn für die zusätzliche Nachfrage besondere Massnahmen geplant und untersucht werden sollen.
- Verkehre mit Quelle und/oder Ziel ausserhalb des Modellperimeters 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.

Modellart 1 (städtische / regionale Modelle)

Empfehlungen

- 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.

Optional

- Personenwirtschaftsverkehr aus einem Wirtschaftsverkehrsmodell.
- Strassengüterverkehr aus einem Wirtschaftsverkehrsmodell mit differenzierten Branchen und Fahrzeugtypen.

Modellart 2 (grossräumige / nationale Modelle)

Empfehlungen

- Personenwirtschaftsverkehr als einen eigenen Wegezweck im Personenverkehrsmodell abbilden.
- Der Güterverkehr wird durch ein einziges Nachfragesegment mit dem Fahrzeugtyp LW abgebildet.

Optional

- Güterverkehr aus einem Wirtschaftsverkehrsmodell mit differenzierten Branchen, Modi (Strasse, Schiene, Wasser, intermodal) und Fahrzeugtypen.

Abb. 51 Hinweise und Empfehlungen zur Eventverkehr, Wirtschaftsverkehr und externem Verkehr.

5.8 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.

Bei der Festlegung der Prognoseannahmen muss entschieden werden, ob die β -Parameter der Nutzenfunktionen, die die Präferenzen der Menschen widerspiegeln, anzupassen sind. Die Präferenzparameter werden aus dem im Analysezustand beobachteten Verhalten, z.B. mit der Maximum-Likelihood Schätzung abgeleitet. In der Regel wird davon ausgegangen, dass sich die Präferenzen der Personen einer Gruppe nicht ändern. Ein Verkehrsnachfragemodell kann keine Aussagen zu zukünftigen Verhaltenspräferenzen machen, wohl aber zum zukünftigen Verhalten bei veränderten Randbedingungen. Eine Massnahme, die zu höheren Kosten für den PW führt, wird das Verhalten der Menschen bei der Verkehrsmoduswahl beeinflussen. Das ist dann aber nicht auf veränderte Präferenzen, z.B. durch bewusstseinsbildende Massnahmen zurückzuführen, sondern auf einen veränderten Entscheidungskontext. Immer dann, wenn Bewusstseinsänderungen oder bisher nicht beobachtbare Verhaltenspräferenzen (z.B. Bereitschaft zur Nutzung von Sharingangeboten) untersucht werden sollen, müssen entweder Annahmen getroffen oder wahrscheinliche Verhaltenspräferenzen auf der Basis sogenannter Stated Preference Untersuchungen („Was würden Sie tun, wenn ...?“) geschätzt werden.

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

Empfehlungen zur Prognose

Allgemein

Hinweise

- Die Nummerierung der Netzelemente 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 fahrplanbasierte Umlegungsverfahren zum Einsatz kommen. Hier muss in der Nutzenfunktion der Parameter für die Bewertung der Umsteigewartezeit auf 0 gesetzt und der Parameter für die Bewertung der 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). Das Verkehrsaufkommen ergibt sich aus der Einwohnerzahl und der Demografie (altersabhängige Personengruppen).
- 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 (z.B. mit einem Skript) 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.

Abb. 52 Hinweise und Empfehlungen Prognosen.

5.9 Datenquellen

Eine wichtige Voraussetzung für die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells sind qualitativ hochwertige Daten in der für die angestrebte Modellgranularität erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung. In der Praxis sind diesbezüglich häufig Kompromisse notwendig. Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen der in Kapitel 0 beschriebenen Befragung. Auf die Frage «Stellen Sie sich vor, Sie bekommen Geld bzw. Personal, um Ihr Modell in drei Bereichen zu verbessern. Welche Bereiche wären das?» waren die vier am häufigsten genannten Bereiche

1. bessere Vergleichsdaten für die Modellvalidierung
2. bessere Verhaltensdaten aus einer Haushaltsbefragung
3. bessere Netzdaten
4. bessere Strukturdaten

Bei der Erstellung der Modellspezifikation sind hinsichtlich der Datenquellen daher zunächst die folgenden Fragen zu beantworten:

- Welche Daten werden für den Aufbau des Verkehrsnachfragemodells benötigt?
- Welche (räumliche und zeitliche) Auflösung ist erforderlich?
- Welche Datenquellen stehen zur Verfügung?
- Wie gut sind diese Daten? Wie können sie validiert werden?

Verfahren und Kenngrößen zur Überprüfung der Daten werden in Kapitel 6 genauer diskutiert. In diesem Unterkapitel werden Hinweise dazu gegeben, welche Daten für die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells notwendig sind und welche Datenquellen dafür in der Schweiz zur Verfügung stehen. Die Frage nach der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung der Daten wird dabei lediglich kurz andiskutiert, da sie stark von der zuvor definierten Modellgranularität abhängt. Es wird zwischen folgenden Daten unterschieden:

- Daten für den Aufbau der Verkehrszellen,
- Daten zur Beschreibung des Verkehrsangebots,
- Strukturdaten,
- Daten zur Beschreibung des Mobilitätsverhaltens und
- Daten für die Validierung und
- Daten für die Prognose.

5.9.1 Daten für den Aufbau der Verkehrszellen

Verkehrszellen sind in der Regel definiert durch ein Polygon, das die Fläche der Verkehrszelle und den Schwerpunkt der Verkehrszelle abbildet. Zur Definition der Zellenpolygone kann – in Abhängigkeit vom gewählten Ansatz – eine Vielzahl von Datenquellen herangezogen werden. Ausgangspunkt sind üblicherweise administrative Einheiten. Innerhalb der Schweiz sind dies häufig Gemeinden. Beim Bundesamt für Statistik (BFS) können generalisierte Gemeindegrenzen für die gesamte Schweiz bezogen werden. Die detaillierten Polygone stellen in der Regel die Kantone im Rahmen ihrer Geodatensätze zur Verfügung.

Für das europäische Ausland kann auf NUTS- oder LAU-Gebiete zurückgegriffen werden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der unterschiedlichen Struktur der Verwaltungseinheiten in den einzelnen Nationalstaaten der Detaillierungsgrad auf der gleichen Ebene voneinander abweichen kann. So beschreibt die NUTS 3 Ebene in Deutschland beispielsweise kleinere räumliche Einheiten als in Frankreich. Die entsprechenden Geodaten können bei Eurostat bezogen werden.

Ein weiterer möglicher Ausgangspunkt für die Erstellung der Verkehrszellen sind die Verkehrszellen eines anderen Modells (z.B. des Vorgängermodells, des NPVM, etc.). Dies bietet die Möglichkeit eines erleichterten Abgleichs und Datenaustauschs zwischen den jeweiligen Modellen z.B. im Rahmen von Aktualisierungen oder für die Darstellung von Zeitreihen. Es besteht jedoch die Gefahr auch Artefakte des Ausgangsmodells in das neue Modell zu übernehmen. Die damit verbundenen Vor- und Nachteile sind im Einzelfall zu prüfen.

In Abhängigkeit von der anvisierten räumlichen Auflösung des Modells können die Polygone des Ausgangsdatensatzes anschliessend verfeinert werden. Dazu können – je nach Ansatz für die Verfeinerung – eine Vielzahl von Datenquellen herangezogen werden. Dazu gehören beispielsweise grosse Verkehrsinfrastrukturen gemäss den verwendeten Schienen- und Strassennetzen, Gewässer und dominante Geländeschnitte (z.B. aus TLM und Vector25 von Swisstopo), Bauzonen gemäss Baustatistik und Angaben zur räumlichen Verteilung von Einwohnern und Arbeitsplätzen (z.B. aus den STATPOP und STATENT Datensätzen des BFS).

5.9.2 Daten zur Beschreibung des Verkehrsangebots

Für die Erstellung der Netzmodelle sind Daten über die Strasseninfrastruktur und das ÖV-Angebot notwendig. Der erforderliche Detailgrad der Daten ergibt sich aus den in Kapitel 5.5 beschriebenen Überlegungen. Es kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen

den Datengrundlagen zur Erstellung des Strassennetzes und zur Abbildung des ÖV-Angebots.

Grundlage für die Erstellung des Strassennetzes ist eine digitalisierte räumliche Abbildung der realen Strassen und Knoten. Mögliche Datenquellen dafür sind Navigationsnetze kommerzieller Anbieter, Open Street Map (OSM) oder bestehenden Verkehrsmodelle. Im nächsten Schritt müssen die in diesem Netz vorhandenen Netzelemente mit den für das Verkehrsmodell notwendigen Attributen versehen werden. Je nach Datenquelle sind einige Attribute wie Anzahl Fahrstreifen, Abbiegeverbote oder zulässige Höchstgeschwindigkeiten bereits im Grundlagennetz enthalten und müssen im Idealfall nur noch plausibilisiert werden. Andere Attribute, z.B. die Kapazität, die Modellgeschwindigkeit oder ein detaillierter Streckentyp, müssen im Rahmen der Netzerstellung hinzugefügt werden. Mögliche Datensätze für die Plausibilisierung sowie für die Ergänzung von Attributen sind andere Netze als das Grundlagennetz, Orthofotos, das Management Informationssystem Strasse und Strassenverkehr (MISTRA) oder die Geodaten der Kantone.

Für die Abbildung des ÖV-Angebots werden ein digitalisiertes, attribuiertes und routingfähiges Netz, georeferenzierte ÖV-Haltestellen und Fahrplaninformationen benötigt. Mögliche Grundlagen für die Abbildung der Schieneninfrastruktur sind das Schienennetz des Bundesamtes für Verkehr (BAV), das Netzmodell der SBB oder OSM. Das Routing des strassengebundenen ÖV erfolgt idealerweise auf dem verwendeten Strassennetz. Für die Abbildung des Fahrplans kann auf bestehenden Fahrplänen aufgebaut werden, welche mittlerweile aufgrund von Open Data Initiativen für die ganze Schweiz öffentlich zur Verfügung stehen. Die Fahrplandaten enthalten in der Regel auch eine Georeferenzierung der Haltestellen. Je nach gewünschter Auflösungsstufe (z.B. Abbildung einzelner Haltepunkte) kann diese aber zu wenig differenziert sein. Dann empfiehlt sich eine Verschneidung mit weiteren Daten wie Geodaten von Verkehrsverbünden und Verkehrsbetreibern oder OSM.

5.9.3 Strukturdaten

Die Strukturdaten einer Verkehrszelle sind Grundlage für die Verkehrserzeugungsrechnungen. Welche Daten genau benötigt werden hängt daher direkt von den definierten Personengruppen und Wegezwecken (vgl. Kapitel 5.6) ab. Die Verfügbarkeit von Informationen für die einzelnen Wegezwecke und Personengruppen ist jedoch stark unterschiedlich.

Schweizweit verfügbar sind beispielsweise beim BFS respektive den kantonalen statistischen Ämtern Daten zur ständigen Wohnbevölkerung und zur Anzahl der Beschäftigten differenziert nach NOGA-Code. Die NOGA (Nomenclature générale des activités économiques) ist eine Klassifizierung von Unternehmen bzw. Arbeitsstätten nach deren wirtschaftlicher Tätigkeit. Der Bestand an in der Schweiz zugelassenen motorisierten Strassenfahrzeugen ist im automatisierte Fahrzeug- und Fahrzeughalterregister (MOFIS) erfasst und kann über das Bundesamt für Strasse (ASTRA) bezogen werden. Informationen zu den ÖV-Abonnements können von der SBB und den Verkehrsverbünden zur Verfügung gestellt werden.

Strukturdaten für die Wegezwecke Ausbildung, Einkaufen und Freizeit bedürfen hingegen häufig noch zusätzlicher Recherchen im Rahmen der Modellerstellung um bestehende Datensätze wie die UVEK-Listen zu Einkaufsnutzungen («Shopping-Center») oder Schulstandort oder Ableitungen aus STATENT zu ergänzen.

5.9.4 Daten zur Beschreibung des Mobilitätsverhaltens

Die zentrale Grundlage für die Beschreibung des Mobilitätsverhaltens der Schweizer Bevölkerung ist der Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) [17], der in 5-Jahresabständen vom BFS erhoben wird. In diesem Rahmen wird das Verkehrsverhalten von rund 60'000 Personen an einem zugeteilten Stichtag erhoben. Aus diesen Daten lässt sich eine Vielzahl von Verhaltensparametern ableiten. Allerdings ist die Stichprobengrösse je Region unterschiedlich, da nicht alle Kantone von der Möglichkeit Gebrauch machen die Stichprobe innerhalb ihres Gebietes zu erhöhen.

In Verbindung mit dem MZMV wird zudem mit einem Teil der Befragten eine Stated Preference Befragung zur Verkehrsmittel- und Routenwahl für die Verkehrsmittel MIV, ÖV, Velo und Fussgänger durchgeführt. Diese Befragung wurde speziell im Hinblick auf die Ableitung von Parametern für Verkehrsmodelle und ähnliche Anwendungen entwickelt.

Im Rahmen der Erstellung verschiedener kantonaler Modelle wurden zudem weitere Erhebungen zum Verkehrsverhalten durchgeführt. Inwiefern diese Datenquellen geeignet sind, um die gemäss Modellspezifikation benötigten Parameter abzubilden ist im Einzelfall zu prüfen. Unter Umständen kann es angebracht sein, eine auf das Modell zugeschnittene eigene Befragung durchführen zu lassen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Übernahme von Parametern aus anderen Modellen. Dabei sind jedoch einige Dinge zu beachten (vgl. auch [46]):

- Das Verhalten der Modellbevölkerung unterscheidet sich von Region zu Region. Eine Parameterübernahme ist zulässig, wenn Haushaltsbefragungen ein ähnliches Verhalten aufzeigen.
- Das Verhalten der Modellbevölkerung wird entscheidend von Geografie, Topografie und Klima beeinflusst. Eine Parameterübernahme ist zulässig, wenn das Untersuchungsgebiet des zu erstellenden Modells dem Untersuchungsgebiet, aus dem die Parameter entnommen werden sollen, entspricht.
- Das Verhalten der Modellbevölkerung ändert sich im Laufe der Zeit. Daher ist es auch nicht zwangsläufig zulässig, Parameter aus einem alten Modell desselben Untersuchungsraumes zu übernehmen. Eine Parameterübernahme ist zulässig, wenn Haushaltsbefragungen ein ähnliches Verhalten aufzeigen.

5.9.5 Daten für die Validierung

Wie in Kapitel 6 ausgeführt, werden für die Validierung eine Reihe von Datenquellen benötigt. In diesem Abschnitt werden mögliche Datenquellen für die gängigsten Validierungsdaten benannt. Dazu gehören:

- Strassenverkehrszählungen
- Passagierzahlen im öffentlichen Verkehr
- Reiseweiten- und Reisezeitverteilungen
- Amtliche Statistiken

Da auch Erhebungsdaten Fehler beinhalten können ist ein wesentlicher Schritt bei der Beschaffung dieser Daten die Beurteilung ihrer Qualität und Repräsentativität. So hat z.B. der DTV-Wert einer Dauerzählstelle für das Analysejahr eine andere Aussagekraft für die Modellvalidierung als eine 7 Jahre alte Einzelzählung. Es sollte daher neben den erhobenen Verkehrswerten auch Metadaten wie das Erhebungsjahr, die Stichprobengrösse und die Messmethode erfasst und bei der Validierung berücksichtigt werden (vgl. dazu auch Kapitel 6.2.2).

Ansprechpartner für *Strassenverkehrszählungen* sind das ASTRA, die Kantone und die Gemeinden. Das ASTRA verfügt über ca. 475 Dauerzählstellen auf dem Nationalstrassennetz, die stundenfeine, fahrzeugklassenspezifische und richtungsgetrennte Zählwerte für den DWV und den DTV liefern können. Die kantonalen und kommunalen Zählwerte weisen eine grössere Heterogenität auf. So verfügen einige Kantone und Städte ebenfalls über Dauerzählstellen mit entsprechend aufgelösten Daten. Daneben werden in einigen Kantonen auch die Ergebnisse von Verkehrszählungen im Rahmen von Projekten zentral verwaltet. Sie können für die Validierung genutzt werden.

Das Äquivalent zu den Strassenverkehrszählungen für den öffentlichen Verkehr sind *Passagierzahlen* auf Querschnitten respektive Linien. Für die Strecken der SBB können stundenfeine und richtungsbezogene Zählwerte differenziert nach Regional- und Fernverkehr von der SBB bezogen werden. Für die übrigen Linien bzw. Strecken sind die Tarifverbünde und allenfalls grosse Verkehrsbetriebe die Ansprechpartner. Bei diesen Daten ist jedoch mit einer grösseren Heterogenität und einem grösseren Aufwand für die Plausibilisierung

und Harmonisierung zu rechnen als bei den SBB Zählraten, insbesondere, wenn Zählraten mehrerer Verkehrsverbünde benötigt werden.

Die *Reiseweiten- und Reisezeitverteilungen* können grundsätzlich schweizweit aus dem MZMV bestimmt werden. Wie bei den Verhaltensparametern ist bei regionspezifischen Auswertungen auf eine ausreichend grosse Stichprobengrösse zu achten. Darüber hinaus sollten die ausgewiesenen Reisezeiten und Distanzen einer Plausibilisierung unterzogen werden. Die Reisezeiten beruhen auf den Angaben der Befragten, welche inhärent mit einer Reihe von Unsicherheiten (z.B. ungenaues Runden, Über- oder Unterschätzung der tatsächlich benötigten Zeit, etc.) verbunden sind. Die Genauigkeit der Distanzen hat sich aufgrund des automatischen Routings in den letzten Jahren deutlich verbessert, dennoch ist eine eigenständige Plausibilisierung nach wie vor zu empfehlen.

Daneben können auch *amtliche Statistiken* für die Plausibilisierung verwendet werden. Das BFS weist jährlich verkehrsmittelspezifische Fahrleistungen im Personenverkehr und Transportleistungen im Güterverkehr aus. Ebenso veröffentlichen die statistischen Ämter verschiedener Kantone Statistiken zur Fahr- und Verkehrsleistung, häufig basierend auf dem MZMV und einer Verknüpfung mit weiteren Datenquellen.

5.9.6 Daten für die Prognose

Wie in Kapitel 5.8 beschrieben müssen für den Prognosezustand zunächst die erwarteten und für den Verkehr relevanten Veränderungen in Bezug auf

- Demographische und Siedlungsstrukturdaten,
- Verhaltensparameter, Motorisierungsgrade und Nutzungskosten,
- das Verkehrsangebot sowie
- externe Nachfragedaten

ermittelt werden. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Prozesses ist die Etablierung von Annahmen zu der voraussichtlichen Entwicklung dieser Stellgrössen.

Für die Prognose der *demographischen Entwicklung* im Untersuchungsgebiet kann auf die Bevölkerungsszenarien des BFS sowie allfällige Verfeinerungen der Kantone zurückgegriffen werden. Darüber hinaus hat das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) im Rahmen der Verkehrsperspektiven 2040 ein Werkzeug entwickelt, um die prognostizierte Gesamtbevölkerung den Gemeinden zuzuweisen sowie weitere *Siedlungsstrukturdaten* wie Anzahl Beschäftigte, Ausbildungsplätze, Verkaufsraumflächen oder Anzahl Freizeitbesucher zu prognostizieren. Das Werkzeug wurde allerdings speziell für den Datenbedarf des NPVM 2010 entwickelt. Inwiefern eine Anwendung auf andere Modelle oder eine Übertragung der entwickelten Methodik auf andere Daten möglich ist, sollte direkt mit dem ARE besprochen werden. Darüber hinaus ist bei jeder Nutzung von Werkzeugen und Daten aus anderen Prognosen zu prüfen, ob die in den vorgängigen Arbeiten getroffenen Annahmen mit den Annahmen der aktuellen Prognose übereinstimmen.

Dies gilt insbesondere auch für allfällige Änderungen in den *Verhaltensparametern, Motorisierungsgraden und den Nutzungskosten*. Im Rahmen der Verkehrsperspektiven 2040 wurden dazu beispielsweise weiterreichende Annahmen getroffen und in den Berichten dokumentiert. Diese Annahmen gelten jedoch für die gesamte Schweiz. Inwiefern sie auf den Untersuchungsraum des Modells übertragbar sind, ist im Einzelfall zu prüfen. Hilfreich kann dabei eine retrospektive Betrachtung der Entwicklung dieser Parameter z.B. durch Zeitreihenanalysen des Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) sein. Aber auch Studien zu gesellschaftlichen Trends wie der möglichen Auswirkungen autonomer Fahrzeuge sollten berücksichtigt werden, z.B.: [61; 33; 79].

Für die Erfassung der für die Entwicklung des Verkehrs bedeutsamen und bis zum Prognosezeitpunkt mit hoher Wahrscheinlichkeit realisierten Massnahmen im *Verkehrsangebot* kann zwischen Bauprojekten auf der Strasse und Veränderungen des ÖV-Fahrplans unterschieden werden. Mögliche Quellen für die relevanten Bauprojekte auf der Strasse sind auf Ebene der Nationalstrassen das Strategische Entwicklungsprogramm Nationalstrassen

(STEP-NS) respektive dessen Vorgänger das Programm Engpassbeseitigungen (PEB) des Bundesamtes für Strasse (ASTRA) und auf der Ebene von Kantonal- und Gemeindestrassen die Verkehrsrichtpläne und vorhandene Strassenbauprojekte. Im öffentlichen Verkehr unterhalten die SBB einen Prognosefahrplan, welcher ggf. übernommen werden kann. Für die Angebote des strassengebundenen ÖV oder des öffentlichen Nahverkehrs sind hingegen in der Regel keine Prognosefahrpläne verfügbar.

Eine mögliche Datenquelle für die Prognose der Entwicklung der Nachfrage im Aussenraum sind die Verkehrsperspektiven 2040 des ARE mit den bereits genannten Einschränkungen hinsichtlich der Kompatibilität der hinterlegten Annahmen. Für die Entwicklung der Verkehre im Ausland können darüber hinaus auch die Prognosen der entsprechenden Länder oder die Eurostat Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung herangezogen werden.

6 Qualitätsprüfung von Verkehrsnachfragemodellen

6.1 Ableitung von Qualitätskenngrößen

Aufbauend auf den Kapiteln 3 und 0 werden in diesem Kapitel Qualitätsmasse für drei Arten von Gütemassen (Einzelwerte, Mengen von Einzelwerten und Verteilungen) empfohlen bzw. entwickelt.

6.1.1 Aussagen zu Einzelwertgütemassen

Entwicklung eines Einzelwertgütemasses aus dem GEH

Neben der in Unterkapitel 3.2 beschriebenen und wünschenswerten Eigenschaft des *GEH*-Wertes, dass die relativen Abweichungen mit zunehmenden Wertebereich sinken, weist dieser Wert aber auch problematische Eigenschaften auf:

- Der *GEH* ist nicht selbstskalierend, d.h. die Sollwerte müssen abhängig vom Wertebereich der zu beurteilenden Grösse angepasst werden. Damit beispielsweise die Zählwerte einer Stundenzählung und einer Tageszählung an einer Zählstelle vergleichbare Ergebnisse ergeben, muss der Sollwert für die Tageszählung erhöht werden. Deshalb ist der *GEH* auch nicht für die Bewertung anderer Kenngrößen, z.B. von Wegelängen, geeignet.
- Der *GEH* ist nicht achsensymmetrisch zum Messwert, d.h. eine gleiche absolute Abweichung eines Messwertes nach oben und unten wird unterschiedlich bewertet.
- Der *GEH* hat die Einheit $\sqrt{\text{Verkehrsstärke}}$. Wünschenswert ist ein einheitenloses Gütemass.
- Der *GEH* erklärt sich zum Teil aus einer relativen Abweichung r , die sich nicht nur auf den Messwert c bezieht, sondern auch den Modellwert m (siehe Unterkapitel 3.2.1). Dadurch beeinflusst der Modellwert das Gütemass.
- Das Gütemass liegt nicht in einem Wertebereich zwischen 0 (keine Übereinstimmung) und 1 (perfekte Übereinstimmung).

Um diese Eigenschaften zu beheben wurde im DFG-Forschungsprojekt «Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr» [38], ausgehend vom *GEH*, ein alternatives Gütemass *SQV* (Scalable Quality Value) entwickelt, das in [36] dokumentiert ist und hier entsprechend wiedergegeben wird.

Achsensymmetrie und Unabhängigkeit vom Modellwert

Damit der *GEH* die Anforderung an die Achsensymmetrie und an die Unabhängigkeit vom Modellwert m erfüllt, wird der *GEH* modifiziert. Dieser modifizierte Wert wird im Folgenden als *MGEH* bezeichnet. Analog zum *GEH* wird der *MGEH* das geometrische Mittel aus absoluter und relativer Abweichung von Messwert c und Modellwert m interpretiert. Anders als beim *GEH* wird die relative Abweichung aber so ermittelt, dass sie sich nur auf den Messwert bezieht:

absolute Abweichung:

$$a = \sqrt{(m - c)^2}$$

relative Abweichung beim *GEH*:

$$r_{\text{GEH}} = \frac{\sqrt{(m - c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m + c)} = \frac{2 \cdot a}{m + c}$$

relative Abweichung beim *MGEH*:
$$r_{MGEH} = \frac{a}{c}$$

Damit ergeben sich die beiden Gütemasse *GEH* und *MGEH*:

$$g_{GEH} = \sqrt{a \cdot r_{GEH}} = \sqrt{\sqrt{(m-c)^2} \cdot \frac{\sqrt{(m-c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m+c)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m-c)^2}{m+c}}$$

$$g_{MGEH} = \sqrt{a \cdot r_{MGEH}} = \sqrt{a \cdot \frac{a}{c}} = \sqrt{\frac{a^2}{c}} = \sqrt{\frac{(m-c)^2}{c}}$$

mit

c gemessene Kenngrösse (*c* = Count)
m mit dem Modell ermittelte Kenngrösse (*m* = Model)

g_{GEH} Gütemass *GEH*

g_{MGEH} Gütemass modifizierter *GEH*

Skalierbarkeit

Da Messwerte der gleichen Grössenordnung (z.B. eine gezählte Verkehrsstärke *c* = 1'000) abhängig vom Bezugszeitraum (Stunde oder Tag) unterschiedlich bewertet werden sollen, kann kein selbstskalierendes Gütemass gefunden werden. Deshalb wird der *MGEH*-Wert um einen Skalierungsfaktor *f* erweitert. Ergebnis ist ein skaliertes *GEH*, der im Folgenden als *SGEH* bezeichnet wird:

$$g_{SGEH} = \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c}}$$

Um einzelne Kenngrössen mit dem skalierten *GEH* zu beurteilen, muss der Skalierungsfaktor *f* bestimmt werden. Tab. 10 enthält Grössenordnungen für den Skalierungsfaktor.

Tab. 10 Abschätzung des Skalierungsfaktors *f*.

Kenngrösse	Grössenordnung	<i>f</i>
Zahl der Personenwege Tag (gesamt, pro Modus, pro Zweck)	10 ⁰	1
mittlere Wegelänge in Kilometer	10 ¹	10
Zeitdauer aller Wege pro Tag in Minuten	10 ²	100
Verkehrsstärke Stunde	10 ³	1'000
Verkehrsstärken Tag	10 ⁴	10'000

Wird der Skalierungsfaktor für stündliche und tägliche Verkehrsstärken herangezogen, um den *GEH* für Stunden- und Tageswerte zu vergleichen, ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$g_{SGEH} = \sqrt{\frac{a_{hour}^2}{1'000 \cdot c_{hour}}} = 0.0316 \cdot \sqrt{\frac{a_{hour}^2}{c_{hour}}} = 0.0316 \cdot g_{MGEH, hour}$$

$$g_{SGEH} = \sqrt{\frac{a_{day}^2}{10'000 \cdot c_{day}}} = 0.01 \cdot \sqrt{\frac{a_{day}^2}{c_{day}}} = 0.01 \cdot g_{MGEH, day}$$

$$g_{SGEH} = 0.01 \cdot g_{MGEH, day} = 0.0316 \cdot g_{MGEH, hour}$$

$$\Rightarrow g_{MGEH, day} = 3.16 \cdot g_{MGEH, hour}$$

Daraus lässt sich ableiten, dass der *GEH*-Sollwert von 5 für die Validierung stündlicher Verkehrsstärken einem *GEH*-Sollwert von etwa 16 ($3.16 \cdot 5 \approx 16$) für die Validierung tägliche Verkehrsstärken entspricht.

Wertebereich 0 bis 1

Um den *MGEH*-Wert in den Wertebereich von 0 (keine Übereinstimmung) bis 1 (perfekte Übereinstimmung) zu transformieren, wird folgende Funktionsform gewählt und als Scalable Quality Value (*SQV*) bezeichnet:

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

Um die maximal zulässige absolute Abweichung a von einem Zählwert c zu ermitteln, wird die Funktion nach a aufgelöst. Es ergibt sich eine quadratische Gleichung mit zwei Lösungen, von denen a_1 positive Werte liefert:

$$a_1 = \frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f} \sqrt{c}}{g_{SQV}}$$

$$a_2 = -\frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f} \sqrt{c}}{g_{SQV}}$$

Vergleich von *GEH*, *MGEH* und *SQV*

Der *MGEH* liefert ein etwas höheres Gütemass als der *GEH*. Bei einem Messwert von 1'000 ergibt sich ein Unterschied von etwa 4% - ein *GEH* = 5 entspricht dann einem *MGEH* von 5,2. Bei einem Messwert von 4'000 reduziert sich der Unterschied auf 2%.

Der *MGEH*-Wert und der *SQV* liefern die gleichen Beurteilungen. Sie können durch folgenden Zusammenhang umgerechnet werden.

$$g_{MGEH} = \frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f}}{g_{SQV}}$$

$$g_{SQV} = \frac{1}{1 + \frac{g_{MGEH}}{\sqrt{f}}}$$

Tab. 11 zeigt eine Gegenüberstellung ausgewählter Werte.

Tab. 11 Umrechnung von MGEH in SQV.

g_{MGEH}	g_{SQV}	f
5	0.8635	1'000
10	0.7597	1'000
15	0.6783	1'000

Zur Beurteilung von Messwerten mit dem SQV-Wert, werden drei Qualitätsbereiche vorgeschlagen, die in Tab. 12 dargestellt sind.

Tab. 12 Qualitätsbereiche des SQV.

g_{SQV}	g_{MGEH}	für $f = 1'000$	Beurteilung
0.90		3.5	Sehr gute Übereinstimmung. Diese Werte könnten z.B. nach einer Matrixkorrektur gefordert werden.
0.85		5.6	Gute Übereinstimmung
0.80		7.9	Akzeptable Übereinstimmung
0.75		10.5	Ausreichende Übereinstimmung. Diese Abweichung ist insbesondere dann angemessen, wenn die Qualität der Messwerte eingeschränkt ist

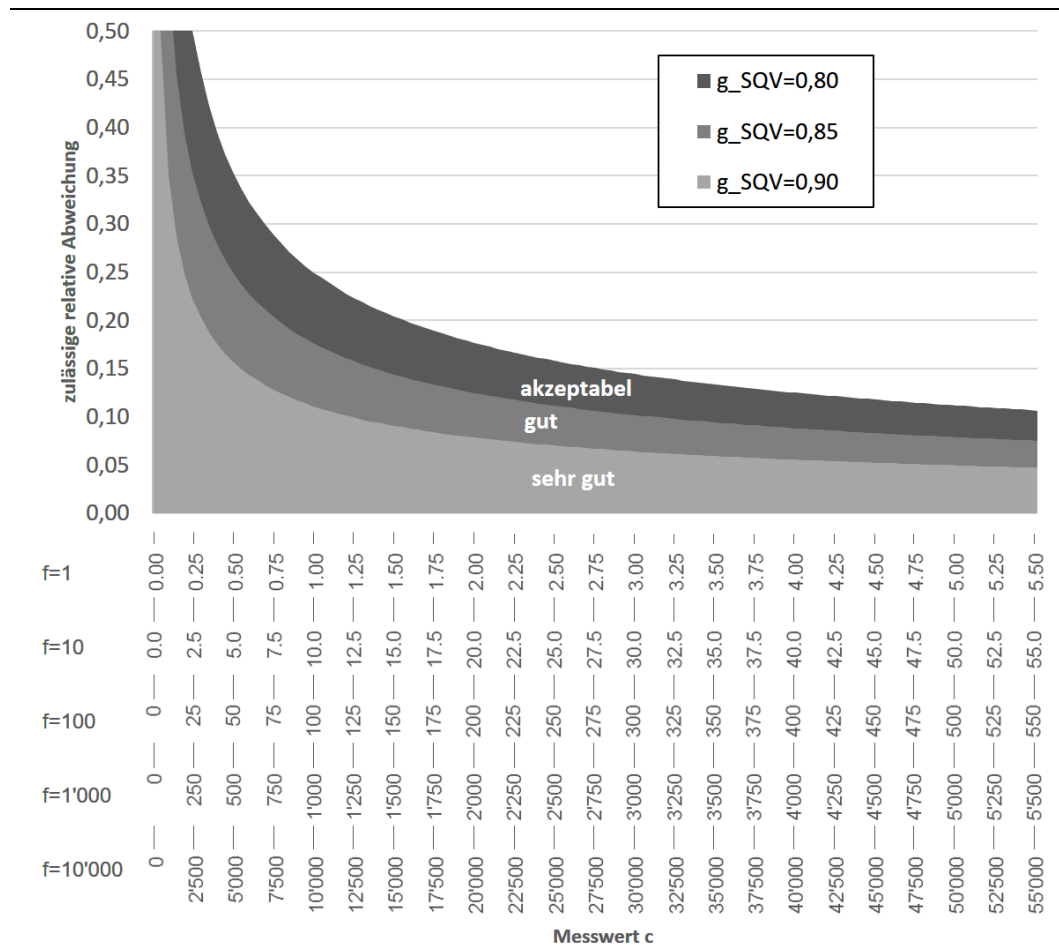
In Abb. 53 sind die maximal zulässigen relativen Abweichungen vom Messwert c für die drei Ausprägungen von g_{SQV} dargestellt. Die Messwertachse nimmt in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor f unterschiedliche Grössenordnungen an. Die Tabelle unter der Abbildung enthält Vorschläge für den Skalierungsfaktor f für ausgewählte Kenngrössen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist das Gütemass g_{SQV} zur Beurteilung von Verkehrsstärken und personenbezogenen Mobilitätskenngrössen geeignet:

- Verkehrsstärken: hier kann ggf. neben der Tageszeit auch nach Verkehrsarten differenziert werden. Für eine Beurteilung der LW-Verkehrsstärken wäre dann ein Skalierungsfaktor $f_{LW} = 0.1 \cdot f_{Kfz}$ zu wählen.
- Personenbezogene Mobilitätskenngrössen:
 - mittlere Zahl der Wege (gesamt, pro Zweck, pro Modus). Da Wege, die auf einen Zweck oder einen Modus entfallen, Teilmengen der gesamten Wege einer Person sind, sollte für alle Teilmengen der gleiche Skalierungsfaktor f gewählt werden (Vorschlag $f = 1$).
 - mittlere Wegelängen (gesamt, pro Zweck, pro Modus; Vorschlag $f = 10$).
 - mittlere Wegezeiten (gesamt, pro Zweck, pro Modus; Vorschlag $f = 30$).

Das Gütemass g_{SQV} eignet sich nicht zur Beurteilung folgender Kenngrössen:

- Prozentwerte des Modal Split: Stattdessen sollen Wege pro Person und Modus herangezogen werden.
- Fahrzeiten zwischen zwei Punkten im Netz: Sie beziehen sich nicht auf den Weg einer Person, sondern auf einen Streckenzug oder eine Route.



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

Abb. 53 Beurteilung von Einzelwerten mit dem Gütemass SQV.

Zusammenhang zwischen GEH und Normalverteilung

Eine weitere Kritik am *GEH* und damit auch am neu entwickelten Gütemass *SQV* ist die Tatsache, dass beide Werte keine anerkannten Gütemasse der Statistik sind. Ziel dieses Abschnitts ist es darzustellen, wie der *GEH*-Wert und die Normalverteilung (NV) zusammenhängen. Der Zusammenhang wird für die zulässige Abweichung zwischen einem Modellwert m und einem Zählwert c (= Erwartungswert) dargestellt. Da der *GEH* nach unten und oben unterschiedliche Abweichungen für einen Zählwert c zulässt, erfolgt die Darstellung für die obere Abweichung. Gesucht wird eine Funktion f_{NV} die den Zusammenhang zwischen den beiden Funktionen $m_{GEH}^+(c)$ und $m_{NV}^+(c)$ beschreibt, die beide von c abhängen:

$$m_{GEH}^+(c) = f_{NV}(m_{NV}^+(c))$$

Für die Darstellung des Zusammenhangs von GEH und Normalverteilung werden die in folgender Tabelle verwendeten Bezeichnungen verwendet.

Tab. 13 Formelbezeichner für den Zusammenhang zwischen GEH und NV .

Bezeichnung	Erläuterung
c	Messwert ($c = \text{Count}$)
m	Modellwert ($m = \text{Model}$)
m_{GEH}^-	Zulässiger unterer Modellwert bei vorgegebenen GEH und c
m_{GEH}^+	Zulässiger oberer Modellwert bei vorgegebenen GEH und c
a_{GEH}^+	Zulässige absolute obere Abweichung eines Modellwerts bei vorgegebenen GEH und c
r_{GEH}^+	Zulässige relative obere Abweichung eines Modellwerts bei vorgegebenen GEH und c
σ	Standardabweichung
α	Signifikanzniveau (Irrtumswahrscheinlichkeit), Wahrscheinlichkeit, mit der im Rahmen eines Hypothesentests die Nullhypothese fälschlicherweise verworfen werden kann, obwohl sie eigentlich richtig ist.
$1 - \alpha$	Sicherheit der Schätzung: Wahrscheinlichkeit, eine richtige Nullhypothese nicht abzulehnen.
$Z_{1-\alpha/2}$	Konfidenzkoeffizient für das Signifikanzniveau α .
m_{NV}^+	Zulässiger oberer Modellwert bei der Normalverteilung bei Vorgabe von σ , c und z
a_{NV}	Zulässige absolute Abweichung bei der Normalverteilung bei Vorgabe von σ , c und z
r_{NV}	Zulässige relative Abweichung bei der Normalverteilung bei Vorgabe von σ , c und z

Zulässige Abweichung GEH

Das Gütemass g für den GEH ist, wie oben bereits dargestellt, wie folgt definiert:

$$g_{GEH} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m - c)^2}{m + c}}$$

Durch Umformung erhält man die zulässigen unteren und oberen Modellwerte bzw. die zulässigen absoluten und relativen Abweichungen a und r :

$$m_{GEH}^- = \frac{-\sqrt{16cg_{GEH}^2 + g_{GEH}^4} + 4c + g_{GEH}^2}{4}$$

$$m_{GEH}^+ = \frac{+\sqrt{16cg_{GEH}^2 + g_{GEH}^4} + 4c + g_{GEH}^2}{4}$$

$$a_{GEH}^+ = |m_{GEH}^+ - c|$$

$$r_{GEH}^+ = \frac{|m_{GEH}^+ - c|}{c}$$

Zulässige Abweichung Normalverteilung

Die zulässige Abweichung der Normalverteilung f_{NV} hängt ab vom Erwartungswert c (Messwert), der Standardabweichung σ und der Wahrscheinlichkeit der Normalverteilung

$p_{NV} = 1 - \alpha / 2$. Anders als beim *GEH* liefert die Normalverteilung symmetrische Abweichungen nach unten und oben. Der zulässige Modellwert der Normalverteilung bei Vorgabe von σ , c und z beträgt damit:

$$m_{NV} = f_{NV}(p_{NV}, c, \sigma) = c \pm z_{1-\alpha} \cdot \sigma$$

$$m_{NV}^+ = f_{NV}(p_{NV}, c, \sigma) = c + z_{1-\alpha} \cdot \sigma$$

$$a_{NV} = a_{NV}^+ = a_{NV}^- = |m_{NV} - c| = |z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma|$$

$$r_{NV} = r_{NV}^+ = r_{NV}^- = \frac{|m_{NV} - c|}{c} = \frac{|z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma|}{c}$$

Zusammenhang *GEH* und Normalverteilung

Um den Zusammenhang zwischen *GEH* und Normalverteilung herzuleiten, wird angenommen, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Messwert c und der Standardabweichung σ gibt, der durch folgende Formel beschrieben werden kann:

$$\sigma(c) = c^{\beta_2}$$

Setzt man ausserdem $\beta_1 = z_{1-\alpha/2}$ ergibt sich folgende Darstellung für den zulässige oberen Modellwert der Normalverteilung:

$$m_{NV}^+ = c + z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c) = c + \beta_1 \cdot c^{\beta_2}$$

$$\Rightarrow z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c) = \beta_1 \cdot c^{\beta_2}$$

Nun werden die Parameter β_1 und β_2 so bestimmt, dass die relativen Abweichungen zwischen dem *GEH*-Wert und der Normalverteilung klein werden, d.h. $|m_{GEH}^+(c) - m_{NV}^+(c)| \rightarrow 0$. Das führt zu folgender Gleichung:

$$\frac{\sqrt{16 \cdot c \cdot g_{GEH}^2 + g_{GEH}^4} + 4 \cdot c + g_{GEH}^2}{4} - (c + \beta_1 \cdot c^{\beta_2}) = 0$$

Wird diese Gleichung nach β_1 aufgelöst, ergibt sich eine Gleichung mit der Variablen c und den beiden Parametern g_{GEH} und β_2 :

$$\beta_1(c) = \frac{\sqrt{g_{GEH}^2 \cdot (16 \cdot c + g_{GEH}^2)} + g_{GEH}^2}{4c^{\beta_2}}$$

Der Grenzwert dieser Gleichung für grosse Werte von $c \rightarrow \infty$ liefert einen vereinfachten Zusammenhang zwischen β_1 , β_2 und g_{GEH} . Setzt man zusätzlich $\beta_2 = 0.5$, dann entspricht β_1 dem *GEH*-Wert:

$$\lim_{c \rightarrow \infty} \beta_1(c) = \frac{\sqrt{g_{GEH}^2 \cdot 16 \cdot c}}{4c^{\beta_2}} = \frac{4\sqrt{c} \sqrt{g_{GEH}^2}}{4c^{\beta_2}} = c^{(0.5-\beta_2)} \cdot g_{GEH}$$

$$\lim_{c \rightarrow \infty} \beta_1(c, \beta_2 = 0.5) = g_{GEH}$$

Damit kann nun ein vereinfachter Zusammenhang zwischen dem GEH -Wert und der Normalverteilung formuliert werden:

$$\begin{aligned}
 z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c) &= \beta_1 \cdot c^{\beta_2} \\
 z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c) &\approx c^{(0.5-\beta_2)} \cdot g_{GEH} \cdot c^{\beta_2} \\
 z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c) &\approx g_{GEH} \cdot c^{0.5} \quad \forall \beta_1 \\
 g_{GEH} &\approx \frac{z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c)}{c^{0.5}}
 \end{aligned}$$

Abb. 54 zeigt einen Vergleich der zulässigen relativen Abweichung r für die GEH -Werte 5 und 10 und der zulässigen relativen Abweichung bei Annahme des vereinfachten Zusammenhangs mit $\beta_1 = g_{GEH}$ und $\beta_2 = 0.5$. Es zeigt sich, dass die Unterschiede gering sind und dass der vereinfachte Zusammenhang immer zu einer etwas geringeren relativen Abweichung führt als der genaue Zusammenhang. Die Unterschiede nehmen mit einem kleineren GEH oder einem grösseren Messwert c ab.

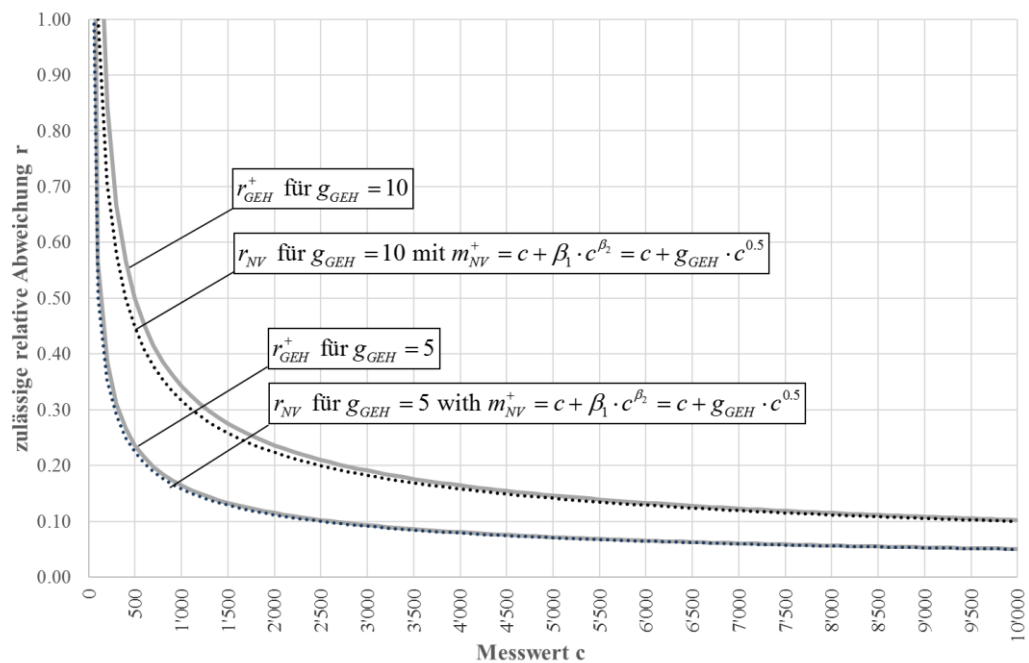


Abb. 54 Zulässige relative Abweichung r für den GEH und die Normalverteilung für die GEH -Werte 5 und 10. Dargestellt ist der Verlauf der relativen Abweichung für den GEH -Wert (durchgezogene Linie) und für den vereinfachten Zusammenhang zwischen dem GEH -Wert und der Normalverteilung.

Abb. 55 zeigt die β_1 -Werte, die für eine perfekte Übereinstimmung von GEH und Normalverteilung erforderlich sind, d.h. für einen Fall, in dem $m_{GEH}^+(c) = m_{NV}^+(c)$. Setzt man $\beta_2 = 0.5$ ergeben sich β_1 -Werte, die sich für hohe Beobachtungswerte c dem Wert $\beta_1 = g_{GEH}$ nähern. Beobachtete Standardabweichungen der Verkehrsstärke an Dauerzählstellen weisen meist eine Standardabweichung auf, die eher bei $\sigma(c) = c^{0.8}$ liegt, so dass ein $\beta_2 = 0.8$ realistischer ist. Ein solches β_2 führt zu kleineren β_1 -Werten, die bei $c > 2'500$ unter 0.5 für $GEH = 5$ und unter 1.0 für $GEH = 10$ liegen.

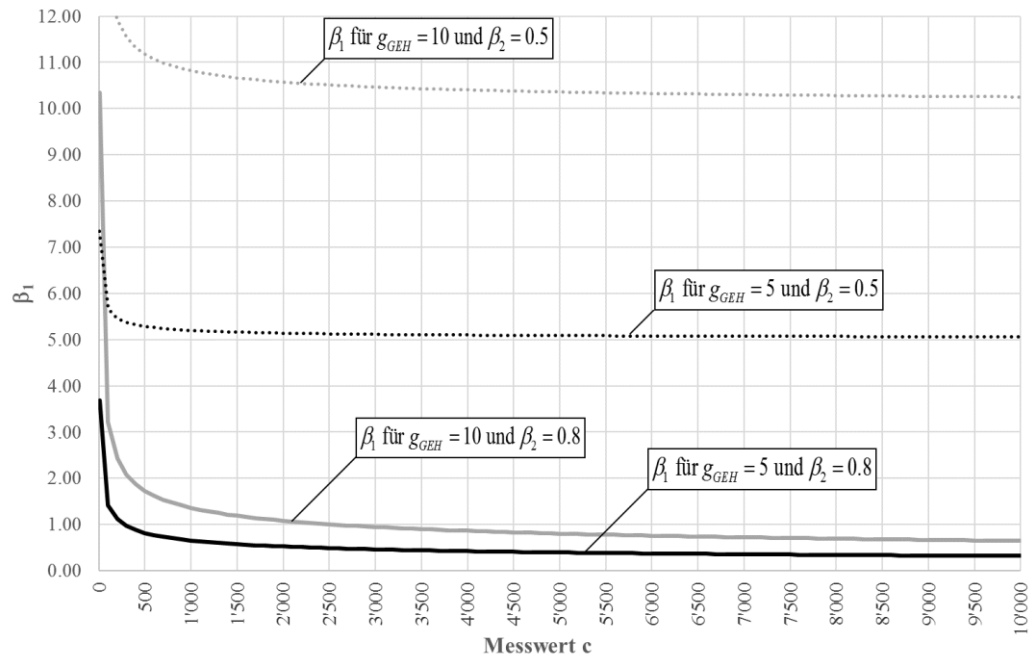


Abb. 55 β_1 -Werte für GEH 5 und 10 und für $\beta_2 = 0.5$ und $\beta_2 = 0.8$

Fazit zum Zusammenhang zwischen GEH und Normalverteilung

Die zulässigen Modellwerte m stimmen für den GEH und die Normalverteilung überein, wenn die Standardabweichung in der Form $\sigma(c) = c^{\beta_2}$ beschrieben werden kann. Mit dem β_2 -Wert kann dann β_1 berechnet werden:

$$\beta_1(c) = \frac{\sqrt{g_{GEH}^2 \cdot (16 \cdot c + g_{GEH}^2) + g_{GEH}^2}}{4c^{\beta_2}}$$

Dieser β_1 -Wert kann als Konfidenzkoeffizient z interpretiert werden:

$$m_{GEH}^+(c) = m_{ND}^+(c) = c + z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c) = c + \beta_1 \cdot c^{\beta_2}$$

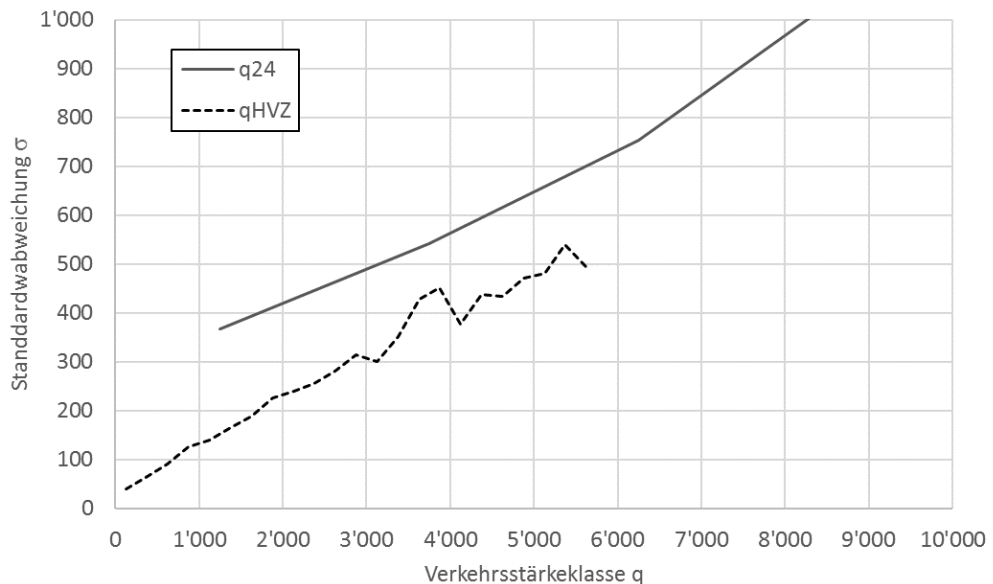
Abb. 55 zeigt, dass typische β_2 -Werte zu einem Konfidenzkoeffizient führen, der bei etwa 0.5 für einen GEH von 5 und bei etwa 1.0 für einen GEH von 10 liegt. Ein GEH von 5 fordert dementsprechend eine maximale Abweichung der Modellwerte, die kleiner als die halbe Standardabweichung ist. Bei einem GEH von 10 ist eine maximale Abweichung der Modellwerte zulässig, die kleiner als die Standardabweichung ist.

Alternativ kann jeder GEH-Wert als ein Wert interpretiert werden, der einer bestimmten Standardabweichung für einen vorgegebenen Konfidenzkoeffizient z entspricht:

$$g_{GEH} \approx \frac{z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma(c)}{c^{0,5}}$$

Um den GEH an beobachtete Standardabweichungen anzupassen, muss der GEH Wert verändert werden. Ein höherer GEH-Wert kann dann akzeptiert werden, wenn die Standardabweichung grösser ist als $\sigma(c) > \sqrt{c}$.

Für Verkehrsstärken bedeutet das, dass ein höherer *GEH*-Wert für Tageswerte im Vergleich zu Stundenwerten dann akzeptiert werden kann, wenn die Standardabweichung der Tageswerte bei gleichem Messwert grösser ist als beim Stundenwert. Eine Auswertung von 400 Dauerzählstellen in der Schweiz¹⁰ zeigt, dass es diesen Zusammenhang hier gibt. Abb. 56 zeigt die Standardabweichung für die tägliche Verkehrsstärke (*q*₂₄) und die Verkehrsstärke in der Spitzenstunde (*q*_{HVZ}). Dargestellt ist die mittlere Standardabweichung für Verkehrsstärkekassen.



Verkehrsstärkekassen <i>q</i> ₂₄ :	Klassenbreite 2'500
Verkehrsstärkekassen <i>q</i> _{HVZ} :	Klassenbreite 250

Abb. 56 Zusammenhang zwischen der täglichen Verkehrsstärke (*q*₂₄), der Verkehrsstärke in der Spitzenstunde (*q*_{HVZ}) und Standardabweichung bei 400 Dauerzählstelle in der Schweiz.

Der Zusammenhang zwischen der Standardabweichung und der Verkehrsstärke kann für die 400 Schweizer Zählstellen wie folgt beschrieben werden:

$$\sigma_{q_{24}}(q_{24}) \approx q_{24}^{0.77} \quad R^2 = 0.91$$

$$\sigma_{q_{HVZ}}(q_{HVZ}) \approx q_{HVZ}^{0.72} \quad R^2 = 0.98$$

Ein Vergleich der Exponenten 0.77 bzw. 0.72 mit dem Exponenten 0.5 beim Zusammenhang zwischen GEH und Standardabweichung $\sigma(c) \approx \frac{1}{z_{1-\alpha/2}} \cdot g_{GEH} \cdot c^{0.5}$ bietet eine wei-

tere Begründung dafür an, dass der GEH bei grösseren Zählwerten erhöht werden muss. Der GEH nimmt mit einem Exponenten 0.5 eine geringere Standardabweichung an als die beobachteten Standardabweichungen an den Zählstellen. Bei Dauerzählstellen auf deutschen Autobahnen konnten allerdings keine deutlichen Unterschiede der Exponenten zwischen Stunden- und Tageswerten festgestellt werden.

¹⁰ Volumendaten für das Jahr 2012 der Schweizerischen automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ). Das Messstellennetz umfasst die wichtigsten Strassenverbindungen der Schweiz.

Umgang mit kleinen Stichproben

Mit der Ausnahme von Dauerzählstellen kann bei verkehrlichen Kenngrößen meist nicht die Grundgesamtheit (alle Tage, alle Einwohner) erfasst werden. Der erforderliche Umfang einer Stichprobe kann bei Vorgabe eines relativen Fehlers mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$n = \frac{z^2 \cdot V^2 \cdot N}{z^2 \cdot V^2 + (N-1) \cdot r_s^2}$$

mit

N	Umfang der Grundgesamtheit
z	Konfidenzoeffizient für ein Signifikanzniveau α
r_s	maximaler relativer Stichprobenfehler (Konfidenzintervall der Stichprobe)
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit
V	Variationskoeffizient = σ / μ

Wird die Formel nach dem relativen Fehler aufgelöst, ergibt sich folgende Formel:

$$r_s = z \cdot V \sqrt{\frac{(N-n)}{(n \cdot N - n)}}$$

Diese Formel ermöglicht es, die Stichprobengröße beim Vergleich vom Messwert und Modellwert einzubeziehen.

Vorschlag für die Bewertung von Verkehrsstärken und personenbezogenen Mobilitätskenngrößen

Ausgangspunkt der Bewertung ist ein Messwert c für den der Erwartungswert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient vorliegen. Für diesen Messwert soll die Güte des Modellwerts m mit dem Gütemass SQV ermittelt werden.

gegeben:

c	Messwert
$\sigma(c)$	Standardabweichung des Messwerts
$V(c)$	Variationskoeffizient des Messwerts
m	Standardabweichung
f	Skalierungsfaktor

Schritt 1: Ermittlung Gütemass SQV

Das Gütemass wird wie oben beschrieben mit der folgenden Formel bestimmt.

$$a = |m - c|$$

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

Liegt das Gütemass über einem vorgegeben Wert (0.90 oder 0.85) ist eine angemessene Güte nachgewiesen.

Schritt 2: Berücksichtigung grosser Standardabweichungen

Weist der Messwert eine Standardabweichung auf, die grösser ist als die implizite Standardabweichung des GEH bzw. des SQV, dann erfolgt der Gütenachweis mit einem korrigierten Messwert c^* . Die implizite Standardabweichung errechnet sich mit folgender Formel:

$$\sigma_{SQV}(c) \approx \frac{(1 - g_{SQV})\sqrt{f}}{g_{SQV}} \cdot c^{0,5}$$

Diese Formel ergibt sich aus den oben dargestellten Zusammenhängen:

$$\sigma_{SQV}(c) \approx \sigma_{GEH}(c) \approx g_{GEH} \cdot c^{0,5} \approx g_{MGEH} \cdot c^{0,5} = \frac{(1 - g_{SQV})\sqrt{f}}{g_{SQV}} \cdot c^{0,5}$$

Die Differenz zwischen der tatsächlichen und der impliziten Standardabweichung wird nun genutzt um den Messwert so zu korrigieren, dass der Messwert erhöht wird.

$$c^* = c + \text{MAX}(0; \sigma_c(c) - \sigma_{SQV}(c))$$

Mit dem korrigierten Messwert c^* wird nun erneut das Gütemass SQV ermittelt. Dabei bleibt die absolute Abweichung $a = |m - c|$ unverändert, um sicherzustellen, dass der Modellwert keinen Einfluss auf das Ergebnis hat.

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

Schritt 3: Berücksichtigung des Stichprobenfehlers

Bei Messwert, die nicht den Mittelwert der Grundgesamtheit, sondern den Mittelwert einer Stichprobe darstellen, wird nun der relative Stichprobenfehler ermittelt. Dabei muss der Konfidenzkoeffizient z festgelegt werden. Für die Ermittlung der Modellgüte wird ein Konfidenzkoeffizient $z=1.0$ vorgeschlagen, was einem Signifikanzniveau von 0.317 entspricht, d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.317 ist der wahre relative Fehler grösser.

$$r_s = z \cdot V(c) \cdot \sqrt{\frac{(N-n)}{(n \cdot N - n)}} \quad \xrightarrow{\text{mit } z=1} \quad r_s = V(c) \cdot \sqrt{\frac{(N-n)}{(n \cdot N - n)}}$$

Mit dem relativen Stichprobenfehler wird dann eine weitere Korrektur des Messwerts durchgeführt und dann erneut das Gütemass SQV berechnet.

$$c^{*S} = c^* (1 + r_s) \quad g_{SQV}^{*S} \quad (\text{Berücksichtigung Stichprobenfehler})$$

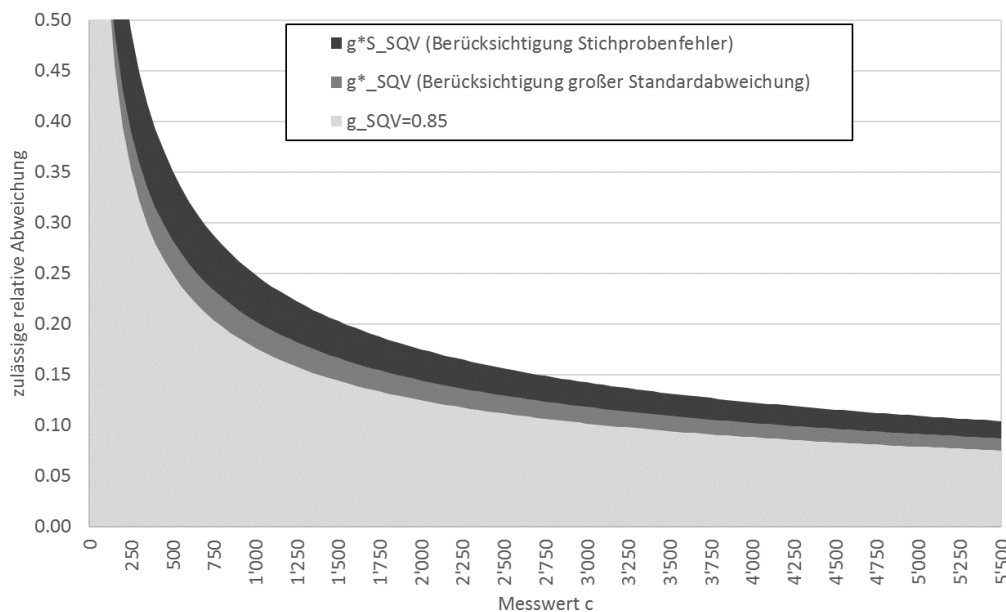
$$g_{SQV}^{*S} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c^{*S}}}} \quad g_{SQV}^* \quad (\text{Berücksichtigung grosser Standardabweichungen})$$

$$g_{SQV} = 0.85$$

Beispiel

Abb. 57 zeigt ein Beispiel für die Zusammensetzung der zulässigen relativen Abweichung für Messwerte der stündlichen Verkehrsstärke ($f=1'000$) an Werktagen ($N=250$ Tage pro Jahr). Die zulässige relative Abweichung umfasst drei Bestandteile:

- Relative Abweichung aus dem Gütemass $SQV=0.85$. Die dargestellten Abweichungen entsprechen einem GEH von ca. 5.4.
- Relative Abweichung bei der Berücksichtigung grösserer Standardabweichungen. Im Beispiel wird angenommen, dass die Standardabweichung mit $\sigma(c) = c^{0.9}$ grösser ist als die implizite Standardabweichung des SQV . Die dargestellten Abweichungen entsprechen einem GEH von ca. 6.2.
- Relative Abweichung aus dem Stichprobenfehler. Im Beispiel wird angenommen, dass der Messwert an einem Tag erhoben wurde ($n=1$). Die dargestellten Abweichungen entsprechen einem GEH von ca. 7.4.



Annahmen	$\sigma(c) = c^{0.9}$	$N = 250$
	$f = 1'000$	$n = 1$
	$g_{SQV} = 0.85$	

Abb. 57 Zulässiger relativer Fehler für ein $g_{SQV} = 0.85$ bei zusätzlicher Berücksichtigung einer grösseren Standardabweichung und eines Stichprobenfehlers.

Entwicklung eines Gütekriteriums für die Fahrzeit zwischen zwei Punkten im Netz

Es wird angenommen, dass die Forderung, gemäss der die relativen Abweichungen zwischen einem Mess- und Modellwert mit zunehmendem Betrag des Messwertes abnehmen, auch für die Fahrzeit zwischen zwei Punkten im Netz gilt.

Für GEH - oder SQV -Wert gilt, dass die absolute Abweichung, im Gegensatz zur relativen Abweichung, mit zunehmendem Wertebereich steigt. Für eine Fahrzeit zwischen zwei Punkten ist diese Forderung jedoch nicht zielführend. Eine beständig steigende absolute Abweichung ist eher als Indiz für einen fehlerhaften globalen Parameter zu sehen, z.B. eine zu hohe Geschwindigkeit, die zu einer zu niedrigen Reisezeit führt. Während für kurze Distanzen eine Zunahme der absoluten Abweichung ggf. noch zulässig ist, sollte ab einer gewissen Distanz eine Obergrenze der zulässigen absoluten Abweichung nicht mehr überschritten werden. Abb. 54 enthält einen Vorschlag für die Überprüfung gemessener und modellierter Fahrzeiten, der für Fahrzeiten in einem Zeitintervall (z.B. Hauptverkehrszeit) gilt:

- Mindestens 50% der untersuchten Relationen sollen folgende Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Fahrzeiten einhalten:

- Abweichung zwischen 2 bis 5 min im Distanzbereich bis 20 km.
- Abweichung um maximal 5 min im Distanzbereich über 20 km.
- Mindestens 90% der untersuchten Relationen sollen folgende Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Fahrzeiten einhalten:
 - Abweichung zwischen 5 bis 10 min im Distanzbereich bis 20 km.
 - Abweichung um maximal 10 min im Distanzbereich über 20 km.

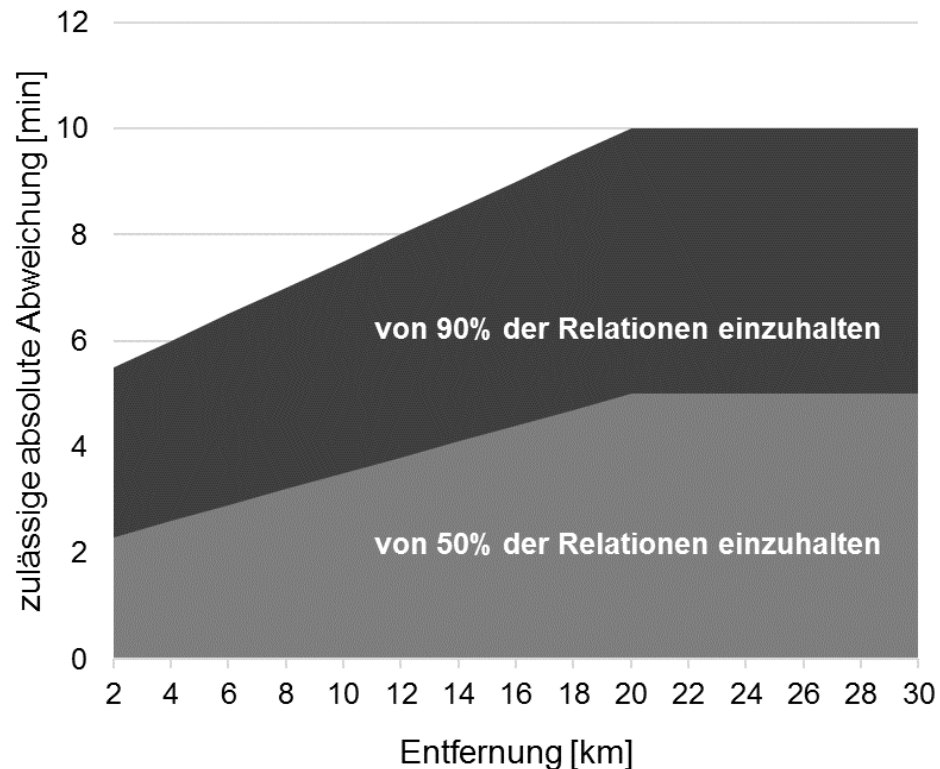


Abb. 58 Zulässige absolute zeitliche Abweichung in Abhängigkeit zur Fahrtweite im Netz.

Ja / Nein-Test

In die Klasse der Einzelwerte fallen auch Aussagen, für die mit einem Ja / Nein-Test überprüft wird, ob eine Anforderung erfüllt wird. Tab. 14 zeigt Beispiele für Ja / Nein Tests.

Tab. 14 Beispiele für Ja / Nein Tests.

Test	Beispiel
Liegt ein Wert im erwarteten Wertebereich?	• Liegt das Reisezeitverhältnis ÖV / PW auf allen Relationen im zu erwartenden Bereich (z.B. zwischen 0.5 und 10)? • Liegen die Parameter für die Mobilitätsrate in einem Bereich, der aus anderen Erhebungen bekannt ist?
Erfüllt das Modell die geforderten Konvergenzbedingungen?	• Werden bei einer Gleichgewichtsumlegung und bei einer Rückkopplung zwischen Umlegung und Nachfrageberechnung die vorgegebenen Konvergenzmasse eingehalten?
Erfüllt das Modell die geforderten Konsistenzbedingungen?	• Ist für alle Zellen erfüllt, dass die Zahl der Wege, die innerhalb eines Tages in der Zelle beginnen und enden, identisch ist? • Verteilen sich die Wege zur Arbeit gleichmässig auf die angebotenen Arbeitsplätze?

6.1.2 Aussagen zu Mengen von Einzelwerten

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. Siehe auch Abschnitt 3.2.2.

6.1.3 Aussagen zu Verteilungen

Bei der Arbeit mit makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden häufig Kenngrössenverteilungen verwendet. Mit ihnen lässt sich die Aufteilung der Nachfrage in mehrere diskrete Klassen analysieren und bei Vorliegen eines geeigneten Referenzdatensatzes sind Verteilungen ein wichtiges Werkzeug der Modellvalidierung. Die häufigsten Anwendungsfälle für Verteilungen sind Reiseweiten- oder Reisezeitverteilungen, wobei auch die Klassierung anhand anderer Kenngrössen denkbar ist.

Trotz der häufigen Anwendung und der Wichtigkeit von Verteilungen gibt es in gängigen Modellierungsrichtlinien (z.B. [20], [18] oder [71]) nur wenige Hinweise über den konkreten und korrekten Umgang mit ihnen. Für eine Qualitätsprüfung müssen Regeln für folgende Fragen gefunden werden:

- Welche Klassierungskenngrösse ist zu verwenden?
- Betrifft die Auswertung den gesamten Untersuchungsraum oder nur Teilräume?
- Wie viele Klassen gibt es, wie breit sollten diese sein und ändert sich die Klassengrösse mit zunehmender Entfernung?
- Wie ist mit unbesetzten Klassen zu verfahren?
- Welches Gütemass ist für den Vergleich zweier Verteilungen heranzuziehen?

Wahl der Klassierungskenngrösse

Für eine Einteilung der Nachfrage in diskrete Klassen werden relationsbezogene Kenngrössen des Verkehrsnachfragemodells benötigt. Die Herausforderung ist, dass sich die Kenngrössen einer Quelle-Ziel-Relation für jeden Modus unterscheiden. Eine mögliche Lösung besteht darin, dass für jeden Modus die zugehörige Kenngrössenmatrix als Klassierungskenngrösse herangezogen wird. Der Nachteil dieser Lösung: es kann bei diesem Vorgehen dazu kommen, dass die Nachfrage unterschiedlicher Modi für die gleiche Relation in unterschiedlichen Verteilungsklassen auftritt. Ein einfaches Beispiel in Abb. 59 soll das verdeutlichen. Die abgebildete Reisezeitverteilung zeigt, dass die Nachfrage von PW und Fussgänger unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden, obwohl es sich um die gleiche Relation handelt.

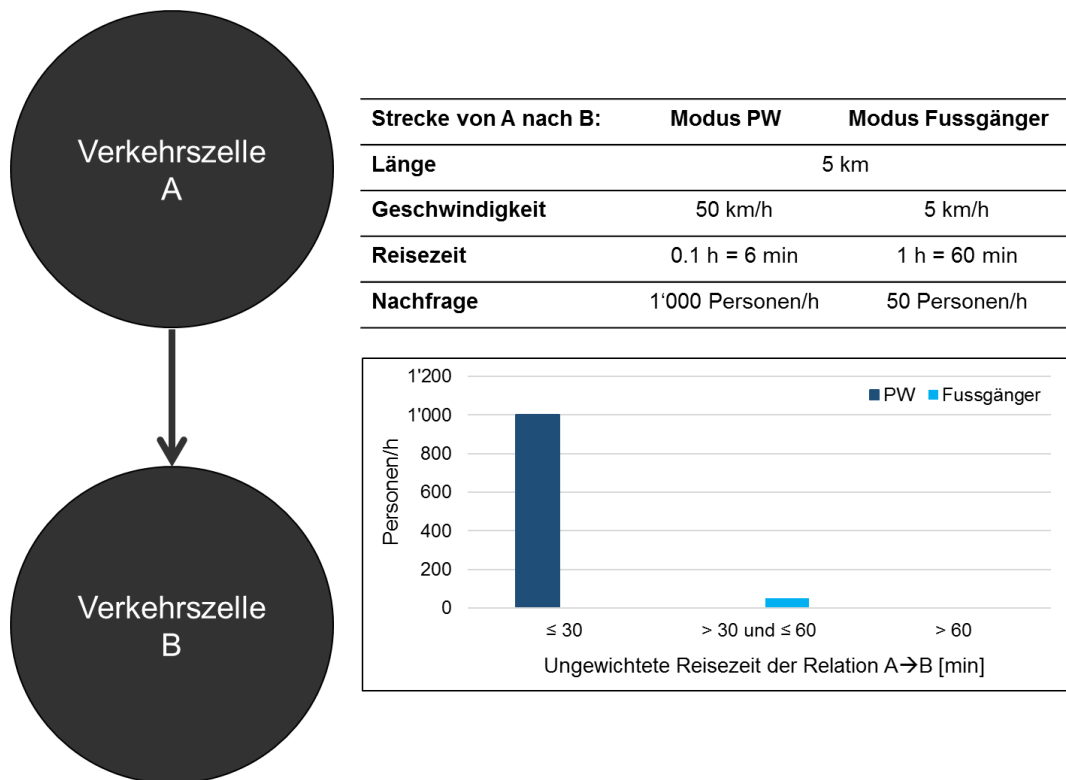


Abb. 59 Wahl einer modusspezifischen Klassierungskenngrösse.

Die Frage nach der Klassierungskenngrösse ist somit nicht zuletzt eine Frage, wie die Auswertungsergebnisse zu interpretieren sind: ein relationsbezogener Modal Split lässt sich mit modusspezifischen Kenngrössen nicht ablesen.

Für eine solche Auswertung wird eine Kenngrösse benötigt, die für alle Modi identisch ist. Im Fall eine Reiseweitenverteilung ist dies die Luftlinienweite. Für die Reisezeit existiert jedoch zunächst keine solche modusübergreifende Kenngrösse. Abhilfe schafft hier eine mit der Nachfrage gewichtete Kenngrösse. Das Beispiel in Abb. 60 zeigt, wie eine mittlere gewichtete Reisezeit für die abgebildete Relation bestimmt werden kann und eine daraus resultierende Verschiebung der Fussgängernachfrage in die erste Klasse.

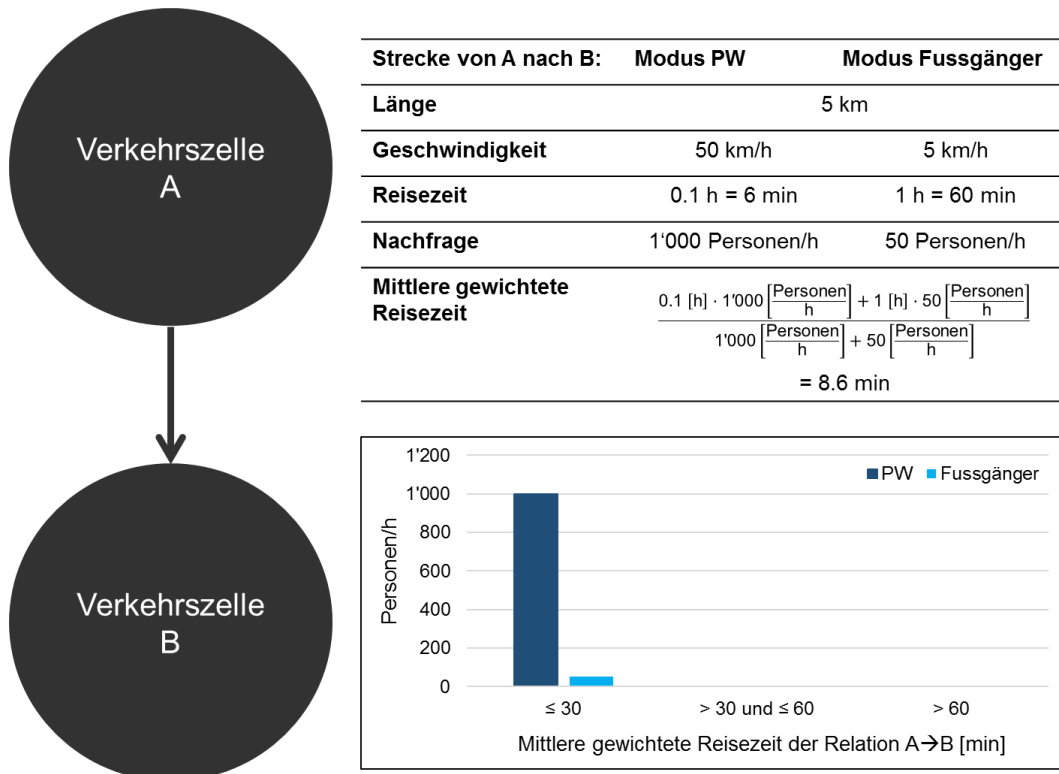


Abb. 60 Wahl einer modusübergreifenden Klassierungskenngrösse.

In Tab. 15 werden die erläuterten Optionen bei der Wahl der Klassierungskenngrösse dargestellt.

Tab. 15 Optionen bei der Wahl der Klassierungskenngrösse.

	Reiseweite	Reisezeit
Modusspezifische Kenngrösse	Modusspezifische Reiseweite	Modusspezifische Reisezeit
Modusübergreifende Kenngrösse	- Luftlinienweite oder - Mittlere gewichtete Reiseweite	Mittlere gewichtete Reisezeit

Bei der Wahl der Klassierungskenngrösse ist zudem zu beachten, ob bei der Kenngrössenberechnung die Anbindungen enthalten sind und ob der Zellbinnenverkehr klassifiziert werden soll. Anbindungen sind eine Modellannahme für den Teil des Weges im nicht modellierten Streckennetz. Sobald jedoch ein Vergleich von zwei Verteilungen stattfindet, gibt die Referenzgrösse (z.B. eine Erhebung) vor, wie mit den Anbindungen umgegangen werden soll. Folgende Möglichkeiten für den Umgang mit Anbindungen sind denkbar:

- Die Berücksichtigung der Anbindungen ist sinnvoll, wenn die Referenzerhebung Wege von Haustür zu Haustür widerspiegelt und somit auch Wege innerhalb der Verkehrszellen protokolliert wurden.
- Die Berücksichtigung der Anbindungen ist nicht sinnvoll, wenn nur die Teilwege im Streckennetz betrachtet werden. Beim Vergleich von zwei Modellverteilungen kann es sich beispielsweise anbieten, nur die im Streckennetz umgelegten Wege zu betrachten.

In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden die Kenngrössen und die Nachfrage für Relationen in Matrizenform vorgehalten. Die Hauptdiagonale der Matrix bildet dabei den Zellbinnenverkehr oder intrazonalen Verkehr ab. Dieser Teil der Nachfrage wird nicht im Netz umgelegt, er weist somit also keine vom Modell bestimmten Kenngrössen (Reisezeit, Reiseweite etc.) auf. Um dennoch eine Nachfrageberechnung durchführen zu

können, werden für die intrazonalen Verkehre geeignete Kennwerte festgelegt, die einer mittleren Ortsveränderung innerhalb einer Verkehrszelle entsprechen. Wenn die Erhebungswerte georeferenziert und nicht verkehrszellenfein vorliegen, werden die Kenngrößen der Hauptdiagonalen nicht den Erhebungswerten entsprechen. Somit kommt es vor allem in den Klassen des Nahbereichs – die Hauptdiagonale verwendet meist kleine Kenngrößen, da diese ja eine Ortsveränderung in der Zelle repräsentieren – zu grösseren Abweichungen, was u.a. zu einer schlechten Verteilungsübereinstimmung führen kann.

Es empfiehlt sich daher, die Hauptdiagonale in Verteilungen nicht zu berücksichtigen. Dies entbindet den Modellersteller natürlich nicht von der Pflicht, in einer gesonderten Auswertung den Zellbinnenverkehr zu validieren. Dafür sind z.B. Analysen der Wegeanzahl im intrazonalen Verkehr und des zellinternen Modal Splits geeignet. Eventuell bietet sich auch eine getrennte Betrachtung für unterschiedliche Zellengrößen an.

Ein weiterer Aspekt bezüglich der Kenngrössenauswahl ist die Güte der Erhebungsdaten. Angaben (insbesondere Zeitdauern) aus Befragungen sind häufig gerundet, was zu einer Häufung von «glatten» Werten führt. Eine Verteilung mit diesen gerundeten Angaben zu erstellen ist nur bedingt sinnvoll. Aus diesem Grund ist es unbedingt notwendig, dass die Aktivitäten aus Befragungen geocodiert vorliegen. Mithilfe dieser räumlichen Zuordnung lassen sich für die berichteten Wege «realistischere» Kenngrößen aus einer anderen Datenquelle oder einem Verkehrsnachfragemodell zuspielen.

Definition des zu analysierenden Raumes

Bei der Qualitätssicherung werden beobachtete und modellierte Verteilungen für einen Raum ermittelt und verglichen. In der Regel werden die beobachteten Verteilungen aus Haushaltsbefragungen mit Mobilitätstagebüchern abgeleitet. In diesen Haushaltsbefragungen werden auch Wege erfasst, die ausserhalb des Untersuchungsraums stattfinden. Es ist daher sicherzustellen, dass die Wege, die für die Verteilung betrachtet und verglichen werden, sich auf den gleichen Raum beziehen. Konkret bedeutet dies, dass nur Wege von Einwohnern des Untersuchungsraumes untersucht werden können, die ihre Quelle und ihr Ziel in Untersuchungsraum haben. Da makroskopische Verkehrsnachfragemodelle keine Informationen über die Verkehrsteilnehmer vorhalten, können ausserdem nur heimatgebundene Wege für die Untersuchung herangezogen werden. Zum Beispiel können Modellwege vom Wohnen zur Arbeit konkret mit Erhebungsdaten verglichen werden, während Modellwege vom Einkaufen zur Freizeit nicht zwangsläufig von Einwohnern des Untersuchungsraumes getätigt wurden.

Gibt es im Untersuchungsraum bestimmte Teilräume, denen eine besondere Bedeutung zukommt, so können zusätzlich auch Auswertungen für diese Teilräume durchgeführt werden. Das wird in der Regel der Planungsraum sein, es sind aber auch Auswertung für Gebietstypen denkbar, selbst wenn diese nicht räumlich verbunden sind, z.B. für Verkehre von Personen in urbanen und in ländlichen Räumen.

Wahl der Referenzverteilung

Generell lassen sich bei der Wahl der Referenzverteilung zwei Fälle unterscheiden:

- Als Referenz dient eine Erhebung (z.B. Haushaltsbefragung): Das ist der Fall bei der Validierung eines Verkehrsnachfragemodells oder bei Durchführung von Sensitivitätstests zur Überprüfung des Modellverhaltens.
- Als Referenz dient der Basiszustand eines Verkehrsnachfragemodells: Das ist dann der Fall, wenn das Modellverhalten im Zuge von Realitätstests validiert werden soll. Der Basiszustand bezieht sich dabei jeweils auf die entsprechende Anwendung, also Analyse-Nullfall oder Prognose-Nullfall entsprechend der durchgeführten Tests.

Für eine detailliertere Erläuterung zu den Themen Validierung der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit Sensitivitätstests und Realitätstests sei an dieser Stelle auf Kapitel 6.2 verwiesen.

Verteilungsklassierung

Klassenbreite vs. Klassenbesetzung

Meist werden die Verteilungsklassen so bestimmt, dass eine Klassenbreite und eine Klassenanzahl vorgegeben werden. In die sich daraus ergebenden Klassen wird die Nachfrage anhand einer Klassierungskenngrösse (Entfernung oder Zeit) eingeordnet. Ist die Klassenbreite hierbei über alle Verteilungsklassen gleichgross (und die Klassenanzahl im Extremfall unendlich), wird von einer „äquidistanten“ Verteilung gesprochen. Häufig werden jedoch die grösseren und nicht ausreichend besetzten Klassen zusammengefasst, sodass sich eine Skalierung mit unterschiedlich breiten Klassen ergibt.

Ein gegensätzlicher Ansatz gibt die Nachfragemenge in der Klasse vor und bestimmt daraus die Klassenbreite. Die entstehenden Klassen sind somit unterschiedlich breit, sie weisen jedoch alle die gleiche Besetzung auf. Diese Methode der Verteilungsklassierung wird als „äquiquantil“ bezeichnet.

Bei der äquidistanten Klassierung gibt es drei Fragen, die im Vorfeld beantwortet werden müssen:

- Wie breit sind die Klassen?
- Wie viele Klassen soll es insgesamt geben?
- Sollen Klassen zusammengefasst werden, und wenn ja ab welcher Klasse?

Dem gegenüber stellt sich bei der äquiquantilen Verteilung nur die Frage, nach der Anzahl der Klassen. Aus diesem Grund wird im Folgenden zunächst die äquiquantile Klassierungsmethode vorgestellt. Darauf aufbauend wird dann eine Vorgehensweise erläutert, mit der sich die Frage nach der Klassenbreite bei äquidistanten Verteilungen beantworten lässt.

Analysen mit gleich besetzten Klassen (äquiquantile Klassen)

Der Fokus bei dieser Klassierungsmethode liegt zunächst auf der Bestimmung der Klassengrenzen, mit denen sich dann gleich besetzten Klassen ergeben. Die Berechnung der Klassengrenzen erfolgt hierbei über gewichtete Quantile bzw. Perzentile, wobei die Kenngrössenmatrixelemente die Klassierungskenngrösse und die Nachfragematrixelemente das Gewicht darstellen. Für die Klassierung wird eine Funktion verwendet, die folgende Parameter erfordert:

- die zu klassifizierenden Kenngrössenwerte,
- die Nachfrage als Gewichtungskenngrösse und
- die gewünschten Quantile.

Die Funktion sortiert die Kenngrössenwerte zunächst aufsteigend. Die Nachfragewerte werden entsprechend der Kenngrössensortierung sortiert und die Quantile werden unter Berücksichtigung der Nachfragegewichtung berechnet.

Die gesuchten Klassengrenzen der Kenngrössen sind das Ergebnis einer linearen Interpolation zwischen den jeweiligen gewichteten diskreten Quantilen. Den sich ergebenden Klassen wird die Nachfrage zugeordnet. Das Ergebnis ist die klassierte äquiquantile Nachfrage.

Die Nachfrage pro Klasse kann von der gewünschten Besetzung abweichen. Dies kann u.a. folgende Ursachen haben:

- Eine diskrete Nachfrage muss sich nicht unbedingt komplett und gleichmässig auf alle Klassen verteilen lassen ($Nachfrage \bmod Klassenanzahl \neq 0$). Dies führt dazu, dass mindestens eine Klasse eine grössere Nachfrage beinhaltet als andere Klassen. Je kleiner die Grundgesamtheit, desto grösser werden die Abweichung von theoretisch gleichbesetzten Klassen. Entgegengesetzt wird dieser Effekt bei grösser werdender Grundgesamtheit abgeschwächt.

- Eine ungünstige Gewichtung, d.h. eine sehr starke Nachfrage auf einer Relation, kann ebenfalls zu einer Verzerrung führen, z.B. wenn die kürzeste Reiseweite eine 100-fach höhere Nachfrage hat als alle anderen Reiseweiten.
- Durch ein Runden der Klassengrenzen vor der Klassierung kann es zu Verschiebungen der Nachfrage zwischen benachbarten Klassen kommen.

Wie eingangs erwähnt, muss auch für die äquiquantile Klassierung eine Klassenanzahl definiert werden. Eine Einteilung der Nachfrage in 10%-Schritten, d.h. in zehn Klassen, ist hierbei zwar nur eine pragmatische Annahme, jedoch lässt sie sich z.B. gut mit dem dekadischen Zahlensystem begründen. In Abb. 61 ist eine beispielhafte Reiseweitenverteilung dargestellt. Es ist zu sehen, dass jeder Klasse die gleiche Anzahl an Wegen zugeordnet ist und der entstehende Graph somit einer approximierten Gerade entspricht.

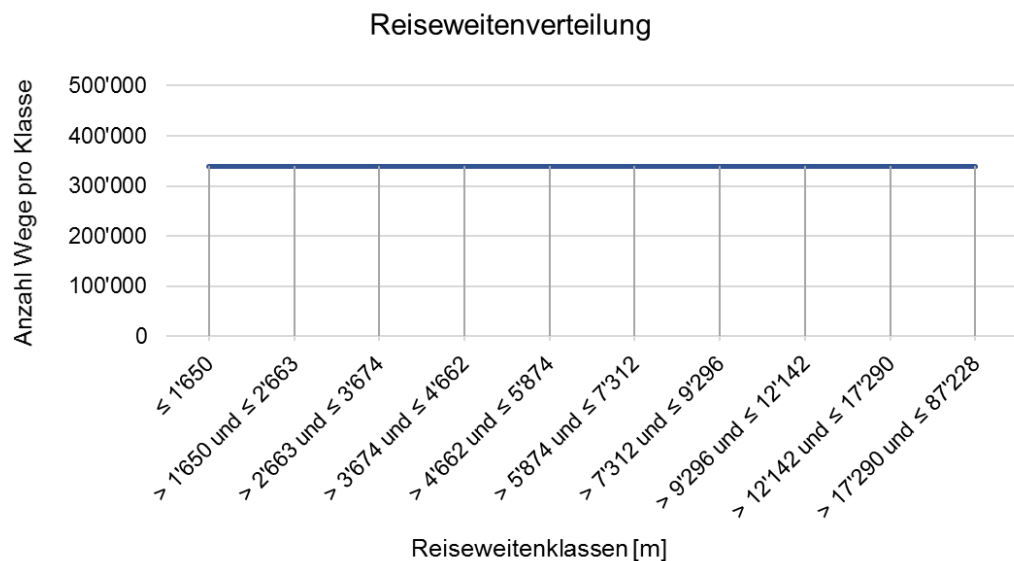


Abb. 61 Beispiel einer äquiquantilen Reiseweitenverteilung.

Klasseneinteilung für einzelne Nachfragesegmente

Nachfragesegmente stellen eine Teilmenge der Gesamtnachfrage dar. Häufig wird anhand des gewählten Modus segmentiert. Weitere Segmentierungen, z.B. anhand des Wegezweckes oder des Wegezwecks und des Modus werden zum Teil ebenfalls verwendet. Im Folgenden wird der Begriff Nachfragesegment synonym mit dem Begriff Modus verwendet.

Abhängig von der betrachteten Menge der Nachfrage auf den einzelnen Relationen ergeben sich unterschiedliche Klassenbreiten. So ist beispielweise die Klasseneinteilung für den Modus Fussgänger in kurzen Entfernungsbereichen viel differenzierter als für den Modus PW. Für den Vergleich von einem Nachfragesegment bei verschiedenen Szenarien bietet es sich daher an, die Skaleneinteilung einheitlich für das betrachtete Nachfragesegment vorzunehmen. Die Klasseneinteilung wird hierbei einmalig für die Referenz bestimmt und dann für alle Szenarien beibehalten.

In Abb. 62 ist z.B. die Reiseweitenverteilung des Modus PW für einen Realitätstest dargestellt, bei dem die Zahl der Einwohner um $\pm 10\%$ und $\pm 20\%$ verändert wird. Im Beispiel wird deutlich, dass im Fall mit weniger Einwohnern die Nachfrage, d.h. die Wegemenge, über alle Klassen zunächst sinkt, wobei aber in den niedrigen Entfernungsklassen tendenziell weniger und in den grösseren Entfernungsklassen tendenziell mehr Wege gemacht werden. Gegenteiliges gilt für den Fall mit mehr Einwohnern. Eine detaillierte Beschreibung dieses Realitätstests findet sich in Kapitel 8.6.1.

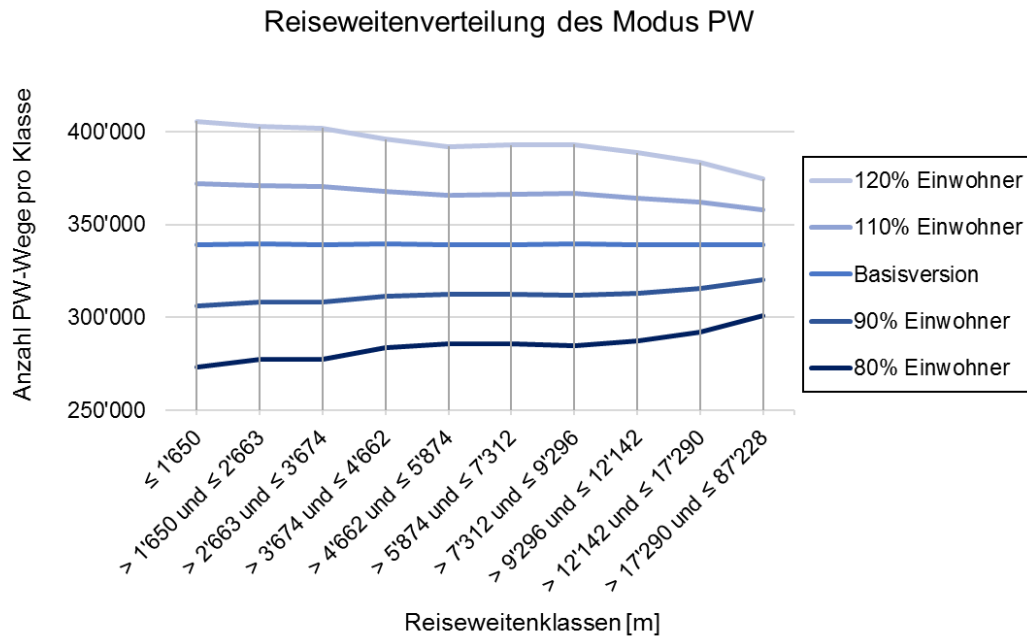


Abb. 62 Äquiquantile Reiseweitenverteilung für den Modus PW bei Änderung der Einwohneranzahl.

Klasseneinteilung für die Gesamtnachfrage

Analog zur Auswertung pro Nachfragesegment kann natürlich auch eine Auswertung der Gesamtnachfrage (d.h. die Nachfrage über alle Modi) erfolgen, um die Entwicklung der Gesamtnachfrage in den unterschiedlichen Verteilungsklassen zu analysieren.

Darüber hinaus können aber auch einzelne Nachfragesegmente mit der Klasseneinteilung der Gesamtnachfrage dargestellt werden. So kann ein entfernungsabhängiger Modal Split (Abb. 63) oder die Entwicklung einzelner Modi im Vergleich zur Gesamtnachfrage bei verschiedenen Szenarien (Abb. 64) dargestellt werden.

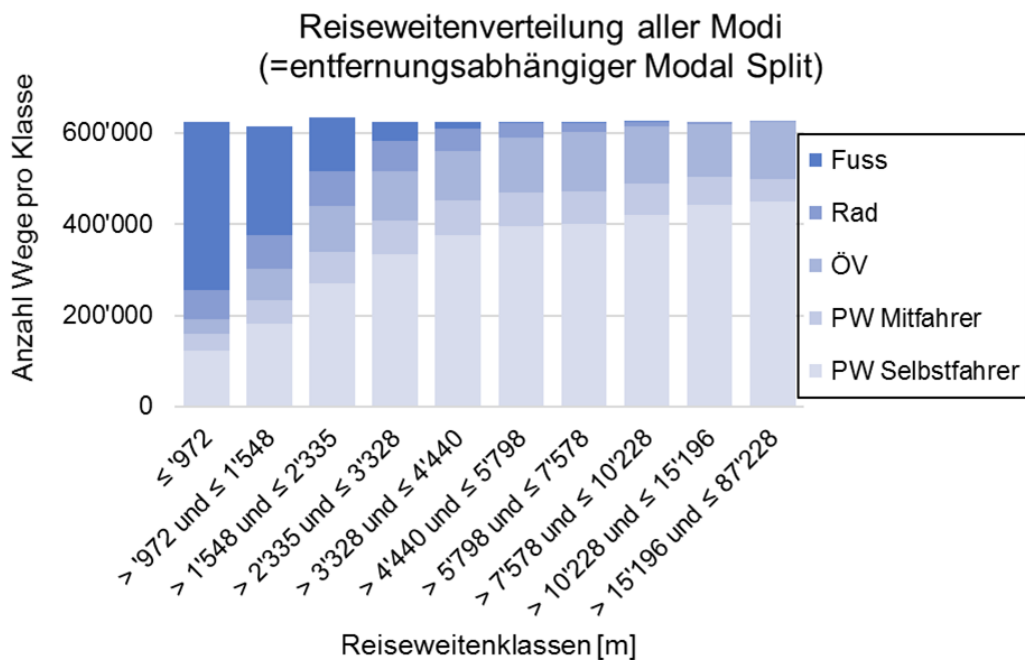


Abb. 63 Entfernungsabhängiger Modal Split.

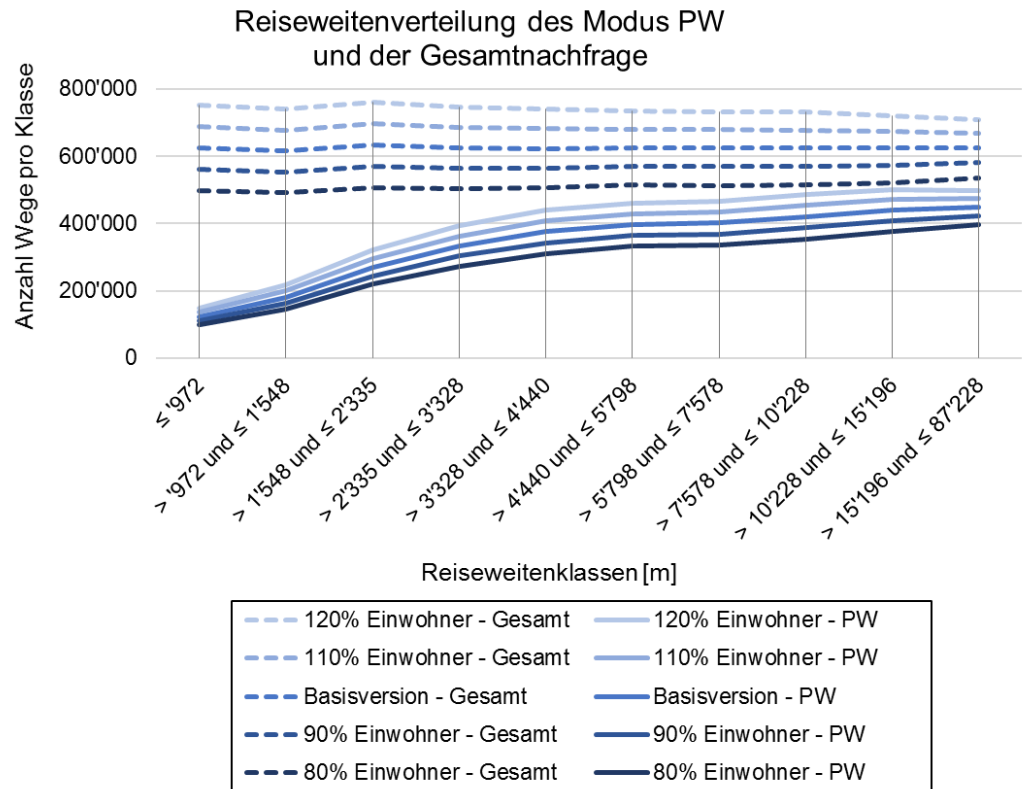


Abb. 64 Entwicklung des PW-Anteils gegenüber der Gesamtnachfrage.

Auswertung mit gleich breiten Klassen (äquidistante Klassen)

Wie bereits erwähnt, stellt sich bei äquidistanten Klassen vordergründig die Frage nach der Klassenbreite. Eine Methode die Klassenbreite zu bestimmen, ist, die kleinste Klasse der äquiquantil verteilten Gesamtnachfrage als Klassenbreite zu definieren. Diese Klassenbreite entspricht der kleinsten Klasse, die 10% der Gesamtnachfrage enthält. Die Klassenanzahl ist bei einer reinen äquidistanten Verteilung nicht von Belang, d.h. es werden so viele gleich breite Klassen erzeugt, bis die grösste Klassierungskenngrösse erreicht ist. In diesem Fall stellen auch leere Klassen kein Problem dar – sie bleiben entsprechend leer.

Als Abwandlung der äquidistanten Klassierung kann die abschnittsweise äquidistante Klasseneinteilung gesehen werden. Hierbei werden die statistisch nicht abgesicherten, d.h. gering besetzten und zumeist grösseren Klassen zusammenfasst. Um diese Klassierungsmethode zu verwenden, müssen jedoch erneut die Fragen nach der Klassenanzahl, der Grösse der zusammengefassten Klassen und der Minimalbesetzung einer Klasse beantwortet werden. [71] gibt für diesen Fall Klassenbreiten vor:

- für Ballungsraumverkehre im Nahverkehrsbereich: 2 km bzw. 5 min,
- für Regional- und Fernverkehre: 5 km bzw. 10 min.

Empfehlungen zu Verteilungen

Aufgrund der in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Eigenschaften empfehlen sich der Theil'sche Ungleichheitskoeffizient $U_2(x, y)$ und das Abstandsmass nach Vortisch $\Delta(x, y)$ wegen ihrer differenzierten Betrachtungsmöglichkeiten – namentlich des systematischen Fehlers der Mittelwerte $U^M(x, y)$, des systematischen Fehlers der Varianzen $U^S(x, y)$, der Formähnlichkeit $\rho(x, y)$ und der Lageähnlichkeit $\theta(x, y)$. Für den Coincidence Ratio $CR(x, y)$ sprechen eine relative einfache Handhabung und konkrete Gütegrenzen [18].

Offen ist weiterhin die Frage, ob die Übereinstimmung mit relativen oder absoluten Häufigkeiten berechnet werden soll. Für relative Häufigkeiten spricht, dass Erhebungsergebnisse häufig nur als relative Werte verfügbar sind und dass die absolute Menge der produzierten Wege in der Regel nach der Modellstufe der Verkehrserzeugung geprüft wird.

Abb. 65 fasst die Empfehlungen zum Umgang mit Verteilungen im Rahmen der Qualitätssicherung zusammen.

Bestimmung von modusübergreifenden Klassierungskenngrößen für alle gewünschten Verteilungen
Empfehlungen

- für Reiseweitenverteilungen: Luftlinienweite.
- für Reisezeitverteilungen: Mittlere gewichtete Reisezeit

Festlegung der zu analysierenden Räume und Teilräume
Empfehlungen

- Es werden nur Räume betrachtet, die in der empirischen Datenbasis enthalten sind.
- Es werden nur Wege betrachtet, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben.
- Die Hauptdiagonale wird bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt und ist separat zu bewerten.

Festlegung der Referenzverteilung für den jeweiligen Anwendungsfall
Empfehlungen

- Für die Validierung der Modellierungsergebnisse oder des Modellverhaltens im Zuge von Sensitivitätstests: Verteilung aus einer Erhebung, wobei die Erhebung den zu analysierenden Raum abdecken muss.
- Für die Validierung des Modellverhaltens im Zuge von Realitätstests: Verteilung des Verkehrsnachfragemodells im Basiszustand.

Äquiquantilen (gleichbesetzten) Klassen
Empfehlungen

- Bestimmung von jeweils zehn Klassen für alle relevanten Nachfragesegmente **und** für die Gesamtnachfrage. Die Klassenbreiten sind entsprechend sinnvoll zu runden.
- Grafische Darstellung der Verteilungen in absoluter und relativer Form.
- Angabe der Lageparameter aus Kapitel 3.2.3
- Angabe von Qualitätsaussagen für die relativen Häufigkeiten mit der Anforderung an die Masszahl für die Überlagerung der Verteilungsflächen: $CR(x, y) \geq 0.7$

Optional:

- Qualitätsaussagen für die relativen Häufigkeiten mit den Anforderungen an die:
 - Masszahl für die Form- und die Lageähnlichkeit der Verteilungen (Abstandsmass nach Vortisch) $\Delta(x, y) \leq 0.3$,
 - Masszahl für den systematischen Fehler der Mittelwerte $U^M(x, y) \leq 0.2$,
 - Masszahl für den systematischen Fehler der Varianzen $U^S(x, y) \leq 0.2$.

Äquidistante (gleichbreiten) Klassen
Empfehlungen

- Bestimmung der Klassenbreite aus der kleinsten Klasse der äquiquantilen Verteilung der Gesamtnachfrage. Die Klassenbreite ist entsprechend sinnvoll zu runden. Die Klassenanzahl ist unbegrenzt.
 - Grafische Darstellung der Verteilungen in absoluter und relativer Form.
 - Angabe der Lageparameter aus Kapitel 3.2.3.
 - **Keine** Angabe von Qualitätsaussagen. Äquidistante Verteilungen sollten nur zu Darstellungszwecken erzeugt werden.
-

Abb. 65 Empfehlungen zu Verteilungen.

6.2 Vorgehensweise zur Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung bei der Nachfragemodellierung ist kein einmaliger Verfahrensschritt, sondern ein Prozess, der in alle Stufen der Modellerstellung eingebunden werden sollte. Abb. 66 gibt einen Überblick über den Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells, dessen Arbeitsschritte in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Dabei werden folgende Begriffe verwendet:

- **Verifizierung:**
Vorgang, bei dem eine unabhängige Person überprüft, ob zwischen Modellbesteller und Modellersteller vereinbarte Vorgaben tatsächlich umgesetzt wurden.
- **Überprüfung:**
Allgemeiner Begriff für die Kontrolle von Eingangsdaten und Ergebnisdaten.
- **Parametereinstellung:**
Festlegung der Modellparameter durch eine Schätzung oder einer Setzung.
- **Kalibrierung:**
Anpassen 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 Modelverhaltens mit geeigneten Gütemassen und Tests.

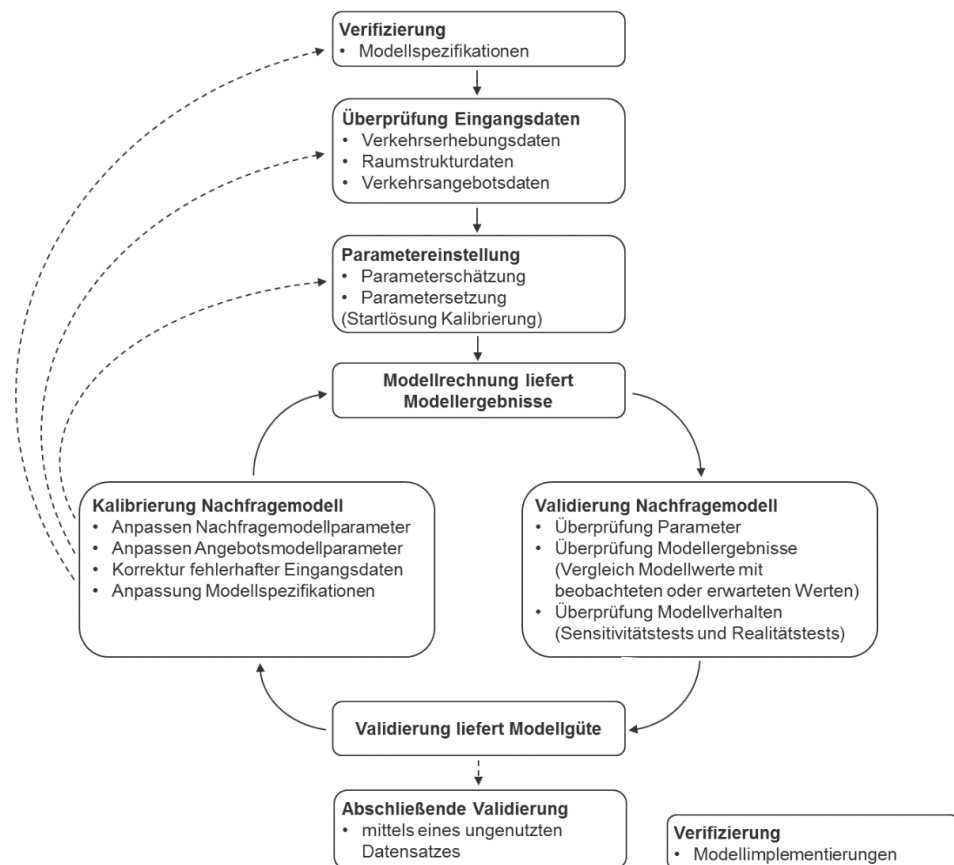


Abb. 66 Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: [67]).

6.2.1 Verifizierung

Im Rahmen der Modellerstellung kann die Prüfung der Modellspezifikation und der Modellimplementierung als Verifizierung bezeichnet werden.

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. Dabei ist besonders auf folgende Aspekte zu achten:

- Sind die Modellanforderungen und die benötigten Modellergebnisse ausreichend beschrieben?
- Ist der Modellraum ausreichend gross und die räumliche Segmentierung (Zellengrösse, abgebildetes Verkehrswegenetz) angemessen?
- Ist die Vorgehensweise zum Aufbau des Netzmodells angemessen?
- Ist die Segmentierung der Verkehrsnachfrage (Personengruppen, Wegezwecke) und der Verkehrsmittel bzw. Verkehrsmodi angemessen?
- Ist die zeitliche Segmentierung (Tagesmodell, Hauptverkehrszeiten, Stundenmodell) angemessen?
- Wird der Wirtschaftsverkehr auf geeignete Weise abgebildet?
- Sind die zugrundeliegende Modelltheorie (z.B. Aktivitätenkettenmodell oder Einzelwegmodell, synthetisches oder inkrementelles Modell) und die Modellannahmen benannt?
- Sind die Entscheidungsprozesse benannt, die mit dem Modell abgebildet werden können (Aktivitätenwahl, Zielwahl, Moduswahl, Abfahrtszeitwahl, Routenwahl)?
- Welche Rückkopplungen (z.B. zwischen Nachfrage und Angebot) sind vorgesehen?
- Sind die Kenngrössen der Angebotsqualität beschrieben, die in den Entscheidungsmodellen berücksichtigt werden? Können damit alle geforderten Massnahmen abgebildet werden?
- Ist die Vorgehensweise zur Kalibrierung der Modellparameter beschrieben und sinnvoll?
- Sind Massnahmen und Tests zur Qualitätssicherung beschrieben?
- Sind die Datenquellen für Verkehrserhebungsdaten, Raumstrukturdaten, Angebotsdaten und für externe Verkehre angegeben?
- Ist die technische Umsetzung beschrieben, d.h. mit welcher Software die Daten verwaltet und die Berechnungen ausgeführt werden? Sind bei der Berechnung manuelle Eingriffe erforderlich?

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.

6.2.2 Überprüfung der Modelleingangsdaten

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.

Verkehrserhebungsdaten

Verkehrserhebungsdaten gliedern sich in personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten und netzbezogene Daten, z.B. Verkehrsstärken oder Fahrzeiten. 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 Mobilität und Verkehr [17], MiD [48]).
- Angabe der Konfidenzintervalle für die Mobilitätskenngrössen für ein Konfidenzniveau von 95%.

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

Bei Zählraten sollte jeder Zählwert mit einem Gütemass bewertet werden. Zählraten aus einer Dauerzählstelle haben eine höhere Aussagekraft als Einmalzählungen, neuere Daten haben eine höhere Aussagekraft als ältere Daten. Für Dauerzählstellen sollte das Konfidenzintervall der Verkehrsstärke für ein Konfidenzniveau von 95% bestimmt werden.

Raumstrukturdaten

Folgende Kenngrößen der Raumstrukturdaten sollten ausgewiesen und überprüft werden:

- Siedlungsdichte (Einwohner bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Zellenebene,
- Verhältnis Erstwohnsitzanzahl zu Zweitwohnsitzanzahl,
- Arbeitsplatzdichte (Arbeitsplatzdichte bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Zellen-ebene,
- Verhältnis Arbeitsplätze pro Einwohner und Erwerbstätige pro Arbeitsplatz auf Gemeindeebene,
- Verhältnis Schüler pro Schulplatz auf Gemeindeebene,
- Vergleich der aggregierten Strukturdaten (Einwohner, Beschäftigte am Arbeitsplatz) auf Gemeindeebene mit Daten der statistischen Ämter,
- Vergleich der PW-Verfügbarkeit und des Motorisierungsgrades auf Verkehrszellenebene mit Daten der statistischen Ämter (Anzahl zugelassener Fahrzeuge, wobei hier die Anzahl gewerblich genutzter Fahrzeuge beachtet werden muss).

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

Für eine standardisierte Überprüfung wäre ein Leitfaden mit typischen Wertebereichen wünschenswert, so wie es beispielsweise das Dokument FSUTMS-Cube Framework Phase I und II [40; 39] für die USA bietet.

Verkehrsangebotsdaten

Verkehrsangebotsdaten lassen sich auf der Ebene der einzelnen Netzelemente und auf der Relationsebene überprüfen. Die Überprüfung der Angebotsdaten erfolgt zu einem Zeitpunkt, zu dem keine oder nur abgeschätzte Nachfragematrizen und Verkehrsstärken im Netz vorliegen. Deshalb sind nur Aussagen zu Fahrzeiten im unbelasteten Netz oder zu abgeschätzten Fahrzeiten möglich.

Auf der Ebene von Netzelementen können 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.
- Anzahl der Haltestellen je Verkehrszelle (z.B. maximal eine Schienenhaltestelle je Zelle).

Auch für Angebotsdaten bietet sich eine visuelle Prüfung mittels Kartendarstellung an. Das Strassennetz kann z.B. differenziert nach Geschwindigkeitsniveaus oder Fahrstreifenanzahlen dargestellt werden. Für das Netz im öffentlichen Verkehr kann eine streckenfeine Darstellung der angebotenen Fahrtenanzahl je Tag sinnvoll sein.

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

- Ist das Netz zusammenhängend, d.h. kann für jede Relation die Reisezeit berechnet werden?
- Luftliniengeschwindigkeit: Werte, die nach den Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN, 2008 [27]) als sehr gut oder sehr schlecht eingestuft werden, sollten überprüft werden.
- Umweltfaktor: 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 Normalverkehrszeit 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.
- Durchführung und Analysen von Testumlegungen z.B. mit einer 1er Matrix:
 - Die Verkehrsstärke im Netz sollte bei einer Bestwegumlegung in beiden Richtungen ähnlich sein.
 - Die Verkehrsstärken sollten in einem unabhängigen Netzmodell (z.B. Open Street Map) im Hauptstrassennetz ähnlich sein.

6.2.3 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 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 (vgl. z.B. Huelsenbeck et al. [47]) dokumentiert werden.
- Parametersetzung:
Parameter, die nicht empirisch erhoben werden können, müssen durch den Modellierer festgesetzt werden. Sinnvolle Wertebereiche der Parameter können der Literatur (z.B. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [18], FSUTMS-Cube Framework Phase I und II [39; 40], BVWP Axhausen et al. [2], Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK [63]) oder anderen Modellen entnommen werden.

6.2.4 Anpassen der Modellparameter, Eingangsdaten und Modellspezifikation

Mit den initialen Parametern wird ein erster Validierungsprozess gestartet. Aufbauend auf den Prüfungsergebnissen beginnt der eigentliche Kalibrierungsprozess, bei dem die Modellparameter angepasst, ggf. die Eingangsdaten korrigiert und die Modellspezifikation ergänzt wird. Anhand der beobachteten Abweichungen der Modellergebnisse müssen mögliche Ursachen identifiziert und Anpassungen im Modell vorgenommen werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Anpassung der Modellparameter der jeweiligen Modellstufe die

Ergebnisse der nachfolgenden Stufe beeinflusst. Entsprechend ist es sinnvoll, mit der Kalibrierung der Verkehrserzeugung zu beginnen, daraufhin die Zielwahl- und Moduswahl zu kalibrieren und mit der Umlegung abzuschliessen.

Wie in Abb. 66 dargestellt, kann die Überprüfung der Modellergebnisse im Rahmen der Validierung wiederholt Rückkopplungen zu vorangegangenen Stufen erforderlich machen, z.B.

- Überarbeitung Modellspezifikation: z.B. Einführen einer zusätzlichen Personengruppe.
- Korrektur Verkehrsangebotsdaten: z.B. Änderungen der Anbindungsknoten oder der Streckenkapazitäten.
- Parameterschätzung: erneute Schätzung der Parameter aufgrund veränderter Reisezeiten.

Auch die Überprüfung des Modellverhaltens, die i.d.R. erst nach Erreichen eines gewissen Gütemasses der Modellergebnisse erfolgt, kann zu den beschriebenen Rückkopplungen führen.

6.2.5 Überprüfung der Parameter

Als Ergebnis einer Parameterschätzung für Entscheidungsmodelle erhält man die 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, z.B. BVWP Axhausen et al. [2]. Diese Vorgehensweise kann 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. Das Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [18] enthält beispielsweise für die Verkehrsmoduswahl mit einem Logit-Modell Tabellen mit Wertebereichen für die Parameter Fahrzeit, Gehzeit und Kosten. Eine Übertragbarkeit auf europäische Modelle ist allerdings nur eingeschränkt möglich. Deshalb könnte ein Regelwerk hilfreich sein, dass Wertebereiche für Modelle im deutschsprachigen Raum ausweist. Aber auch dann muss berücksichtigt werden, dass der Wert eines Parameters von der Modellarchitektur, von der verwendeten Bewertungsfunktion (Exponentialfunktion, Potenzfunktion, Halbglockenkurven) und von der Gesamtanzahl der Parameter in der Nutzenfunktion abhängt.

6.2.6 Überprüfung der Modellergebnisse

In diesem Schritt werden mit dem Modell errechnete Werte und gemessene Werte mit geeigneten Gütemassen (siehe Abschnitt 3) 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 aggregiert und mit den berechneten Wegen verglichen:

- berechnete Zahl der Wege mit befragter Zahl der Wege,
- zellenfein berechnetes Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Zielwahl mit Quell- und Zielverkehrsaufkommen aus Strukturgrößen,
- berechnete Modal-Split Anteile der Verkehrsmoduswahl mit Modal-Split Anteilen aus Befragungen differenziert nach Entfernungsklassen,

- berechnete Reiseweiten- oder Reisezeitverteilung der Verkehrsverteilung mit Reiseweiten- oder Reisezeitverteilung, die aus Befragungen abgeleitet werden.

Die Wegedaten sollten für verschiedene Segmentierungen überprüft werden:

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

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

- berechnete Quelle-Ziel Reisezeiten mit gemessenen Reisezeiten für ausgewählte Relationen,
- berechnete Verkehrsstärken der Umlegung mit gezählten Verkehrsstärken an ausgewählten Zählstellen oder an Screenlines. Eine Screenline umfasst eine Menge von Strecken, die durch eine Polygonlinie definiert werden (z.B. alle Brücken über einen Fluss). Alle Strecken, die durch die Polygonlinie geschnitten werden, gehören zur Screenline. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer Screenline werden zu einer Screenline-Verkehrsstärke aufsummiert.

Tab. 16 zeigt beispielhaft und nicht vollständig einen Vorschlag, welche Kenngrößen überprüft werden sollten, welche Differenzierung räumlich und inhaltlich wünschenswert ist und welches Gütemass in Frage kommt. Neben Haushaltsbefragungen und Zählungen können Befragungen im ÖV (z.B. Linienbeförderungsfälle) und Reisezeitmessungen im Netz als Kontrolldaten herangezogen werden.

Tab. 16 Überprüfung von Kenngrössen der Nachfrage bei der Modellvalidierung.

	Kenngrösse	Differenzierung		Kontroll- daten	statistisches Gütemass
		inhaltlich	räumlich		
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege	• Grundgesamtheit	• gesamter UR		• Konsistenz produzierte und angezogene Wege
	mittlere Anzahl Wege pro Person	• alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg • pro Modus x NSeg	• gesamter UR • Teilräume	HH-Bef	• Gütemass SQV für $f = 1$
Verkehrsleistung	Wegeweitenverteilung [km] pro Person	• alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg	• gesamter UR	HH-Bef	• Mittelwert: Gütemass SQV für $f = 10$ • Wegeweitenverteilung: Coincidence Ratio
	mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person	• alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg	• gesamter UR	HH-Bef	• Gütemass SQV für $f = 10$
	Verkehrsleistung aller Personen [Personenkm]	• Modus ÖV • ÖV-Betriebszweige	• gesamter UR • Teilräume	ÖV-Erhebung	• relative Abweichung < 5%
Verkehrszeitaufwand	Wegezeitverteilung [min] pro Person	• alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg	• gesamter UR	HH-Bef	• Mittelwert: Gütemass SQV für $f = 30$ • Wegezeitverteilung: Coincidence Ratio
	mittlerer Verkehrszeitaufwand [h] pro Person	• alle Einwohner • pro Modus • pro NSeg	• gesamter UR	HH-Bef	• Mittelwert: Gütemass SQV für $f = 30$
Verkehrsstärke	tägliche und stündliche Verkehrsstärke	• PW • LW • Velo • Bus • Bahn	• Strecke • Abbieger • ÖV-Linienroute • ÖV-Linienroutenabschnitt • Haltestellen (Ein-, Aus-, Umsteiger) • Screenline	Zählung	• Tageswerte: Gütemass SQV für $f = 10'000$ • Stundenwerte: Gütemass SQV für $f = 1'000$
Fahrzeiten	Fahrzeiten zwischen zwei Punkten im Netz	• unbelastetes Netz • belastetes Netz für relevante Tageszeiten	• Streckenzug • Relationen	Fahrzeitmessung	• absolute Abweichungen nach Abb. 58
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.					

Bei Verkehrsnachfragemodellen, die im Rahmen der Modellerstellung für einen oder mehrere Modi eine Korrektur der Nachfragematrix durchführen, sollten die Kenngrössen vor und nach der Matrixkorrektur überprüft und die Änderungen dokumentiert werden. Nach der Matrixkorrektur sollte u.a. geprüft werden, ob die Konsistenz der produzierten und angezogenen Wege eingehalten ist und ob sich die Reisezeitverteilung geändert hat.

6.2.7 Überprüfung des Modellverhaltens

Sensitivitätstests - Überprüfung des Modells mit modifizierten Parametern

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. 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 (Unit 2) [19] 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 des 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, unbekannten Einflussgrößen beschreibt. Um die Bedeutung dieser Einflussgrößen zu ermitteln, sollten in einem Sensitivitätstest alle alternativenspezifischen Konstanten auf den Wert 0 gesetzt werden. Analog sollte auch ein Sensitivitätstest durchgeführt werden, bei dem mit Ausnahme der Konstanten alle Parameter auf 0 gesetzt werden. Dieser Prozess hat zur Folge, dass sehr gut sichtbar wird, welche Modellergebnisse nur durch die alternativenspezifischen Konstanten und welche Ergebnisse nur durch die im Modell genutzten Aufwände inkl. ihrer Parameter innerhalb der Nutzenfunktion generiert werden. Ziel muss sein, dass der Einfluss der alternativenspezifischen Konstanten minimiert wird und somit das Modell mehr Aussagekraft, im Besonderen für die Prognose, erhält.
- Abbruchbedingungen für Gleichgewichtsberechnungen: Strengere Abbruchbedingungen bei einer Gleichgewichtsumlegung (siehe Kenngröße Relative Gap in Abb. 67) 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

- 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.

Abb. 67 Relative Gap als Konvergenzkenngröße bei der Gleichgewichtsumlegung.

Eine detaillierte Beschreibung von durchzuführenden Tests findet sich in Kapitel 8.5.1.

Realitätstests - Überprüfung des Modells mit modifizierten Variablen

Mit Realitätstests wird geprüft, ob die Wirkungen eines Modells bei Änderungen der Variablen in der erwarteten Größenordnung liegen. Dazu werden die Variablen des Verkehrs-

angebots 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 (eine detaillierte Beschreibung dieser Tests findet sich in Kapitel 8.6.1)

- Variation der Treibstoffpreise um 10% oder 20%,
- Variation der Ticketpreise um 10% oder 20%,
- Variation der Fahrzeit im Kfz-Verkehr um 10%,
- Variation der Bedienungshäufigkeit im ÖV um 50%,
- Variation der Einwohner um 10%.

Nach WebTAG (Unit 2) [19] berechnet sich die Preiselastizität ε nach:

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

und sollte folgende Werte aufweisen:

- Treibstoffkosten (bezogen auf die Fahrzeugkm): -0.35 bis -0.25,
- ÖV-Ticketpreise (bezogen auf die Wegeanzahl): -0.9 bis -0.2 (bzw. -0.9 bis -0.7 für Bus),
- Reisezeit (MIV, bezogen auf die Wegeanzahl): 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?

Eine wichtige Grösse, um die Änderungen bei Realitätstests zu messen, sind Elastizitäten. Die sich ergebenden Wertebereiche der Elastizität ε sind wie in Tab. 17 zu interpretieren:

Tab. 17 Wertebereich von Elastizitäten.

Elastizitätsbereich	Bezeichnung	Bedeutung
$ \varepsilon = 0$	X ist vollkommen unelastisch	X reagiert nicht auf eine Änderung von Y .
$0 < \varepsilon < 1$	X ist unelastisch	Die relative Änderung von X ist kleiner als die von Y .
$ \varepsilon = 1$	X ist proportional elastisch	Die relative Änderung von X ist gleich der von Y .
$ \varepsilon > 1$	X ist elastisch	Die relative Änderung von X ist grösser als die von Y .
$ \varepsilon \rightarrow \infty$	X ist vollkommen elastisch	Die relative Änderung von X ist selbst bei der kleinsten Änderung von Y unendlich hoch.
$\varepsilon < 0$		Eine positive relative Änderung von Y führt zu einer negativen relativen Änderung von X .

mit

X abhängige Variable

Y unabhängige, geänderte Variable

Prediction Success Test (Ex-post-Analyse)

Eine besondere Form der Realitätstests sind Prediction Success Tests, die mit einer Ex-post-Analyse die Modellgenauigkeit überprüfen. Prediction Success Tests vergleichen die beobachteten Wirkungen tatsächlicher Entwicklungen (z.B. Einwohneränderungen) und tatsächlich umgesetzter Massnahmen auf die Verkehrsnachfrage (z.B. Verkehrsstärken) mit den Ergebnissen einer Modellprognose. Dieser Vergleich erfordert Nachfragedaten für den Analysezeitpunkt und für mindestens einen weiteren Zeitpunkt. Dieser Prognosezeitpunkt kann vor oder nach dem Analysezeitpunkt liegen:

- Prognosezeitpunkt liegt vor dem Analysezeitpunkt (Backcasting, Rückwärtsprognose):
Das Modell kann mit Hilfe der Nachfragedaten validiert, aber auch kalibriert werden. Bei der reinen Validierung wird die Modellgüte sowohl für den Analysezeitpunkt als auch für den Prognosezeitpunkt ausgewiesen. Das Modell kann aber mit Hilfe der Nachfragedaten auch so kalibriert werden, dass modellierte und berechnete Werte sowohl für den Analysezustand als auch für die Zustände in der Vergangenheit möglichst gut übereinstimmen. Diese Art eines Prediction Success Tests erfolgt zum Zeitpunkt der Modellerstellung. Eine derartige Vorgehensweise wird in Scherr et al. [72] beschrieben.
- Prognosezeitpunkt liegt nach dem Analysezeitpunkt:
Das Modell wird mit den Daten des Analysezustands kalibriert und validiert. Zu einem Zeitpunkt nach der Modellerstellung wird die Modellgüte mit den für diesen Zeitpunkt erhobenen Nachfragedaten verglichen. Dazu wird eine Modellrechnung mit den Strukturdaten des Prognosezeitpunkts und den Massnahmen, die seit dem Analysezeitpunkt umgesetzt wurden, durchgeführt.

Sammer et al. [71] nennen Backcasts als «sehr gute, aber auch sehr aufwendige» Qualitätssicherungsmassnahme. Zudem sollte der Backcastplanfall mindestens 10 Jahre vor dem Analysezeitpunkt liegen.

Für die Umsetzung eines Prediction Success Tests werden benötigt:

- Verkehrserhebungen im Untersuchungsgebiet für die Prognosezeitpunkte,
- Verkehrsangebot und Preise für die Prognosezeitpunkte,
- Strukturdaten für die Prognosezeitpunkte.

Die Ergebnisse eines Prediction Success Tests können prinzipiell wie ein Analysefall validiert werden (siehe Tab. 16). Prediction Success Tests nehmen an, dass die Verhaltensparameter des verwendeten Verkehrsnachfragemodells auch zum Prognosezeitpunkte gültig sind. Durch eine Kalibrierung der Verhaltensparameter auf einen Backcastplanfall kann nach Sammer et al. [71] aber auch eine zeitliche Änderung der Parameter abgeschätzt und ggf. auch fortgeschrieben werden.

6.2.8 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 der Überprüfung mikroskopischer Verkehrsflussmodelle [26] lässt sich ein Datensatz für einen weiteren Kontrollzustand zum Beispiel durch Reisezeitmessungen zu einer anderen Tageszeit relativ leicht erzeugen. Bei makroskopischen Modellen, die meist die mittlere Verkehrsnachfrage an einem Werktag ausserhalb der Ferien abbilden, ist es schwer, einen weiteren, unbenutzten Datensatz zu erhalten. Im einfachsten Fall kann man Verkehrsstärken anderer Zählstellen heranziehen. Eine andere, aufwändigere Vorgehensweise besteht in einem Backcasting, bei dem die Modellvariablen in einen definierten Zustand der Vergangenheit gesetzt werden und die Modellergebnisse mit Verkehrsstärken oder Mobilitätskenngrössen zugehöriger Verkehrserhebungen verglichen werden.

Die Durchführung einer abschliessenden Validierung ist sicher wünschenswert, es stellt sich aber unweigerlich die Frage nach der Konsequenz, wenn der abschliessende Validierungstest negativ ausfällt. Ein erneutes Kalibrieren verbietet sich, da dies erstens nicht Zweck dieses Tests ist und zweitens der Datensatz in diesem Fall von Anfang an zu Kalibrierungszwecken hätte verwendet werden können. Ein simples Ignorieren des Testergebnisses rechtfertigt seine Anwendung ebenso wenig. Konsequenterweise müsste bei einem negativen Ausgang das komplette Verkehrsnachfragemodell verworfen werden, um seine Modellspezifikationen grundlegend neu zu definieren. In der Praxis gibt es diese Fälle durchaus. Sie treten immer dann ein, wenn ein Modellanwender in seiner Rolle als Auftraggeber das von einem Modellersteller angefertigte Modell nicht abnimmt. Meist sind sie die Folge einer ungenauen Modellspezifikation und einer nachlässigen Modellüberprüfung.

6.3 Qualitätsprüfungen für mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle

Qualitätskenngrössen

Mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle liefern prinzipiell die gleichen Kenngrössen wie Makromodelle. Jedoch liefert jeder Modelllauf bei gleichen Inputdaten (Verkehrsangebot, Siedlungsstruktur etc.) für jede Kenngrösse Kennwerte, die von einer Startzufallszahl abhängen. Da mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle personen- bzw. agentenfeine Kenngrössen berechnet, müssen diese zunächst auf mittlere Mittelwerte pro Relation aggregiert werden. Dadurch ergeben sich dann mittlere Nachfragematrizen. Mit diesen Nachfragematrizen können dann die gleichen Auswertungen wie bei makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen durchgeführt werden.

Anzahl Simulationen für Mikromodelle

Mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle benötigen eine gewisse Anzahl von Simulationen, um sicherzustellen, dass die sich ergebenden mittleren Kenngrössen kein Zufallsresultat, sondern ein statistisch abgesicherter Wert, sind.

Gemäss den «Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation» [26] ergibt sich die erforderliche Simulationsanzahl n aus einem angestrebten Signifikanzniveau α , der gewünschten absoluten Genauigkeit e_a und der erwarteten Streuung s^2 .

$$n = \frac{t(\alpha, n-1)^2 \cdot s^2}{e_a^2}$$

mit

$t(\alpha, n-1)$ Wert der Student-Verteilung für ein angestrebtes Signifikanzniveau α und eine Simulationsanzahl n ; da $t(\alpha, n-1)$ von der Simulationsanzahl n abhängig ist, muss das Problem iterativ gelöst werden.

Für die Modellstufen Verkehrserzeugung, Verkehrszielwahl und Verkehrsmoduswahl ist die Bezugsgrösse der Auswertung immer die Person bzw. der Agent. Die gewünschte absolute Genauigkeit e_a und die erwartete Streuung s^2 beziehen sich hierbei auf folgende Kenngrössen:

- Zahl der Wege pro Person und Modus,
- mittlere Reiseweite pro Person und Tag,
- mittlere Reisezeit pro Person und Tag.

Für die Modellstufe der Umlegung bezieht sich die Auswertung auf die Verkehrsstärke und Fahrtzeit im Netz. Folgende Kenngrössen sollten betrachtet werden:

- Verkehrsstärke ausgewählten Querschnitten (z.B. Messstellen),
- Fahrtzeit auf Streckenzügen.

6.4 Abschätzung der Prognosegenauigkeit

Ein Verkehrsnachfragemodell ermittelt als Ergebnis eine Vielzahl von Kenngrößen, die in der Planung benötigt werden. Wichtige Kenngrößen sind u.a. modusspezifische Verkehrsstärken, der Verkehrsentrfernungsaufwand (Personen- und Fahrzeugkilometer) und der Verkehrszeitaufwand (Personen- und Fahrzeugstunden). Verkehrsentrfernungsaufwand und Verkehrszeitaufwand ergeben sich unmittelbar aus dem Produkt aus Verkehrsstärke und Länge bzw. Zeit. Für alle Kenngrößen wird genau ein Wert ermittelt. Deshalb werden Prognosen mit einem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell als Punktprognosen bezeichnet. Bei einer Punktprognose gilt für den Wert der Kenngrösse m :

$$m_{\text{Prognose}} = m_{\text{Modell}}$$

Fehlerklassen

So wie Messwerte und Modellwerte im Analysezustand abweichen, wird es auch im Prognosezustand Abweichungen geben. Um den Prognosefehler zu quantifizieren, lassen sich zwei Fehlerklassen unterscheiden, die beide zum Prognosefehler beitragen:

- Fehler bei den Prognoseannahmen (z.B. Einwohnerzahlen, Preisentwicklung). Dieser Prognoseannahmefehler kann zum Teil durch Sensitivitätstest in der Größenordnung eingegrenzt werden. Er wird im Folgenden als f_a^P für den absoluten und f_r^P für relativen Prognoseannahmefehler bezeichnet.
- Fehler, die bereits im Analysefall enthalten sind und sich aus Abstraktionsfehlern, Implementierungsfehlern, Messfehlern und Stichprobenfehlern ergeben. Bei Verkehrsstärken kann dieser mittlere Modellfehler differenziert nach Strassenklassen oder nach Verkehrsstärkenklassen ermittelt werden. Der Modellfehler wird dann aus der Analyse in die Prognose übertragen. Dazu muss ein mittlerer Modellfehler für den Analysefall bestimmt werden. Der absolute Modellfehler wird im Folgenden als f_a^M bezeichnet.

Um den mittleren Modellfehler f_a^M zu bestimmen, werden unten drei mögliche Ansätze vorgestellt, die auf dem SQV , dem $RMSE$ oder dem $\%RMSE$ basieren.

Fehler bei den Prognoseannahmen

Jeder Sensitivitätstest liefert eine Punktprognose für eine Menge angenommener Variablenwerte. Damit kann für jedes Netzelement eine Abweichung zwischen der Modellprognose ohne und mit Sensitivitätsannahmen ermittelt werden. Für den t. Sensitivitätstest ergibt sich jedes Netzelement folgende relative Abweichung:

$$f_{r,t}^P = \frac{m_{\text{Prognose},t}}{m_{\text{Prognose}}}$$

Diese Abweichung kann für mehrere Sensitivitätstests vereinfachend multiplikativ verknüpft werden, wenn die Sensitivitätstests voneinander unabhängige Variablen variieren. Da die in einem Verkehrsnachfragemodell abgebildeten Wirkungszusammenhänge bei der Zielwahl, Modulwahl und Routenwahl nicht linear sind, ist es aber immer besser auf multiplikative Verknüpfungen zu verzichten und stattdessen Sensitivitätstests zu definieren, die wahrscheinliche Kombinationen von Variablenausprägungen nutzen. Der Sensitivitätstests, der die geringste bzw. die höchste Verkehrsleistung im Netz ergibt, wird $f_{r,t=MIN}^P$

bzw. $f_{r,t=MAX}^P$ benannt.

Modellfehler aus dem Gütemass SQV

Wird ein Analysefall mit dem Gütemass SQV geprüft, kann der absolute Fehler mit folgender Formel bestimmt werden.

$$f_a^M = \frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f} \sqrt{m_{\text{Prognose}}}}{g_{SQV}}$$

Dabei wird für g_{SQV} entweder das mittlere Gütemass des Analysezustands herangezogen oder der Wert, der von allen Messwerten eingehalten werden muss (z.B. 0.90 oder 0.85).

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Grösse des Modellwerts bei der Fehlerermittlung berücksichtigt wird. Für jeden Modellwert gibt es spezifischen Fehlerwert, sowohl für den absoluten Fehler als auch für den relativen Fehler.

Modellfehler aus dem RMSE

Der *RMSE* ergibt sich aus der Abweichung aller Messwerte c und Modellwerte m im Analysezustand. Der *RMSE* entspricht einer mittleren Standardabweichung. Multipliziert man die Standardabweichung mit dem Konfidenzkoeffizienten z , erhält man den zu erwartenden Modellfehler für ein Signifikanzniveau. Sammer verwendet hierfür den Wert $z=1.96$ [71], was einem Signifikanzniveau von 0.05 entspricht, d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.05 ist der Fehler grösser. Dieses Sicherheitsniveau führt allerdings zu einem grossen absoluten Fehler. Wird im Analysefall ein Stichprobenfehler (siehe Seite 132) von $z=1.0$ gesetzt, kann das auch für den Prognosezustand angenommen werden. Damit ergibt sich folgende Formel für den absoluten Fehler:

$$f_a^M = z \cdot RMSE(c, m) \xrightarrow{z=1.0} f_a^M = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (c_n - m_n)^2}{N}}$$

Bei dieser Methode wird die Grösse des Modellwerts bei der Fehlerermittlung nicht berücksichtigt. Alle Modellwerte einer Grössenklasse bekommen den gleichen absoluten Fehler zugeordnet. Damit wird der Modellfehler von der Grössenklasseneinteilung bestimmt.

Modellfehler aus dem %RMSE

Wird anstelle des RMSE der prozentuale RMSE verwendet, ergibt sich der folgende absolute Fehler:

$$f_a^M = m_{\text{Prognose}} \cdot \%RMSE(c, m) = m_{\text{Prognose}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2}{N}}}{\frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}}$$

Bei dieser Methode wird für alle Modellwerte ein einheitlicher relativer Fehler angenommen. Der absolute Fehler hängt vom Modellwert ab.

Umgang mit der Prognoseungenauigkeit

Mit den oben beschriebenen Fehlern kann nun für jedes Netzelement ein unterer und ein oberer Prognosewert bestimmt werden:

- unterer Prognosewert ohne Prognoseannahmefehler:

$$m_{\text{Prognose}}^- = (m_{\text{Modell}} - f_a^M)$$

- unterer Prognosewert mit Prognoseannahmefehler:

$$m_{\text{Prognose}}^{-} = (m_{\text{Modell}} - f_a^M) \cdot f_{r,t=\text{MIN}}^P$$

- oberer Prognosewert ohne Prognoseannahmefehler:

$$m_{\text{Prognose}}^{+} = (m_{\text{Modell}} + f_a^M)$$

- oberer Prognosewert mit Prognoseannahmefehler:

$$m_{\text{Prognose}}^{+} = (m_{\text{Modell}} + f_a^M) \cdot f_{r,t=\text{MAX}}^P$$

Modellanwender und Modellnutzer müssen gemeinsam entscheiden, welche Fehler bei einer Modellanwendung berücksichtigt werden sollen. In jedem Fall sollten die Wirkungen ermittelt werden, die sich aus einer Modellanwendung mit einer Punktprognose ergeben. Diese Ergebnisse können dann mit den Wirkungen verglichen werden, die sich mit Prognosefehlern ergeben:

- Modellanwendungen, bei denen Erlöse aus Fahrgeldern oder Strassenbenutzungsgebühren ermittelt werden sollen, sollten die unteren Prognosewert verwenden.
- Anwendungen, die Verkehrsstärken für Leistungsfähigkeitsuntersuchungen, Lärm oder Schadstoffemissionen ermitteln, sollten die oberen Prognosewerte verwenden.
- Anwendungen, die Wirkungen für volkswirtschaftliche Untersuchungen ermitteln, sollten die Wirkungen sowohl mit unteren als auch mit oberen Prognosewerten ermitteln.

Bisher basieren nahezu alle Verkehrsprognosen auf Punktprognosen, die keine Prognosefehler berücksichtigen. Deshalb liegen derzeit noch keine praktischen Erfahrungen über den Umgang mit Prognosefehlern vor. Prognosefehler können in der Planungspraxis zu Problemen führen. Es können Fälle auftreten, in denen eine Massnahme ohne Prognosefehler geeignet, mit Prognosefehler aber ungeeignet ist. Die transparente Angabe von Unsicherheiten kann für die Planung zwar hilfreich sein, in der Kommunikation mit politischen Entscheidern und Bürgern aber zu Unsicherheit führen.

7 Anforderungen an die Dokumentation

Eine gute Modelldokumentation ist aus Sicht der Anwender eines Modells elementar. Sie sollte neben den verwendeten Methoden zur Modellerstellung und den in den vorherigen Arbeitsschritten erarbeiteten Qualitätsmassen auch die Grenzen des Modells aufzeigen. So kann den in der Praxis vorkommenden Missverständnissen über mögliche Einsatzbereiche eines Modells vorgebeugt werden. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Anforderungen an die Modelldokumentation zusammengetragen und erläutert. Im Anhang findet sich für eine dazugehörige Checkliste als Hilfestellung für die praktische Arbeit von Modellerstellern und Modellbesteller.

7.1 Einleitung

Die Einleitung des Modellberichts bietet Platz um allgemeine Informationen zum Modell zu geben. Dazu gehören die Entstehungsgeschichte des Modells und wichtige Hintergrundinformationen, der Bezug respektive die Abgrenzung zu Vorgängermodellen und der Anlass für die Erstellung des Modells.

7.2 Anforderungen an das Modell

Die vom Modellbesteller formulierten Anforderungen an das Modell bestimmen massgeblich den Modellansatz, die Modellstruktur, die Auflösung des Modells sowie die abgebildeten Aspekte des Verkehrsverhaltens. Für Anwendungszwecke die bei der Modellerstellung nicht berücksichtigt wurden ist das Modell unter Umständen weniger gut geeignet. Im Rahmen der Modelldokumentation sollte daher für spätere Anwender festgehalten werden, für welche Anwendungen das Modell konzipiert wurde. Zu diskutieren ist dabei z.B. folgende Fragen:

- Ist das Modell prognosefähig oder stellt es eine reine Abbildung des Ist-Zustands dar?
- Ist das Modell sensitiv bezüglich Veränderungen im Angebot oder den Strukturdaten?
- Welche Modi wurden berücksichtigt? Wird Multimodalität abgebildet?
- Für welche Anwendungszwecke ist das Modell das Modell ausgelegt?
- Wo liegen aus Sicht des Modellerstellers die Grenzen in der Anwendung z.B. hinsichtlich der Granularität oder Auswertung der Reisezeiten?
- Welche Auswertungsmöglichkeiten (z.B. Lärm- / Luftemissionen, Erreichbarkeiten, Knotenströme) sind vorgesehen?
- In welcher Granularität sollen Massnahmen (z.B. des Verkehrsmanagements) abgebildet werden können?

7.3 Modellbildung

Im nächsten Schritt werden die Grundsätze der Modellbildung wie die räumliche und zeitliche Auflösung, die gewählte Segmentierung der Nachfrage und der Modelltyp beschrieben. Dieser Abschnitt ist ein Kernpunkt der Dokumentation und bildet die Grundlage für die weitere Dokumentation. Neben der reinen Beschreibung der gewählten Ansätze sind kurze Erläuterungen zu den Gründen für diese Wahl hilfreich für das anschliessende Verständnis des Modellbestellers und der Modellanwender. Folgende Aspekte sollten dabei mindestens diskutiert werden:

- Wie wurde der Modellraum abgegrenzt? Welche Gebiete umfassen der Planungs-, der Untersuchungs- und der Aussenraum?
- Auf welcher Auflösungsstufe wurden die einzelnen Räume segmentiert? Wie viele Zellen beinhalten die einzelnen Räume? Was sind die relevanten Kriterien für die Segmentierung?

- Welche zeitliche Segmentierung wurde gewählt? Gibt es mehrere Zeitzustände (z.B. ein Tagesmodell und ein Spitzenstundenmodell)?
- Wie wird die Nachfrage segmentiert? Welche Personengruppen werden differenziert? Welche Modi und Verkehrszwecke werden abgebildet? Inwiefern werden Mobilitätswerkzeuge berücksichtigt und mit welchem Ansatz werden sie modelliert?
- Welcher Modelltyp wurde gewählt? Wurde ein mikroskopischer oder makroskopischer Ansatz verwendet? Werden Wegeketten oder Aktivitätenübergänge modelliert? Welche Modellstufen werden abgebildet? Werden mehrere Modellstufen kombiniert? Welche Verfahren wurden für die Umlegung respektive Verkehrsflusssimulation verwendet?
- Welche Verkehre werden neben dem Personenverkehr innerhalb des Perimeters berücksichtigt? Wie werden Güterverkehr und Aussenverkehre (Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehre) modelliert?

7.4 Datengrundlagen

Die verwendeten Datengrundlagen sind wesentliche Einflussfaktoren auf die Qualität eines Verkehrsmodells. Daher sollten im Modellbericht die Herkunft der Daten, ihre Qualität und allfällige Schritte zur Anreicherung, Bereinigung oder Kombination der Daten beschrieben werden. Dies betrifft insbesondere die Herkunft von Daten zu:

- Zonen oder Aktivitätenorten
- Verkehrsnetzen für die verschiedenen Verkehrsmittel
- Strukturdaten
- Modellparameter
- Aussenverkehren
- Güterverkehren
- Plausibilisierung und Kalibrierung (z.B. Zählraten)

7.5 Aufbereitung des Verkehrsangebots

Ausgehend von den Datengrundlagen werden im nächsten Schritt die Arbeiten zur Erstellung des Verkehrsangebots beschrieben. Dazu gehören die Verkehrszellen respektive im Fall eines mikroskopischen Ansatzes die Aktivitätenorte, die Verkehrsnetze für alle Modi und im Falle eines makroskopischen Modells die Anbindungen. Beschrieben werden sollten die zugrundeliegenden Annahmen und Konzepte, das Vorgehen zur Umsetzung dieser Konzepte sowie verwendeten Grenzwerte. Die folgenden Fragen sollten dabei beantwortet werden:

- Wie wurden die Verkehrszellen / Aktivitätenorte definiert? Wie wurden die Strukturdaten den Verkehrszellen / Aktivitätenorten zugeordnet? Wie wurden Verkehrsintensive Einrichtungen modelliert?
- Welches Vorgehen wurde zur Erstellung der jeweiligen Verkehrsnetze gewählt? Wie wurden für die IV Netze Attribute wie zugelassene Verkehrssysteme, Kapazitäten, Geschwindigkeiten oder Steigungen ermittelt? Wie wurde das ÖV-Angebot modelliert? Wie werden Knotenwiderstände abgebildet? Wie wurden die CR-Funktionen für Strecken und Knoten festgelegt?
- Wie viele Anbindungen sind pro Verkehrszelle vorgesehen? Inwiefern wird die Netzhierarchie berücksichtigt? Werden Anbindungsanteile vorgegeben und wie wurden diese bestimmt?

7.6 Modellierung der Verkehrsnachfrage

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil eines Verkehrsmodells ist das Vorgehen und die verwendeten Parameter zur Modellierung der Verkehrsnachfrage. Im Bericht sollen die verwendeten Modellparameter, die zugrundeliegenden Annahmen zum Verkehrsverhalten sowie das Vorgehen zur Herleitung der Parameter dokumentiert werden. Für makroskopische Modelle sind dies insbesondere:

- Erzeugungsraten
- Nutzenfunktionen für die Ziel- und Moduswahl
- Umlegungsparameter

Für mikroskopische Modelle sind dies insbesondere:

- Nutzenfunktionen und Parameter für die Erstellung von Tagesplänen
- Parameter für die Verkehrsflusssimulation

7.7 Bereitgestellte Kenngrößenmatrizen

Im Rahmen der Modellerstellung werden in der Regel auch Kenngrößen (Reisezeiten, Fahrweiten etc.) berechnet, die anschliessend dem Modellbesteller und den Anwendern zur Verfügung gestellt werden. Im Rahmen der Dokumentation sollte für jede Kenngrösse ihre Bedeutung und die verwendeten Berechnungsvorschriften festgehalten werden.

7.8 Technische Umsetzung der Modellierung

Für die Berechnung weiterer Modellzustände beispielsweise für die Prognose sollte im Modellbericht auch eine Dokumentation der technischen Abläufe und verwendeten Werkzeuge vorgesehen werden. Dabei sollten insbesondere die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Welche Software und welche Version der Software ¹¹ wurde für die einzelnen Arbeits- und Modellierungsschritte verwendet?
- Welche Verfahrensabläufe wurden definiert und wie können diese verwendet werden?
- Welche Skripte wurden eingesetzt? Wie müssen die Eingangsdaten für diese Skripte aussehen? Welche Parameter wurden für die Skripte verwendet und wo können diese eingestellt werden?
- Welche weiteren Werkzeuge wurden verwendet? Wie können diese von Anwendern genutzt werden?
- Welche Vorschriften wurden für die Benennung von Netzelementen, Matrizen oder Agenten verwendet?
- Welche benutzerdefinierten Attribute wurden definiert? Welche Angaben sind in diesen Attributen gespeichert?
- Welcher Logik folgt die Ordnerstruktur, in der die Daten übergeben wurden?

7.9 Validierung und Kalibrierung

Den Abschluss der Modellerstellung bildet die Validierung und Kalibrierung des Modells. Damit wird die Qualität des Modells überprüft. Im Kapitel 6 wird ausführlich dargestellt,

¹¹ inkl. Angabe von Versionsnummer

welche Methoden und Kenngrößen für die Qualitätssicherung geeignet sind. Im Modellbericht soll der Umfang und das Ergebnis dieser Prüfungen festgehalten und damit die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Welche Methoden wurden zur Überprüfung der Modellergebnisse eingesetzt?
- Welche Kennwerte wurden verwendet und welche Zielgrößen respektive Zielgenauigkeit wurde angestrebt? Welche relativen und absoluten Abweichungen wurden akzeptiert?
- Welche Ergebnisse ergaben sich aus der Qualitätsprüfung für das Modell? Welche Korrekturen und Veränderungen wurden vorgenommen?
- Wurden Sensitivitäts- und Realitätstests durchgeführt? Was wurde dabei festgestellt?

8 Beispielhafte Anwendungen

Zum Abschluss der Forschungsarbeit werden die in den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Qualitätstest und Qualitätskenngrößen auf ihre Praxistauglichkeit getestet. Dazu werden drei bestehende Modelle einem virtuellen Review unterzogen. Das Ziel ist dabei nicht primär die Bewertung der Modelle, sondern der Nachweis, dass die empfohlen Kriterien und Verfahren aussagekräftig sind und welcher Aufwand mit ihrer Anwendung verbunden ist. Zudem werden konkrete Hinweise für zukünftige Anwender erarbeitet. Es wurde daher keine Überprüfung der Modelldokumentationen vorgenommen. Es werden die folgenden drei Modelle untersucht:

- das Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM Zürich)¹²,
- das Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VM Region Stuttgart)¹³,
- Le Modèle de transport du canton de Neuchâtel¹⁴.

Im Folgenden werden zunächst die drei Modelle kurz vorgestellt (Kapitel 8.1). In den anschließenden Modelltests werden zunächst die Modelleingangsdaten betrachtet (Kapitel 8.2) und die Netz- und personenbezogene Verkehrserhebungsdaten, die Raumstrukturdaten und die Verkehrsangebotsdaten überprüft. Dann erfolgt die Prüfung der Vorzeichen, Wertebereiche und Verhältnisse der kalibrierten Modellparameter (Kapitel 8.3) und die Prüfung der Modellergebnisse wie Mobilitätsraten, Wegeweiten, Wegezeiten und Verkehrsstärken (Kapitel 8.4). Abschliessend wird das Modellverhalten mittels Sensitivitätstests (Kapitel 8.5) und Realitätstest (Kapitel 8.6) überprüft.

Für jeden Test wurden zunächst Erwartungen formuliert. Anschliessend wurden die Tests für die einzelnen Modelle durchgeführt. Es wurde jedoch nicht jeder Test für jedes Modell ausgeführt, da bei der Überprüfung nicht die Modelle, sondern die Tests im Vordergrund standen. Sollte das Modell nicht der zuvor formulierten Erwartung entsprechen, wird aufgezeigt, welche weiteren Überprüfungen vom Modellersteller oder einem Gutachter als nächstes durchgeführt werden könnte.

8.1 Kurzbeschreibung der Modelle

8.1.1 Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM ZH)

Das Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM ZH) wurde im Jahr 2010 für den Analysezustand 2007 aufgebaut und anschliessend auf das Analysejahr 2013 aktualisiert. Zudem beinhaltet es einen Prognosezustand für das Jahr 2040. Das Modell bildet den Verkehr an einem durchschnittlichen Werktag (DWV) ab. Darüber hinaus gibt es Modellzustände für den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) sowie die Morgenspitzenstunden (MSP) und die Abendspitzenstunde (ASP). Im Rahmen des virtuellen Reviews wurde nur das DWV-Modell betrachtet. Die Verkehrsnachfrage wird in der Form von Wegen abgebildet. Die Modellierung erfolgte mit den Verkehrsplanungssoftwarepaketen VISEVA und VISUM der PTV AG.

Räumliche Abgrenzung und Datenmodelle

Der Planungsraum des GVM ZH umfasst den Kanton Zürich. Wichtige Kriterien bei der Abgrenzung des Untersuchungsraumes waren die korrekte Abbildung der Routenwahl im

¹² Das Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich wurde vom Amt für Verkehr des Kantons Zürich für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt.

¹³ Das Modell der Region Stuttgart wurde vom Verband Region Stuttgart für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt.

¹⁴ Das Verkehrsmodell Neuchâtel wurde vom Département du développement territorial et de l'environnement des Kantons Neuchâtel für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt.

MIV und ÖV an der Kantonsgrenze und die Abbildung des gesamten Gebietes der S-Bahn-Zürich einschliesslich der Gebiete in anderen Kantonen. In der folgenden Abb. 68 ist der Planungsraum in grau und der übrige Untersuchungsraum in blau dargestellt.

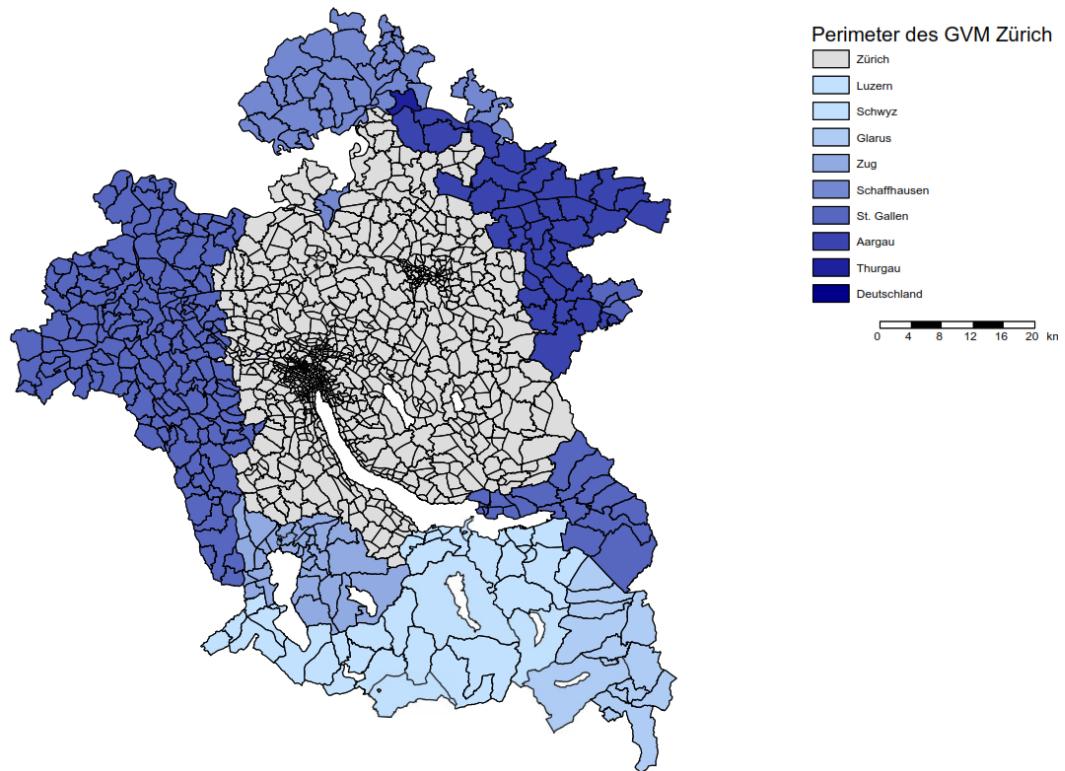


Abb. 68 Räumliche Abgrenzung des GVM Zürich.

Im Planungsraum bildet das Modell alle Strassenklassen des Hauptstrassennetzes und die wichtigsten Nebenstrassen ab. In den Städten Zürich und Winterthur werden auch die wesentlichen Erschliessungs- und Sammelstrassen abgebildet. Das Strassennetz im Untersuchungsraum wurde aus dem NPVM übernommen und umfasst somit das Hauptstrassennetz. Der ÖV umfasst im Planungs- und Untersuchungsraum alle Tramlinien, Stadt- und Regionalbuslinien, S-Bahnlinien, Regional- und Fernverkehrszüge sowie alle Ruftaxis, Schiffe und Seilbahnen.

Das Modell umfasst insgesamt 1'434 Verkehrszellen. Davon entfallen 980 auf den Kanton Zürich und 361 auf den weiteren Untersuchungsraum. 93 Verkehrszellen sind Aussenzonen, an denen der Verkehr von ausserhalb des Untersuchungsraumes in das Modell eingespiessen wird. Ausgangspunkt für die Bildung der Verkehrszellen sind administrativen Einheiten (Gemeinden bzw. Stadtquartiere). Diese wurden auf Grundlage der Verteilung von Einwohnern und Arbeitsplätzen, der Lage von ÖV-Haltestellen, dem Strassenverlauf sowie Zonenplänen und bekannten Entwicklungsgebieten verfeinert.

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage erfolgt über 17 Quell-Ziel-Gruppen denen jeweils massgebende Strukturgrössen an der Quelle und am Ziel zugeordnet sind. So ist z.B. die massgebende Strukturgrösse für die Quell-Ziel-Gruppe «Wohnen – Arbeit» in der Quellverkehrszone die Anzahl Erwerbstätige und in der Zielverkehrszone die Anzahl Arbeitsplätze. Weitere massgebende Strukturgrössen sind die Einwohner (differenziert nach Altersklassen), die Zahl der Ausbildungsplätze, die Anzahl Freizeiteinrichtungen sowie die vorhandenen Verkaufsflächen. Die Erzeugungsraten wurden für jede relevante Kombination aus Quell-Ziel-Gruppe und massgebende Strukturgrösse bestimmt. Die Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen wie der Besitz eines PW oder eines ÖV-Abos wird im Rahmen der Verkehrsmoduswahl berücksichtigt.

Verkehrsnachfragemodell

Zur Berechnung der Nachfrage bildet das Modell die Modellstufen Verkehrserzeugung, Verkehrszielwahl, Verkehrsmoduswahl und Routenwahl ab. Die Verkehrszielwahl und Verkehrsmoduswahl werden simultan durchgeführt und zwischen der Routenwahl und der simultanen Verkehrszielwahl / Verkehrsmoduswahl findet ein Rücksprung statt. Nach Abbruch der Schleife springt das Modell zu einer finalen Routenwahl.

Modelleinsatz

Das GVM ZH wird beim Kanton Zürich, beim Bund und in den Regionen des Kantons für die Beantwortung einer Vielzahl von Fragestellungen eingesetzt. Der Schwerpunkt der Anwendungen liegt in der Evaluation von Angebotskonzepten und von Massnahmen auf der Strasse und im öffentlichen Verkehr. Weitere Einsatzbereiche sind die Analyse der Auswirkungen grösserer Entwicklungsprojekte oder abweichender Szenarien für die Bevölkerungsentwicklung auf das Verkehrssystem. Je nach Anwendungszweck wird das Modell für diese Anwendungen verfeinert und / oder punktuell nachkalibriert. Darüber hinaus dient das GVM ZH auch als Quelle für Grundlagedaten, z.B. für Erschliessungskonzepte für neue Überbauungen oder für die Entwicklung von Verkehrsbelastung auf spezifischen Elementen (Strecken oder Knoten) des Strassennetzes.

Modellierungsansprüche

Gemäss Modelldokumentation wurden die Ansprüche an das Modell eher allgemein definiert und nicht in der Form von konkreten Kriterien wie z.B. beim Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (vgl. Kapitel 8.1.2), verfasst. Es wurden jedoch eine Reihe von qualitativen Anforderungen formuliert. Das Modell sollte:

- logisch konsistent sein, d.h. keine inneren Widersprüche im Modellaufbau aufweisen
- massnahmenempfindlich sein, d.h. die Wirkung von Massnahmen zuverlässig abbilden
- handhabbar sein, d.h. mit vertretbarem Aufwand praktisch anwendbar sein
- transparent sein, d.h. Ergebnisse müssen nachvollziehbar, wiederholbar und kontrollierbar sein
- valide sein, d.h. Eingangsdaten und Ansätze müssen auf realen Erhebungen basieren

8.1.2 Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VM Region Stuttgart)

Für die Region Stuttgart wurde ein Verkehrsnachfragemodell für das Analysejahr 2010 auf der Basis einer Haushaltsbefragung, bei der 10'000 Haushalte der Region teilnahmen, erstellt. Auf der Grundlage des Analysejahrs 2010 baut das Bezugsjahr 2025 auf. Die Modelle sind in die Verkehrsplanungssoftware VISUM der PTV AG implementiert und modellieren einen durchschnittlichen Werktag. Das Verkehrsnachfragemodell nutzt einen aktivitätskettenbasierten Ansatz zur Berechnung der Verkehrsnachfrage. Für die Wirkungsbeurteilung der Massnahmen wird in dieser Arbeit das Verkehrsnachfragemodell des Analysejahres 2010 verwendet.

Räumliche Abgrenzung und Datenmodelle

Der Planungsraum des Modells umfasst die Region Stuttgart mit dem Stadtkreis Stuttgart sowie den fünf Landkreisen Ludwigsburg, Böblingen, Esslingen, Göppingen und Rems-Murr. Der Untersuchungsraum einschliesslich des Planungsraums besteht aus 17 Stadt- und Landkreisen. Der Aussenraum, der zur Abbildung des Fernverkehrs wichtig ist, wird durch Kordonpunkte berücksichtigt. Abb. 69 zeigt die räumliche Abgrenzung des Planungs- und Untersuchungsraumes.

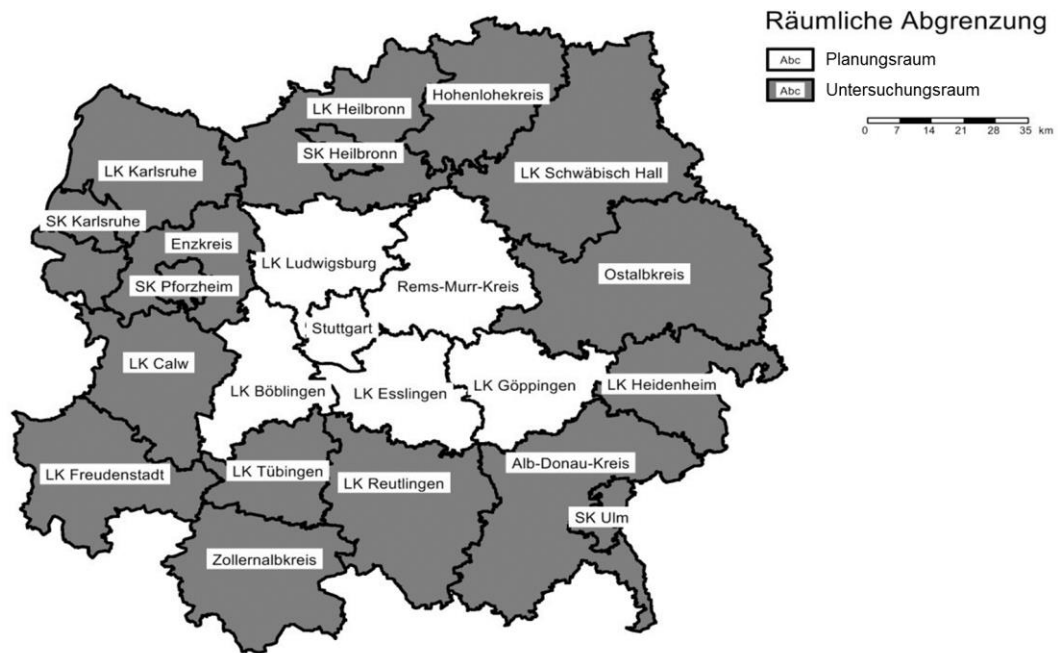


Abb. 69 Räumliche Abgrenzung des VM Region Stuttgart.

Im Planungsraum bildet das Modell alle Strassenklassen des Haupt- und Nebenstrassennetzes ab. Das Strassennetz im Untersuchungsraum beinhaltet nur das Hauptstrassennetz. Der ÖV umfasst im Planungsraum alle Buslinien, Stadtbahnlinien, S-Bahnlinien, Regionalbahnlinien und die, für die Region Stuttgart wichtigen, überregionalen Linien mit zugehörigem Fahrplan. Die überregionalen Linien werden ebenfalls im Untersuchungsraum abgebildet. Für schienengebundenen Linien ist das entsprechende Liniennetz enthalten.

Das Modell ist in 1'175 Verkehrszellen unterteilt. Der Planungsraum ist differenziert in 1'013 Verkehrszellen, davon entfallen allein 513 Zellen auf die Stadt Stuttgart. In Stuttgart umfasst eine Verkehrszelle in der Regel vier bis sechs Baublöcke. In der Region sind die Zellen grösser. Hier entspricht eine Zelle in der Regel einer Gemeinde oder einem Teilort einer Gemeinde. Der Untersuchungsraum besteht aus 136 Verkehrszellen und der Ausenraum aus 26 Kordonpunkten. Bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage werden 23 verhaltenshomogene Personengruppen und 19 Wegezwecke (Aktivitäten) unterschieden. Bei der Gruppierung der Personengruppen sind der Beruf, die PW-Verfügbarkeit und das Alter berücksichtigt. Für jede Personengruppe ist im Datenmodell das Mobilitätsverhalten durch typische Aktivitätenketten mit spezifischen Mobilitätsraten hinterlegt. Die Mobilitätsrate ist von der Lage des Wohnstandortes (Startverkehrszelle der Aktivitätenkette) abhängig. Es werden die drei Wohnstandortgruppen Innenstadt Stuttgart, Stuttgart und restlicher Untersuchungsraum unterschieden.

Verkehrsnachfragemodell

Zur Berechnung der Nachfrage bildet das Modell die Modellstufen Verkehrserzeugung, Verkehrszielwahl, Verkehrsmoduswahl und Routenwahl ab. Die Verkehrsmoduswahl und Verkehrszielwahl werden simultan durchgeführt. Die Umlegung mit der Routenwahl und die simultane Verkehrszielwahl / Verkehrsmoduswahl sind rückgekoppelt. Der Rücksprung wird nach einer vorgegebenen Anzahl von Iterationen beendet. Nach Abbruch der Schleife führt das Modell eine finale Umlegung im ÖV und MIV durch.

Modelleinsatz

Das Modell wurde gemeinsam vom Verband Region Stuttgart (VRS), der Landeshauptstadt Stuttgart (LHS) und der Stuttgarter Strassenbahn AG (SSB) beauftragt. Der VRS nutzt das Modell vorrangig für die Erstellung des Regionalverkehrsplans. Im Rahmen der Regionalverkehrsplanerstellung wurden zahlreiche Massnahmen aus drei Massnahmen-

bereichen untersucht: infrastrukturelle Massnahmen (z.B. neue Verkehrswege), ordnungspolitische Massnahmen (z.B. Durchfahrtsverbote) und raumstrukturelle Massnahmen (z.B. Bewertung neuer Siedlungsschwerpunkte). Die LHS setzt das Modell für die städtische Strassennetzplanung und für die Untersuchung von Massnahmen der Luftreinhalteplanung ein. Die SSB nutzt das Modell für die ÖV-Angebotsplanung. Ausserdem kam das Verkehrsnachfragemodell in diversen Forschungsprojekten des Lehrstuhles für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik der Universität Stuttgart zur Anwendung.

Modellierungsansprüche

Bei der Ausschreibung des Verkehrsnachfragemodells wurden Qualitätskriterien definiert, die der Modellersteller nachweisen musste. Nachstehende Tabelle zeigt wesentliche Anforderungen der Ausschreibung und die im Modellbericht [74] dokumentierten Ergebnisse.

Tab. 18 Übersicht über die Erfüllung der Modellierungsanforderungen des VM Region Stuttgart [74].

Anforderung	Erfüllt / Nicht erfüllt?
Mindestsegmentierung der Nachfrage	
• Wegezwecke: Arbeit, geschäftliche / dienstliche Erledigung, private Erledigung / Einkaufen, Freizeit, Bringen / Holen, Ausbildung (Schule, Berufsschule), Ausbildung Hochschule, Weg von Fluggästen zum / vom Flughafen, Weg von Bahnfernreisenden zum / vom Hauptbahnhof, Heimwege • Verkehrsmittel: Fuss, Rad, ÖV, PW-Selbstfahrer, PW-Mitfahrer, P+R-Verkehr	• Erfüllt
Nachfragemodell	
• Kenngrösseneinfluss auf Parameterschätzung • Ergebnismatrizen • Stundenmatrizen • Wochenendmatrizen • Randsummeneinhaltung für produzierte und angezogenen Fahrten der Wegezwecke Arbeit und Ausbildung (beidseitig gekoppeltes Verteilungsmodell)	• Erfüllt • Erfüllt • nicht gefordert, aber möglich • nicht gefordert • Erfüllt
Modellstufen (Verkehrserzeugung, -verteilung, -aufteilung und -umlegung)	• Erfüllt
Validierung	
• Anzahl Wege pro Werktag und Nachfragesegment im gesamten Untersuchungsraum (< 2% Abweichung von Haushaltsbefragung) • Anzahl Wege pro Werktag und Sozialversicherungspflichtigem bzw. Berufspendler für Relationen auf Gemeindeebene (auf 80% der Relationen GEH < 20 und über alle Relationen GEH < 10 verglichen mit der Pendlermatrix der Bundesagentur für Arbeit) • Anzahl Wege pro Werktag im ÖV für Relationen zwischen den Raumeinheiten der Mittelbereichsebene 2 (auf 80% der Relationen GEH < 20 und über alle Relationen GEH < 10 verglichen mit der ÖV Matrix des VVS) • Verteilung der Fahrtweite (mittlere Fahrtweite) pro Nachfragesegment im gesamten Untersuchungsraum (< 4% oder < 0.2 km Abweichung von Haushaltsbefragung) • mittlere Reisezeit einer Person / Tag pro Nachfragesegment im gesamten Untersuchungsraum (< 10% oder < 10 min Abweichung von Haushaltsbefragung) • Modal-Split pro Nachfragesegment im gesamten Untersuchungsraum (< 2% Abweichung von Haushaltsbefragung) • Modal-Split über alle Nachfragesegmente im gesamten Untersuchungsraum (< 1% Abweichung von Haushaltsbefragung) • Verkehrsstärke [Kfz / Werktag] des PW-Verkehrs (auf 80% der Zählstellen GEH < 20 und über alle Zählstellen GEH < 10 verglichen mit Querschnitts-Verkehrszählungen) • Verkehrsleistung [Personenkilometer / Werktag] des ÖV für alle Verkehrssysteme (SSB-Bus, Stadtbahn, S-Bahn, Regionalbus) (< 5% Abweichung von VVS Daten)	• Erfüllt • Erfüllt • Erfüllt • Weitestgehend erfüllt • Nicht im Modellbericht ausgewertet • Erfüllt • Erfüllt • Mit Matrixkorrektur erfüllt • Ohne Matrixkorrektur nahezu erfüllt • Weitestgehend erfüllt
Realitätstests	

- Erhöhung der PW-Fahrzeit um 10%
- Erhöhung der ÖV-Bedienungshäufigkeit um 10%
- Nicht im Modellbericht ausgewertet
- Nicht im Modellbericht ausgewertet

8.1.3 Verkehrsmodell des Kantons Neuchâtel (VM NE)

Das Verkehrsmodell des Kantons Neuchâtel (VM NE) wurde im Jahr 2016 für den Analysezustand 2010 aufgebaut. Zudem beinhaltet es einen Prognosezustand für das Jahr 2030. Das Modell bildet den Verkehr an einem durchschnittlichen Werktag (DWV) ab. Darüber hinaus gibt es einen Modellzustand für die Morgenspitzenstunden (MSP). Die Verkehrsnachfrage wird in der Form von Wegekettens abgebildet. Die Modellierung erfolgte mit den Verkehrsplanungssoftwarepaketen VISEM und VISUM der PTV AG.

Räumliche Abgrenzung und Datenmodelle

Der Planungsraum des VM NE umfasst den Kanton Neuchâtel. Der Kanton Neuchâtel selbst ist in 109 Verkehrszellen eingeteilt, von welchen 17 Verkehrszellen zur Stadt Neuchâtel und 18 Verkehrszellen zur Stadt La Chaux-de-Fonds gehören. Der Untersuchungsraum umfasst 32 weitere Verkehrszellen in den Kantonen Bern, Fribourg, Jura und Vaud. Die Abgrenzung des Modellperimeters erfolgte unter der Anforderung, dass alle Wege der Einwohner des Kantons abgebildet werden sollen. Daher umfasst der Aussenraum weitere 9 Zonen in der restlichen Schweiz, 16 Zonen in Frankreich und 8 Zonen im weiter entfernten europäischen Ausland. In der folgenden Abb. 70 ist der Planungsraum (in dunkelblau), der Untersuchungsraum und ein Teil des Aussenraumes dargestellt.

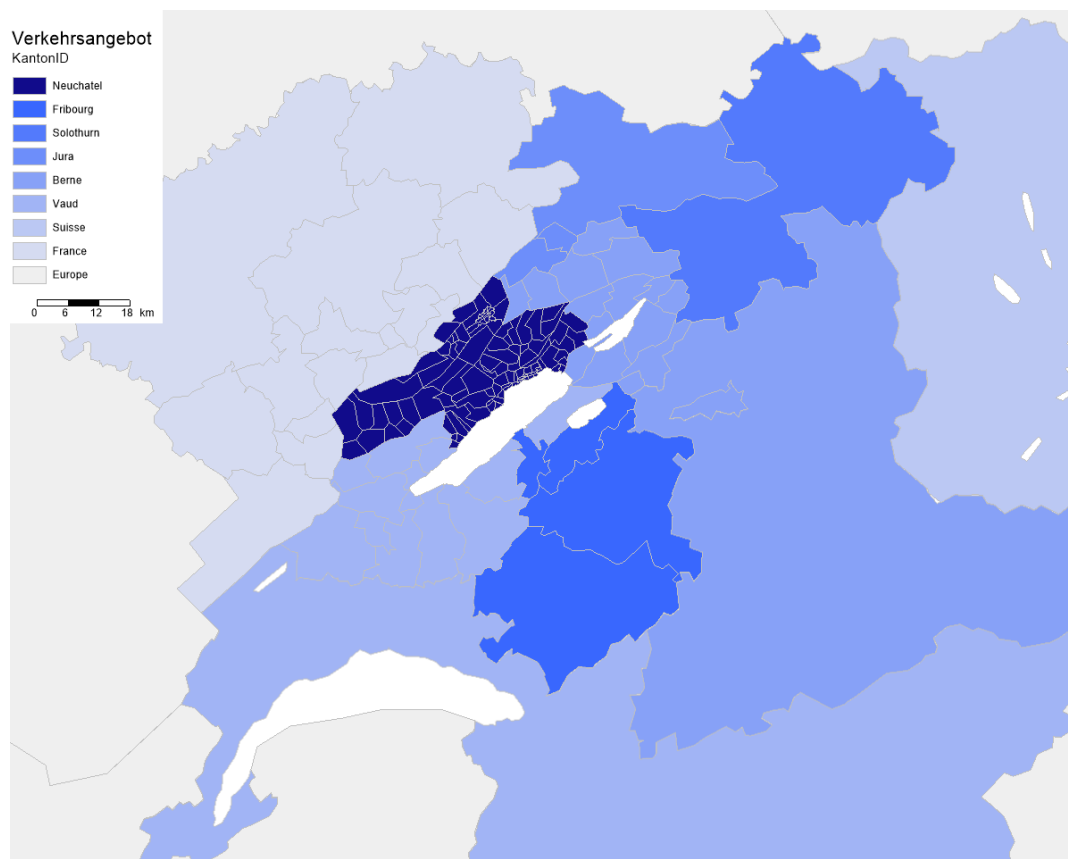


Abb. 70 Räumliche Abgrenzung des VM Neuchâtel.

Ausgangspunkt für die Bildung der Verkehrszellen im Planungsraum waren die Gemeinden. Die Städte Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds und Le Locle sowie die Gemeinden entlang des Neuenburger Sees wurden weiter verfeinert. Im Untersuchungsraum wurden die

beiden wichtigsten Gemeinden Yverdon-les-Bains und Biel/Bienne als eigene Zonen modelliert. Die übrigen Gemeinden wurden zu 30 Zonen zusammengefasst.

Die hinterlegten Raumstrukturdaten basieren auf den Zahlen des Bundesamtes für Statistik des Jahres 2010. Die Bevölkerung wurde in acht verhaltenshomogene Gruppen unterteilt. Die Klassifikation erfolgte basierend auf dem Beschäftigungsstatus, dem Alter und der PW-Verfügbarkeit.

Verkehrsnachfragemodell

Zur Berechnung der Nachfrage bildet das Modell die Modellstufen Verkehrserzeugung, Verkehrszielwahl, Verkehrsmoduswahl und Routenwahl ab. Die Verkehrszielwahl und Verkehrsmoduswahl werden simultan durchgeführt und zwischen der Routenwahl und der simultanen Verkehrszielwahl / Verkehrsmoduswahl findet ein Rücksprung statt. Nach Abbruch der Schleife springt das Modell zu einer finalen Routenwahl.

Modelleinsatz

Das VM NE kann für eine Vielzahl von Anwendungsfällen eingesetzt werden. Im Vordergrund stehen die Auswirkungen von Änderungen im Strassennetz oder im ÖV-Angebot auf die Verkehrsbelastungen und den Modal Split sowie die Auswirkungen von demografischen und sozioökonomischen Veränderungen und Änderungen in der Landnutzung auf die Matrizen der Verkehrsnachfrage.

Modellierungsansprüche

Wie für das GVM ZH wurden für das VM NE keine detaillierten Modellierungsansprüche dokumentiert. Die Validierung des Modells erfolgte durch Vergleich verschiedener Kenngrößen mit dem MZMV. Zu den Kenngrößen gehören die durchschnittlichen Reiseweiten und die Reiseweitenverteilung, die Anzahl Wege im Binnenverkehr und zwischen Regionen und der Modal Split. Die Umlegungsergebnisse im MIV und ÖV wurden zudem mit entsprechenden Zähldaten verglichen.

8.2 Überprüfung der Modelleingangsdaten

8.2.1 Überprüfung der Erhebungsdaten

Im Folgenden wird beschrieben, welche Erhebungsdaten für die Modellerstellung gemäss Modelldokumentation verwendet wurde und wie die Qualität dieser Erhebungsdaten von den jeweiligen Modellerstellern eingeschätzt wird.

GVM Zürich

Mobilitätsdaten

Das Mobilitätsverhalten im GVM Zürich stützt sich im Wesentlichen auf den Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) des Jahres 2010 sowie die dem MZMV angegliederte Stated Preference Befragung zur Verkehrsmittel- und Routenwahl [16]. Es wurden dazu speziell für die Modellerstellung die Binnenwege der Modellperimeter wohnhaften Personen im MZMV ausgewertet.

Zählraten

Im Rahmen der Modellerstellung lagen IV-Zählraten und ÖV-Zählraten aus verschiedenen Quellen vor. Die Zählraten wurden aufbereitet, zusammengeführt und auf ihre Verwendbarkeit geprüft. Falls für eine Zählstelle einzelne Kennwerte (z.B. der Schwerverkehrsanteil) fehlen wurde dieser imputiert, d.h. aus anderen Grössen abgeleitet. Abschliessend wurden die Zählwerte vom Modellersteller hinsichtlich ihrer Qualität in die folgenden Klassen eingeteilt:

- Für die Kalibrierung ohne Qualitätsverlust verwendbar
- Für die Kalibrierung mit Qualitätsverlust verwendbar
- Nur für die Validierung verwendbar

Welche Kriterien für diese Einteilung verwendet wurden, ist aus der Modelldokumentation nicht ersichtlich.

VM Region Stuttgart

Mobilitätsdaten

Im Zuge der Fortschreibung des Regionalverkehrsplans wurde vom Verband Region Stuttgart eine sehr umfangreiche Haushaltsbefragung durchgeführt [62]. Dabei wurden für ca. 5'000 Haushalte mit ca. 13'000 Personen die Wege über den Zeitraum einer Woche befragt. Als Ergebnis stehen ca. 270'000 geocodierte Wege zur Verfügung. Die Ergebnisse der Befragung wurden zur Kalibrierung des VM Region Stuttgart verwendet.

Die Prüfung und Bewertung einer so komplexen Datengrundlage ist schwierig, da es nur wenige vergleichbar grosse Erhebungen gibt. In [62] wird die regionale Haushaltserhebung mit den bundesdeutschen Erhebungen «Mobilität in Deutschland» (MiD 2008) und «Deutsche Mobilitätspanels» (MOP 2009) verglichen, wobei nur geringe, vertretbare Abweichungen festgestellt werden. So liegen die mittlere Wegelänge und die Dauer der Mobilität pro Person und Tag in ähnlichen Grössenordnungen. Lediglich die geringere Anzahl Wege pro Person und Tag deutet darauf hin, dass die kurzen Wege in der Haushaltsbefragung möglicherweise unterrepräsentiert sind. Trotzdem wird die Studie aber als «plausibel und vertrauenswürdig» eingestuft.

Zählraten

Im Rahmen der Modellerstellung lagen IV-Zählraten vor, deren Qualität, Datenquelle und Relevanz sich unterscheiden. Um diese Aspekte bei der Kalibrierung und Validierung zu berücksichtigen, hat der Modellersteller diese Daten in sechs Qualitätsstufen entsprechend ihrer Aktualität, der erfassten Strassenkategorie, der Lage im Netz, der Erfassungsdauer, des Binnenverkehrsanteils und der Datenplausibilität eingeteilt [74]. Eine nachträgliche Überprüfung der Qualitätseinstufung ist im Rahmen des Projekts nicht möglich.

Tab. 19 Zählstellenqualität - VM Region Stuttgart.

Qualitätseinstufung	Beschreibung	Anzahl Zählstellen
5	Höchste Qualitätsstufe	166
4	Hohe Qualitätsstufe	40
3	Mittlere Qualitätsstufe	129
2	Niedrige Qualitätsstufe	92
1	Keine Berücksichtigung für die Kalibrierung	124
-1	Zählstellen, die nicht weiter betrachtet wurden (z.B. mehrere Zählstellen einer Strecke)	106

Zusätzlich lagen für die Modellierung des ÖV ca. 6'000 ÖV-Zählwerte vor. Auf diese Zählwerte konnte im Rahmen dieses Projektes nicht zugegriffen werden.

VM Neuchâtel

Mobilitätsdaten

Die Verhaltensdaten für das Verkehrsmodell Neuchâtel stammen aus dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr für die Jahre 2010 [16] und 2005 [15]. Es wurde keine zusätzliche Erhebung von Mobilitätsdaten für den Aufbau des Verkehrsnachfragemodells vorgenommen.

Zähldaten

Im Rahmen der Modellerstellung lagen IV-Zähldaten und ÖV-Zähldaten aus verschiedenen Quellen vor. Im Modellbericht ist keine Beschreibung über die Qualität der Zähldaten enthalten [22].

8.2.2 Überprüfung der Raumstrukturdaten

Die Überprüfung der Raumstrukturdaten hat zum Ziel, zu prüfen, ob die im Modell hinterlegten Strukturdaten (Einwohner und Arbeitsplätze) mit denjenigen gemäss den statistischen Ämtern übereinstimmen.

GVM Zürich

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der im GVM Zürich verwendeten Strukturdaten mit der amtlichen Statistik des Kantons Zürich. Die relativen Abweichungen bei der Anzahl Einwohner sind mit 2.26% sehr gering.

Tab. 20 Raumstrukturdaten - GVM Zürich.

Strukturgrösse	GVM-ZH 2013	Stat. Amt 2013	Abweichung [%]
Einwohner	1'454'003	1'421'895	2.26
Arbeitsplätze	975'378	981'945	-0.67

Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich der Siedlungsdichte gemäss GVM-ZH und STATPOP. Die räumliche Verteilung zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung. Die Bevölkerungsschwerpunkte liegen dort, wo sie gemäss der amtlichen Statistik ausgewiesen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Auflösung und der unterschiedlichen Klassengrenzen ist ein quantitativer Vergleich jedoch schwierig.

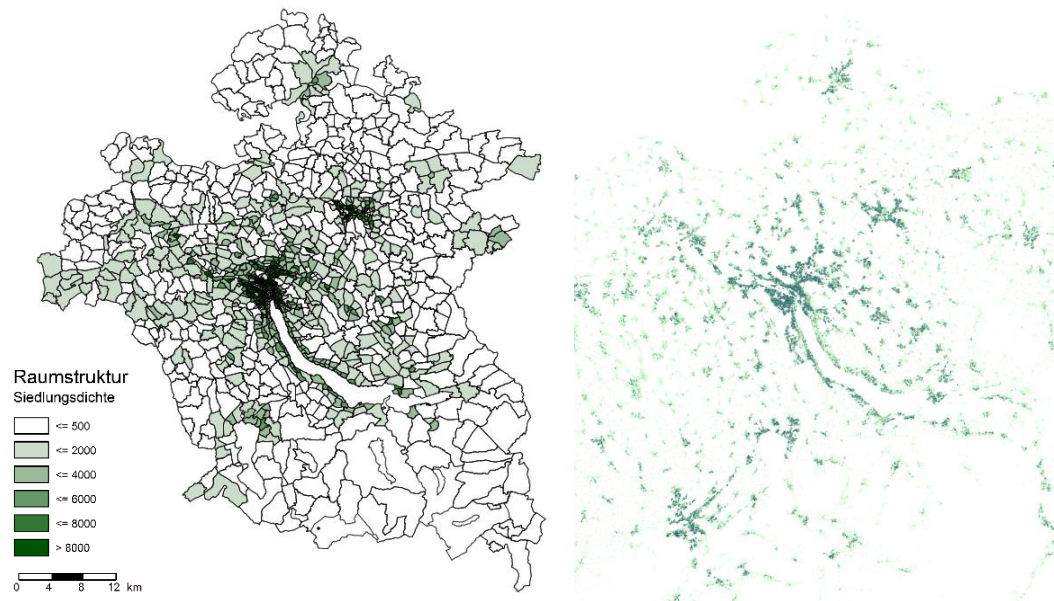


Abb. 71 Vergleich der Siedlungsdichte [Einwohner/km²] im GVM Zürich (links) und STAT-POP [Einwohner/ha] (rechts).

Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich der Arbeitsplatzdichte gemäss GVM Zürich und der Beschäftigtendichte gemäss STATENT. Der Vergleich zeigt, dass im Modell dort eine hohe Arbeitsplatzdichte hinterlegt ist, wo auch in der amtlichen Statistik eine hohe Arbeitsplatzdichte ausgewiesen wird.

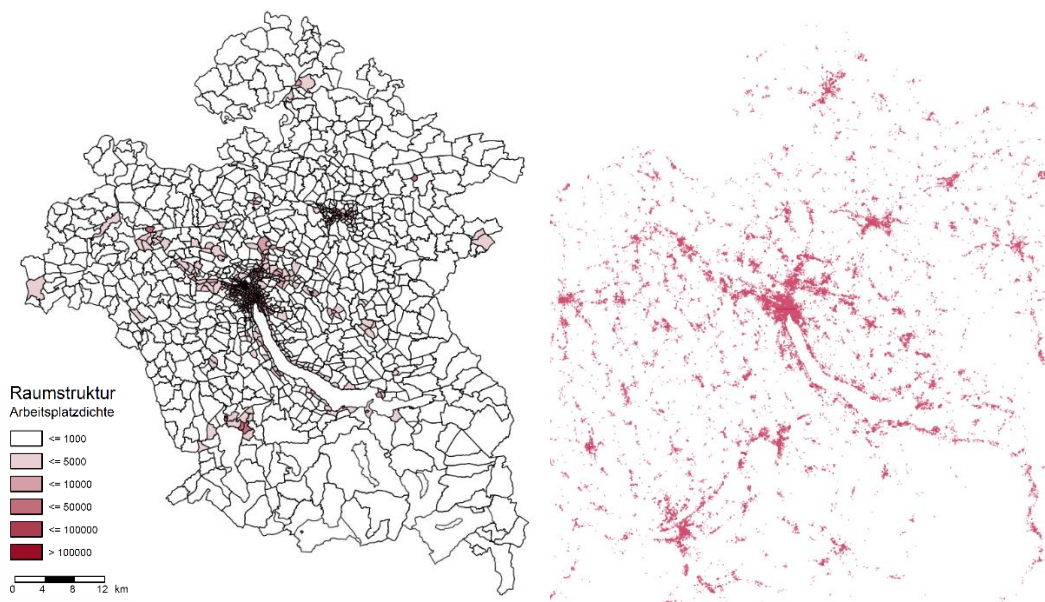


Abb. 72 Vergleich der Arbeitsplatzdichte [Arbeitsplätze/km²] im GVM Zürich (links) und der Beschäftigtendichte STATENT Beschäftigte/ha] (rechts).

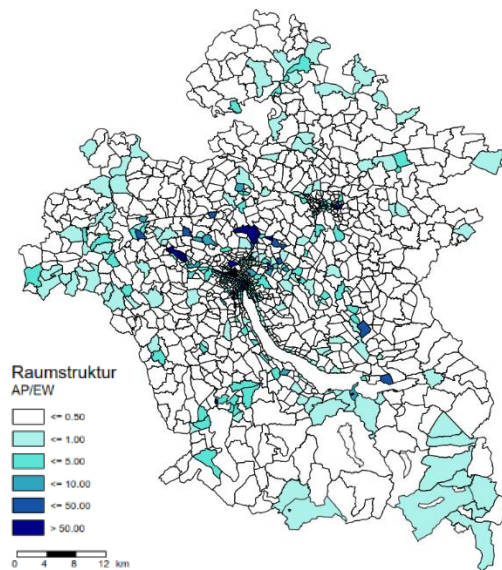


Abb. 73 Verhältnis von Arbeitsplätze zu Einwohnern im GVM Zürich.

Für das Verhältnis von Arbeitsplätzen zu Einwohnern ist leider keine analoge Auswertung aus STATPOP/STATENT verfügbar. Daher erfolgte eine Plausibilisierung der Zonen mit einem hohen Verhältnis von Arbeitsplätzen zu Einwohnern aufgrund Basis von Kenntnissen über die Raumstruktur im Kanton Zürich. Die räumliche Verteilung der Strukturdaten erwies sich dabei als plausibel. Deutlich mehr Arbeitsplätze als Einwohner werden vor allem in der Zürcher Innenstadt, in der Winterthurer Altstadt, an den Hochschulstandorten, am Flughafen Zürich und in den Industriegebieten ausgewiesen.

VM Region Stuttgart

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der im VM Region Stuttgart verwendeten Einwohnerdaten mit der amtlichen Statistik der Stadt bzw. Region Stuttgart. Die relativen Abweichungen bei der Anzahl Einwohnern betragen 2.8% bzw. -3.1%. Sie erklären sich aus dem bundesdeutschen Zensus des Jahres 2011. Zum Zeitpunkt der Modellerstellung wurden die damals bekannten Einwohnerzahlen genutzt, die später vom statistischen Landesamt korrigiert wurden.

Tab. 21 Raumstrukturdaten - VM Region Stuttgart.

Strukturgrösse	VM Region Stuttgart 2010	Stat. Amt 2010	Abweichung [%]
Einwohner (Stadt Stuttgart)	585'968	577'353	2.8%
Einwohner (Region Stuttgart)	2'595'026	2'678'795	-3.1%

Eine Überprüfung der im Modell hinterlegten Arbeitsplätze ist aufgrund nicht verfügbarer Datenquellen für das VM Region Stuttgart nicht möglich.

Fazit:

Eine der grössten Schwierigkeiten bei der Überprüfung der Raumstrukturdaten bestand in der Verfügbarkeit von Vergleichsdaten. Falls keine Vergleichsdaten in der notwendigen Auflösung zur Verfügung stehen, können lediglich Plausibilisierungen unter Zuhilfenahme von Lokalkenntnissen durchgeführt werden. Mit STATPOP und STATENT stehen in der Schweiz jedoch zumindest für Einwohner und Arbeitsplätze entsprechende Datensätze für die Plausibilisierung zur Verfügung. Für einen quantitativen Vergleich mithilfe dieser Daten bedarf es jedoch aufgrund der unterschiedlichen Auflösungen einer entsprechenden Aufbereitung der Daten.

8.2.3 Überprüfung der Verkehrsangebotsdaten

Die Netztopologie und die Netzattribute werden mit den folgenden Tests überprüft:

- Anzahl der Arme pro Knotenpunkt: Knotenpunkt mit mehr als 5 Zufahrten werden visuell geprüft.
- Vergleich der mittleren Geschwindigkeit je Strassenklasse und ggf. nach Ortslage mit Erwartungswerten.
- Anzahl der Haltestellen je Verkehrszelle (z.B. maximal ein Schienenhaltepunkt je Zelle).

Auf Relationsebene werden folgende Tests durchgeführt:

- Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung: Bei einem Tagesmodell oder in der Normalverkehrszeit sollten beide Richtungen ähnliche Werte aufweisen.
- Anteil der Wartezeiten an Knotenpunkten bezogen auf die gesamte Reisezeit.
- Anteil der Anbindungszeiten (Zu- und Abgang) an der gesamten Reisezeit.
- Netzbelastungen einer Bestwegumlegung: sollten in beiden Richtungen ähnlich sein.

Anzahl Arme pro Knoten

Knoten mit mehr als fünf Armen kommen in der Praxis kaum vor. Mit der Überprüfung der Anzahl Arme pro Knoten soll sichergestellt werden, dass im Modell die Knoten richtig abgebildet sind. Es wird eine Einzelfallprüfung für alle identifizierten Knoten empfohlen, die über mehr als fünf Knotenarme aufweisen. Für die vorliegenden Prüfungen wurde das vordefinierte Knotenattribut «Anzahl Arme» in VISUM verwendet.

GVM Zürich

Die folgende Tabelle gibt die absolute Häufigkeit der Anzahl Knotenarme für das GVM Zürich an.

Tab. 22 Anzahl Arme pro Knoten - GVM Zürich.

Anzahl Arme	Häufigkeit
0	6966
≤5	30'840
6	8
7	4

Im GVM-ZH verfügen zwölf Knoten über mehr als fünf Knotenarme. Eine händische Prüfung dieser Knoten ist aufgrund der geringen Zahl gut möglich. Folgende Abbildung zeigt beispielhaft den Knoten 10100799 mit sieben Knotenarmen (Escher-Wyss-Platz). Breite Striche zeigen die Strecken an, auf denen das Verkehrssystem «PW» zugelassen ist. Das Beispiel zeigt, dass die Auflösung des Knotens und die zahlreichen ÖV-Beziehungen zur hohen Anzahl Arme am Knoten führen. Wird dies berücksichtigt, ist die Kodierung plausibel.

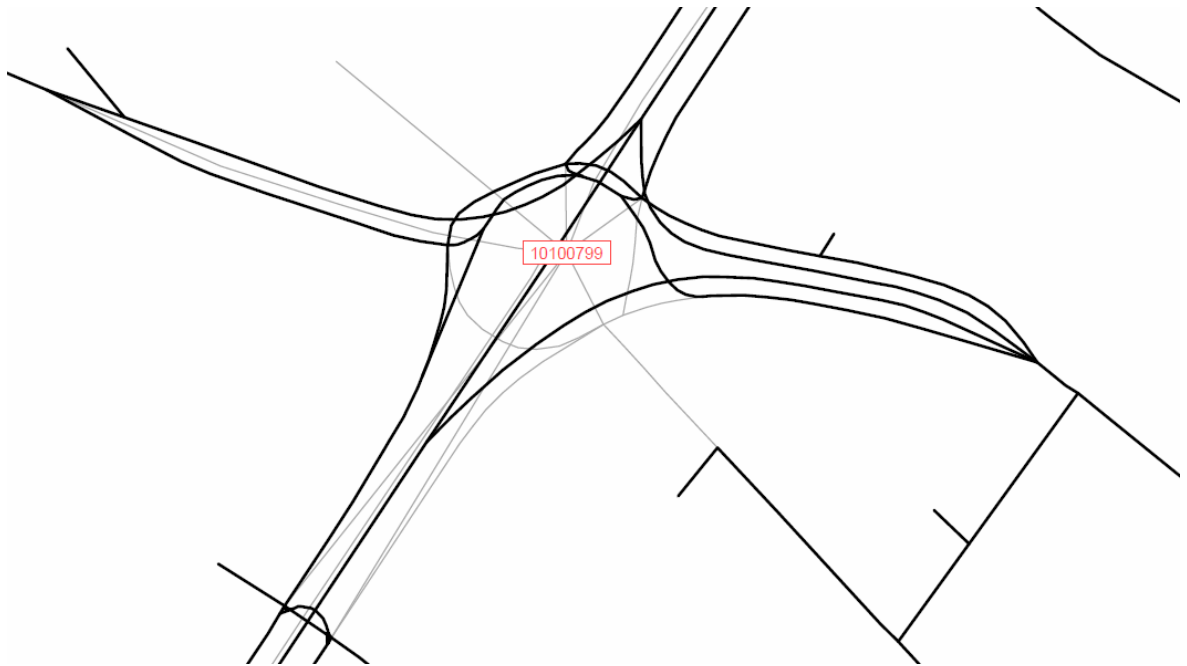


Abb. 74 Beispiel für einen Knoten mit mehr als 5 Armen im GVM Zürich.

Sollten im Modell sehr viele Knoten detailliert aufgelöst kodiert sein, so ist die manuelle Prüfung sehr zeitintensiv. In diesen Fällen kann es hilfreich sein, zusätzliche Filterbedingungen einzuführen, wie z.B. Fussstrecken auszuschalten und die Anzahl aktiver Strecken am Knoten auszuwerten.

Neben Knoten mit sehr vielen Armen sind auch Knoten ohne Arme unplausibel. Die Prüfung sämtlicher Knoten zeigt, dass total 6'966 isolierte Knoten ohne angrenzende Knotenarme im Modell vorhanden sind. In der Regel sind dies Zugangsknoten für Haltestellen des öffentlichen Verkehrs. Knoten, bei denen dies nicht der Fall ist, könnten gelöscht werden.

VM Region Stuttgart

Die folgende Tabelle gibt die absolute Häufigkeit der Anzahl Knotenarme für das VM Region Stuttgart an. Es werden jedoch nur Knoten berücksichtigt, bei denen mindestens eine angrenzende Strecke für das Verkehrsmittel PW zugelassen ist.

Tab. 23 Anzahl Arme pro Knoten - VM Region Stuttgart.

Anzahl Arme	Häufigkeit
0	1
≤5	135'033
6	102
7	14
>7	3

Im VM Region Stuttgart verfügen 119 Knoten über mehr als fünf Knotenarme. Eine visuelle Prüfung dieser Knoten ist bei dieser Anzahl noch möglich. Folgende Abbildung zeigt beispielhaft den Knoten 800009581 mit neun Knotenarmen (Rosensteinstrasse/Nordbahnhofstrasse). Breite Striche zeigen wieder die Strecken an, auf denen das Verkehrssystem «PW» zugelassen ist. Es wird deutlich, dass es sich bei diesem Knoten um einen hochauflösten Knotenpunkt handelt.

**Abb. 75** Beispiel für einen Knoten mit 9 Armen im VM Region Stuttgart.*VM Neuchâtel*

Die folgende Tabelle gibt die absolute Häufigkeit der Anzahl Knotenarme für das VM Neuchâtel an.

Tab. 24 Anzahl Arme pro Knoten - VM Neuchâtel.

Anzahl Arme	Häufigkeit
0	105
≤5	3'599
6	1

Die Prüfung aller Knoten zeigt total 105 isolierte Knoten ohne Arme im Modell und einen Knoten mit mehr als 5 Armen. Die isolierten Knoten können gelöscht werden, sofern es sich nicht um Zugangsknoten eines Haltestellenbereichs handelt.

Die händische Prüfung des einzigen Knotens mit mehr als 5 Armen hat gezeigt, dass an diesem Knoten der zukünftig geplante Westarm der Umfahrung von Biel angebunden ist. Durchgezogene Striche zeigen Strecken an, auf denen das Verkehrssystem «P» in Analysezustand zugelassen ist; grau punktiert ist die ungefähre zukünftige Linienführung des Westarms mit Zwischenanschluss beim Knoten 10000642 dargestellt. Es fehlt jedoch noch eine detaillierte Darstellung der Anschlüsse, was zu dem sechsarmigen Knoten führt.

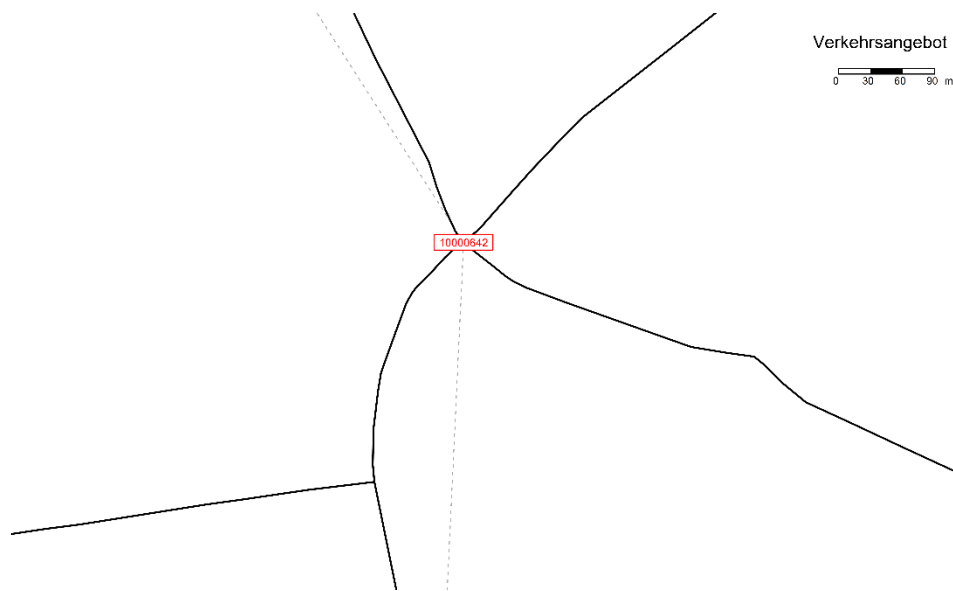


Abb. 76 Knoten mit mehr als fünf Knotenarmen im VM Neuchâtel.

Mittlere Geschwindigkeit je Strassenklasse

GVM Zürich

Die folgende Tabelle zeigt die mittlere Geschwindigkeit gewichtet nach der Streckenlänge pro Strassenklasse in der DWV Version des GVM Zürich für den Kanton Zürich. Für die Klassifikation wurden die im GVM Zürich hinterlegten Obertypen verwendet.

Tab. 25 Mittlere Geschwindigkeit und Gesamtlänge pro Strassenklasse - GVM Zürich.				
Obertyp	Beschreibung	vAkt [km/h]	v0 [km/h]	Länge [km]
1	grossräumige Strassenverbindung, ausserhalb bebauter Gebiete, anbaufrei, mit Verbindungsfunktion	96	108	310
2	Überregionale / regionale Strassenverbindung, ausserhalb bebauter Gebiete, anbaufrei, mit Verbindungsfunktion	77	84	102
3	Überregionale / regionale Strassenverbindung, innerhalb bebauter Gebiete, anbaufrei, mit Verbindungsfunktion	66	69	159
4	überregionale/regionale Strassenverbindung, innerhalb bebauter Gebiete, angebaut, mit Verbindungsfunktion	73	75	573
5	zwischenkommunale Strassenverbindung, ausserhalb bebauter Gebiete, anbaufrei, mit Verbindungsfunktion	58	59	319
6	zwischenkommunale Strassenverbindung, innerhalb bebauter Gebiete, angebaut, mit Verbindungsfunktion	56	57	3'448
7	flächenerschliessende Strassenverbindung, innerhalb bebauter Gebiete, angebaut, mit Verbindungsfunktion	29	29	879
8	Übrige Strecken	66	67	95
9	Besondere Strecken (Schiff, Seilbahn etc.)			

Der Obertyp 1 entspricht dem Streckentyp HLS, womit mittlere Geschwindigkeiten im unbelasteten Netz (v_0) von 108 km/h und mittlere Geschwindigkeiten im belasteten Netz (v_{Akt}) von 96 km/h plausibel sind. Damit ist die Abweichung zwischen den mittleren Geschwindigkeiten im unbelasteten und belasteten Netz für diesen Obertyp am grössten, was grundsätzlich plausibel ist. Die Obertypen 2 bis 6 umfassen Ausserortsstrecken und Hauptverkehrsstrassen innerhalb bebauter Gebiete. Auch hierfür sind die Geschwindigkeiten von rund 60 bis 85 unauffällig. Innerortsstrecken mit Erschliessungscharakter gehören zum Obertyp 7. Mittlere Geschwindigkeiten um 30 km/h sind daher ebenfalls plausibel. HVS innerorts sind dem Obertyp 3 zuzuordnen. Dass die mittleren Geschwindigkeiten des Obertyps 3 mit 75 km/h deutlich über der Innerortsgeschwindigkeit von 50 km/h liegen, ist in dem verhältnismässig grossen Anteil an Ausserortsstrecken, die diesem Obertyp angehören, geschuldet. Es ist daher schwierig Aussagen zur Plausibilität der Geschwindigkeiten für diesen Obertyp zu machen. Im nächsten Schritt wäre daher zu prüfen, ob die Bezeichnung des Obertyps oder die Zuweisung der Strecken zu einem Obertyp angemessen sind.

VM Region Stuttgart

Die folgende Tabelle zeigt die mittlere Geschwindigkeit pro Strassenklasse im Untersuchungsraum des VM Region Stuttgart für das Verkehrsmittel PW. Bei allen Streckenklassen stimmen die Modelldaten mit der Erwartung an den Geschwindigkeitsbereich und der Erwartung, dass die Geschwindigkeiten im belasteten Netz niedriger sind als im unbelasteten Netz, überein.

Tab. 26 Mittlere Geschwindigkeit und Gesamtlänge pro Strassenklasse im Untersuchungsraum - VM Region Stuttgart.

Beschreibung	v_{Akt} [km/h]	v_0 [km/h]	Länge [km]
Autobahn	73	101	334
Bundesstrasse	53	62	976
Landesstrasse	50	55	2'666
Kreisstrasse	50	52	2'783
Sonstige Strasse	32	33	17'409

VM Neuchâtel

Die folgende Tabelle zeigt die mittlere Geschwindigkeit pro Strassenklasse im VM Neuchâtel für den Kanton Neuchâtel. Es wurden wiederum die im Modell hinterlegten Obertypen für die Klassifikation verwendet.

Tab. 27 Mittlere Geschwindigkeit und Gesamtlänge pro Strassenklasse - VM Neuchâtel.

Obertyp	Beschreibung	v_{Akt} [km/h]	v_0 [km/h]	Länge [km]
1	Autobahnen und Autostrassen	102	103	44
2	Strassentunnel auf Autobahnen und Autostrasse	88	90	30
3	Nicht zugewiesen			
4	Hauptverkehrsstrassen ausserorts	76	78	186
5	Verbindungsstrassen ausserorts	68	68	384
6	Alpine Transitstrassen	79	79	85
7	Strassentunneln auf Hauptverkehrstrassen	56	56	28
8	Städtische Hauptverkehrsstrassen und Erschliessungstrassen	41	43	366
9	Fähren			

Die Obertypen 1 und 2 umfassen Autobahnen und Autostrassen einschliesslich der Tunnelstrecken. Die hohen mittleren Geschwindigkeiten im unbelasteten Netz bei diesen beiden Obertypen sind somit plausibel. Hauptverkehrs- und Verbindungsstrassen ausserorts wurden die Obertypen 3 und 4 zugewiesen. Eine mittlere Geschwindigkeit von 78 respek-

tive 68 km/h im unbelasteten Netz ist für diese Strecken angemessen. Städtische Hauptverkehrsstrassen und Erschliessungsstrassen sind unter einem Obertyp 8 zusammengefasst. Dazu passt eine mittlere Geschwindigkeit von 43 km/h im unbelasteten Netz.

Anzahl Haltestellen je Verkehrszelle

GVM Zürich

Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl Haltestellen pro Verkehrszelle. Es zeigt sich, dass gegen den Modellrand die Zellen tendenziell mehr Haltestellen aufweisen. Dies ist darin begründet, dass gegen den Modellrand die Zellengrösse zunimmt.

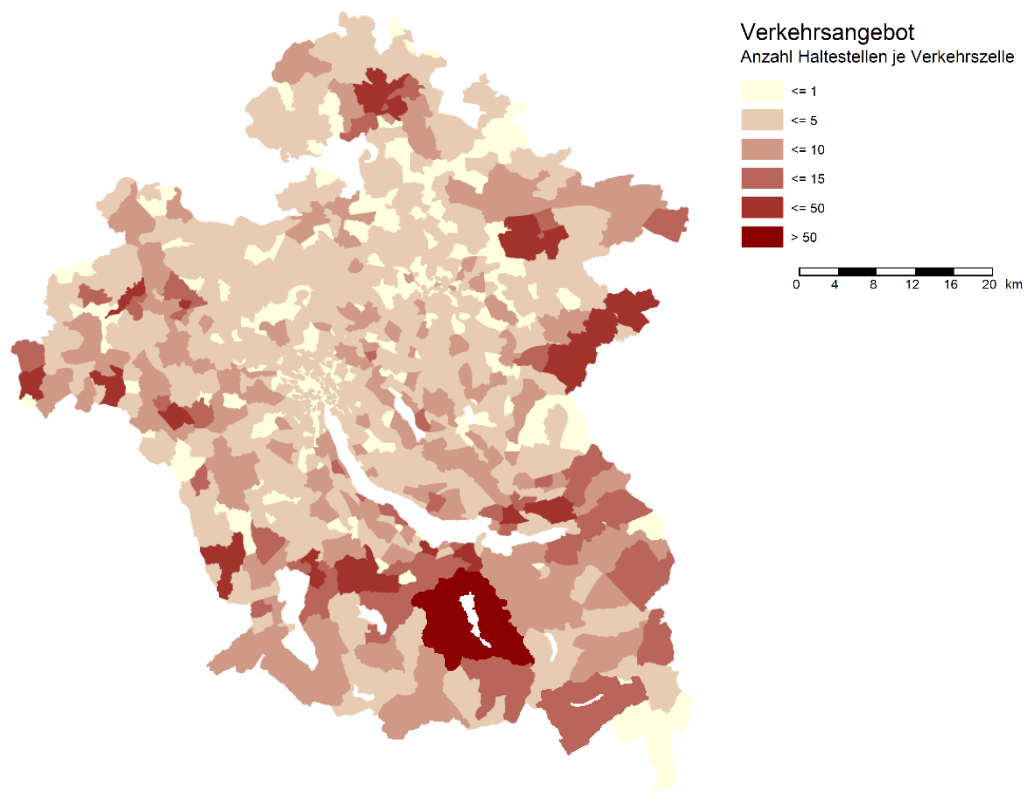


Abb. 77 Anzahl Haltestellen pro Verkehrszone - GVM Zürich.

Wird hingegen pro Zelle die Haltestellendichte [Anzahl Haltestellen/km²] dargestellt, so zeigt sich ein erwartetes Bild: In den Zentren ist die Dichte grösser als in ländlichen Gebieten. Die räumliche Verteilung ist plausibel.

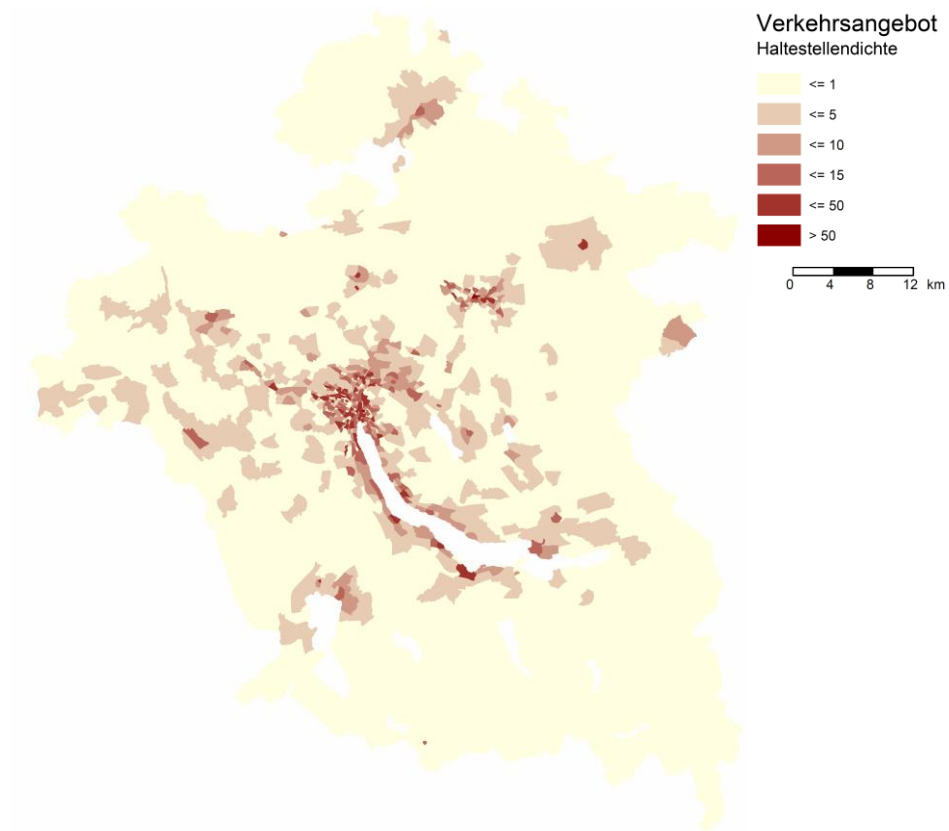


Abb. 78 Haltestellendichte [Anzahl Haltestellen/km²] pro Verkehrszone - GVM Zürich.

VM Region Stuttgart

Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl Haltestellen pro Verkehrszelle. Es zeigt sich, dass gegen den Modellrand die Zellen tendenziell mehr Haltestellen aufweisen. Dies ist darin begründet, dass gegen den Modellrand die Zellengröße zunimmt.

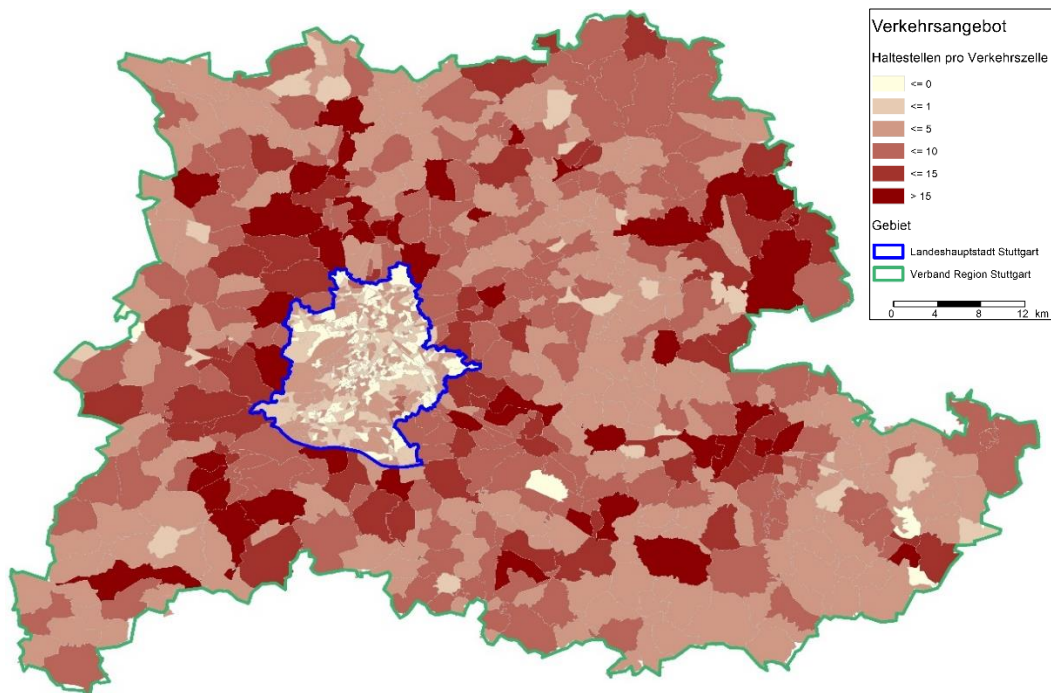


Abb. 79 Anzahl Haltestellen pro Verkehrszone im Planungsraum - VM Region Stuttgart.

Wenn zudem eine Darstellung z.B. ohne die Bushaltestellen gewünscht ist, bietet sich differenzierte Darstellung nur für SPNV-Haltestellen an.

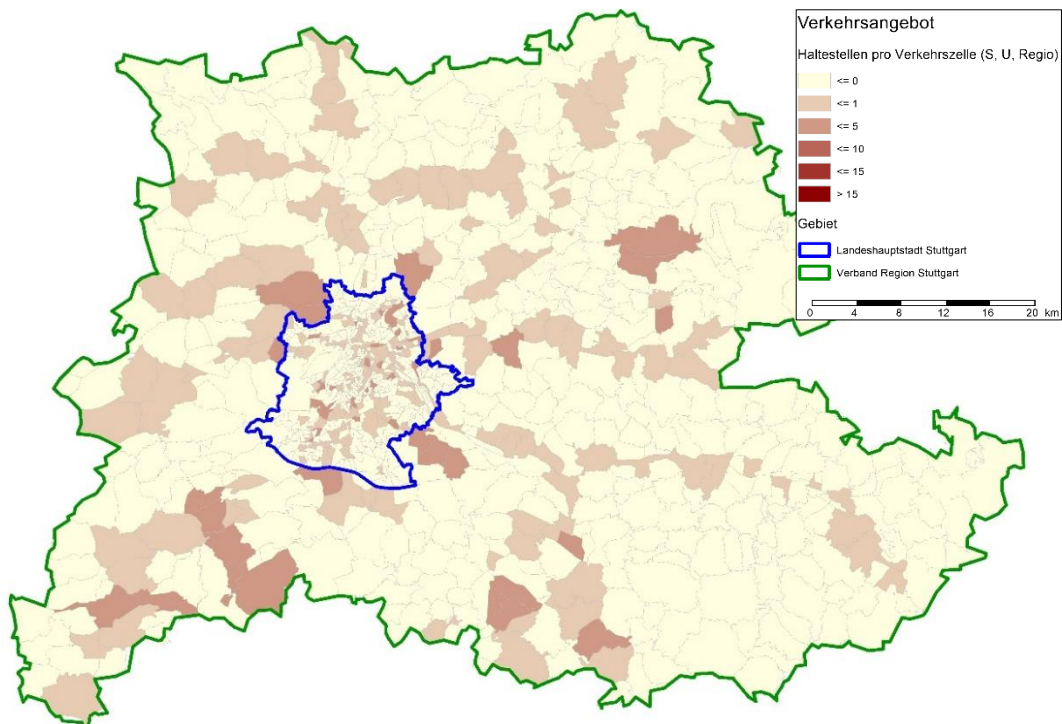


Abb. 80 Anzahl SPNV-Haltestellen pro Verkehrszone im Planungsraum - VM Region Stuttgart.

VM Neuchâtel

Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl Haltestellen pro Verkehrszelle für das VM Neuchâtel. Es zeigt sich, dass Zonen unmittelbar angrenzend zum Kantonsgebiet tendenziell mehr Haltestellen aufweisen. Dies ist darin begründet, dass ausserhalb des Kantonsgebiets die Zellengrösse zunimmt. Das ÖV Angebot ist jedoch nicht im gesamten Modellgebiet erfasst, weshalb einzelne Zonen ausserhalb des Kantonsgebiets oder bereits im Ausland gelegene Zonen im Modell keine Haltestellen aufweisen.

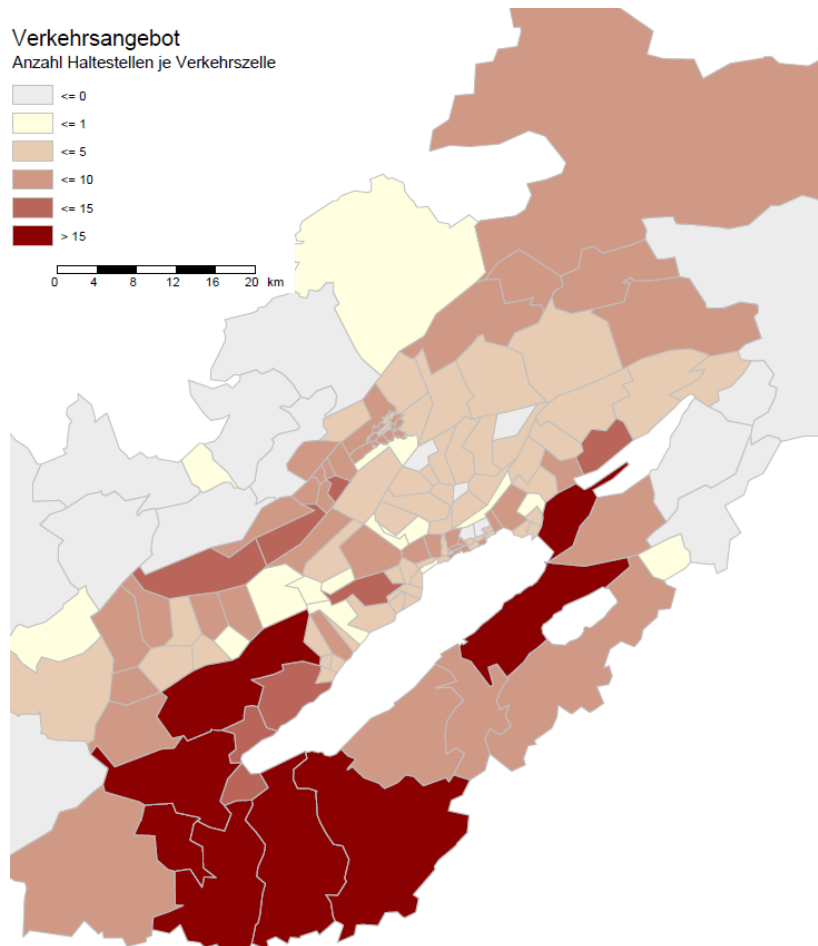


Abb. 81 Anzahl Haltestellen je Verkehrszelle - VM Neuchâtel.

Wird pro Zelle die Haltestellendichte [Anzahl Haltestellen/km²] dargestellt, so zeigt sich ein erwartetes Bild: In den Zentren Neuchâtel und La Chaux-de-Fonds ist die Haltestellendichte grösser als in ländlichen Gebieten.

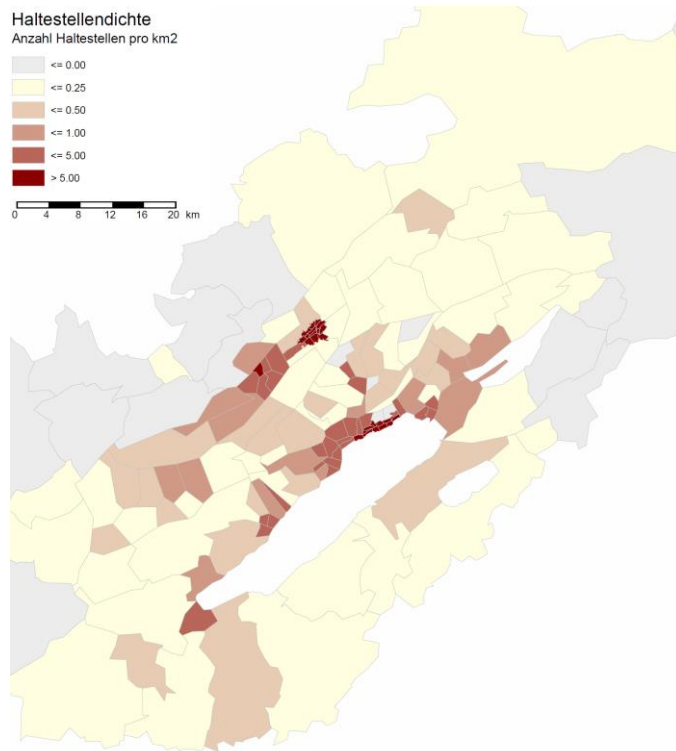


Abb. 82 Haltestellendichte [Anzahl Haltestellen pro km²] - VM Neuchâtel.

Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung

Das Reisezeitverhältnis von Hin- und Gegenrichtung sollte bei einem Tagesmodell (DTV bzw. DWV) Werte nahe bei 1 aufweisen. Für die Auswertungen werden nur Relationen mit einer Luftliniendistanz > 10 km betrachtet. Damit soll sichergestellt werden, dass kleinräumige Effekte wie Einbahnregimes und Abbiegeverbote in den Städten das Ergebnis nicht dominieren. Das Reisezeitverhältnis wurde wie alle nachfolgenden Analysen auf der Basis von Kenngrößen berechnet.

GVM Zürich

Wie in Abb. 83 dargestellt weist der grösste Teil der Relationen (81%) ein Hin- und Rückrichtungsverhältnis von 1 bis 1.2. auf. Insgesamt 7'983 Relationen weisen ein Verhältnis von >2 auf.

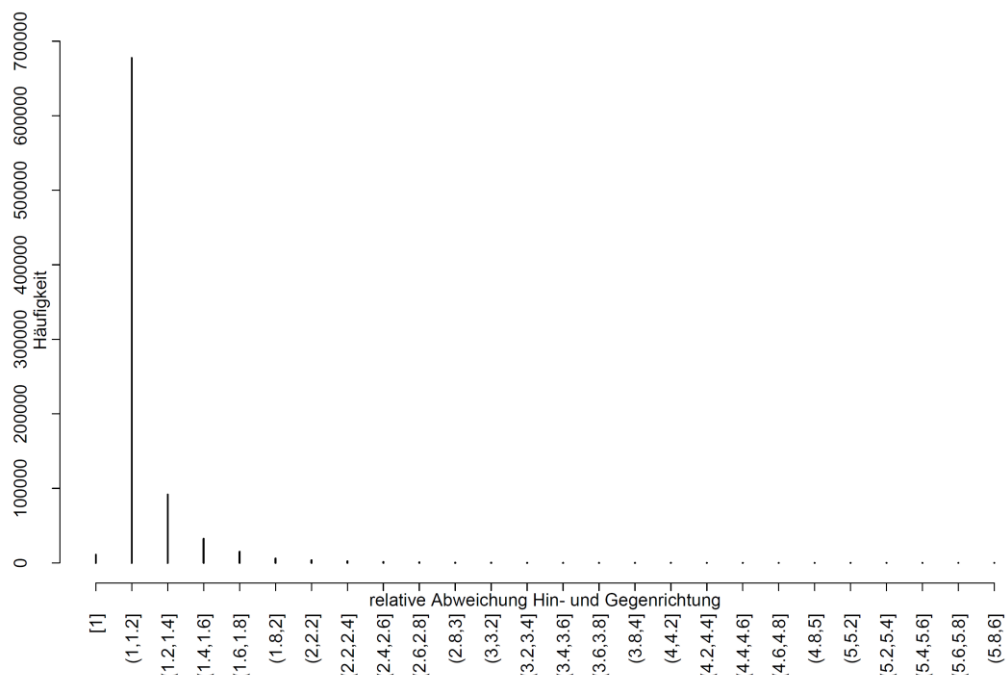


Abb. 83 Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung - GVM Zürich.

Das grösste Verhältnis von Hin- und Gegenrichtung weist mit Faktor 5.8 die Relation zwischen Zürich Gewerbeschule (Nr. 26105106) und Gossau (ZH) West (Nr. 11500003) auf. Von Zürich Gewerbeschule nach Gossau West dauert die Fahrt im Modell rund 36 Minuten. Auffällig ist bei Betrachtung der streckenfeinen Wege, dass bei einem Weg ein Abbieger ein t_{Akt} von fast 6 Minuten aufweist. Die Gegenrichtung dauert gemäss Modell 3 Stunden und 38 Minuten. Grund für diese extrem lange Dauer sind wiederum die Abbieger: Ein Weg passiert einen Knoten mit 27 Minuten Wartezeit (t_{Akt}). Auch für weitere Relationen waren die Unterschiede zwischen der Hin- und Rückrichtung häufig auf Abbieger mit sehr langen Reisezeiten zurück zu führen.

Daher wird in der folgenden Abbildung die Häufigkeit der Fahrzeiten auf den Abbiegern im belasteten Netz (t_{Akt}) dargestellt. Zuschläge von 0 Sekunden und Abbieger mit einer Kapazität von 99999 Fz/Tag (Abbiegeverbote) sind ausgeklammert. Über 100 Abbieger weisen eine Fahrtzeit auf dem Abbieger von mehr als 15 Minuten auf.

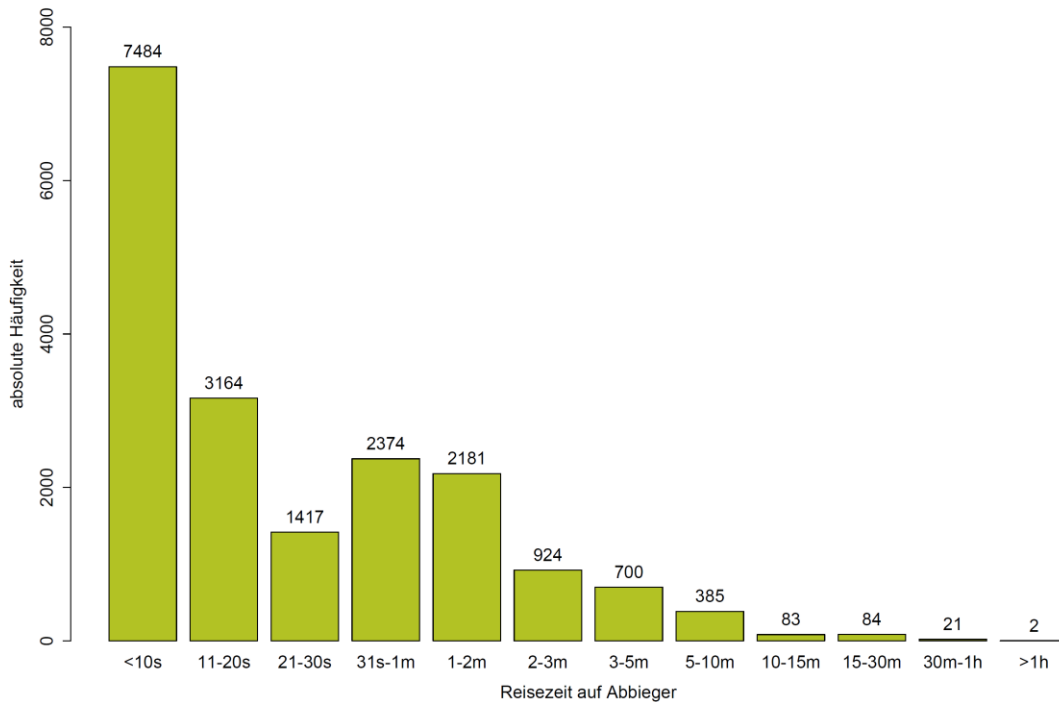


Abb. 84 Histogramm der Reisezeiten auf Abbiegern - GVM Zürich.

Die hohen Wartezeiten an den Knoten sind in der Regel auf zu geringe Kapazitäten für ein DWV-Modell zurückzuführen. Das folgende Histogramm zeigt die Kapazitäten der Abbieger, wobei unendliche Kapazitäten ausgeklammert sind. Von 149'152 Abbiegern wurde 143'794 eine unendliche Kapazität zugewiesen und 718 eine Kapazität von Null (gesperrte Abbieger). 2'622 Abbieger weisen eine Kapazität von kleiner oder gleich 1'000 Fz pro Tag auf. Dies weist darauf hin, dass bei einer Qualitätssicherung des Modells die Kapazitäten und Abbiegezuschläge im Detail geprüft werden sollten.

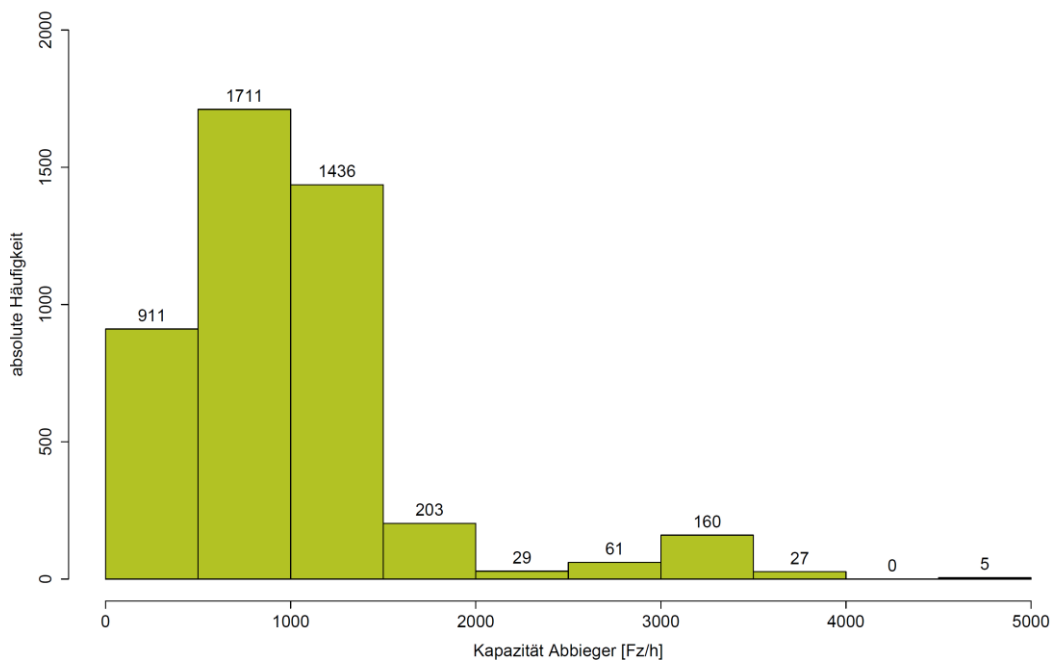


Abb. 85 Histogramm der Abbiegekapazitäten - GVM Zürich.

VM Region Stuttgart

Wie in Abb. 86 dargestellt, weist im VM Region Stuttgart ca. 94% aller betrachteten Relationen ein Verhältnis zwischen 0.9 und 1.1 auf, ca. 99% aller betrachteten Relationen liegt im Bereich von 0.8 bis 1.2. Nur zwei Relationen weisen ein Verhältnis von >2 auf. Abweichend von den Auswertungen des GVM Zürich und des VM Neuchâtel wurden vom VM Region Stuttgart bereits Relationen ausgewertet die mindestens 4 km Luftlinienentfernung aufweisen, da es sich beim betrachteten Untersuchungsraum fast komplett um ein engmaschiges städtisches Netz handelt.

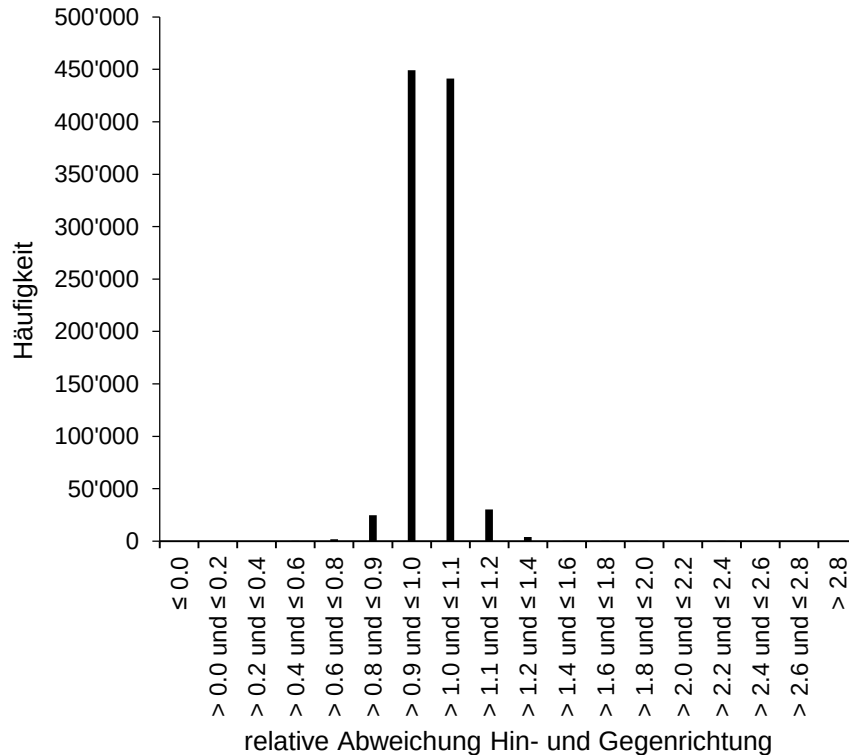


Abb. 86 Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung für PW - VM Region Stuttgart.

Das grösste Verhältnis von Hin- und Gegenrichtung weist mit einem Faktor von 2.3 die Relation zwischen «Echterdingen» (Nr. 57803) und «Stuttgart-Möhringen» (Nr. 25271) auf. Die mittlere Fahrzeit (exkl. Anbindungszeit) für PW im belasteten Netz beträgt in eine Richtung ca. 9.6 Minuten und zurück ca. 4.2 Minuten. Ursache für die Abweichung ist in diesem Fall die Wahl der Anbindung¹⁵. Exemplarisch wird dies an Abb. 87 verdeutlicht. Das linke Bild zeigt die Zielzelle «Stuttgart-Möhringen». Die Zufahrt erfolgt über die B27. Das rechte Bild zeigt ebenfalls «Stuttgart-Möhringen», aber als Quellzelle. Die Auffahrt auf die B27 erfolgt im rechten Bild über die Auffahrt des SI-Zentrums. Dies ist nicht falsch, da das SI-Zentrum in dieser Verkehrszelle einen erheblichen Anteil an der Erzeugung des Freizeitverkehrs hat. Es führt aber dazu, dass die Summe der Streckenfahrzeiten für Hin- und Gegenrichtung allein im abgebildeten Teilnetz um mehr als 2 Minuten abweicht.

¹⁵ Es sind prozentuale Anbindungen modelliert.

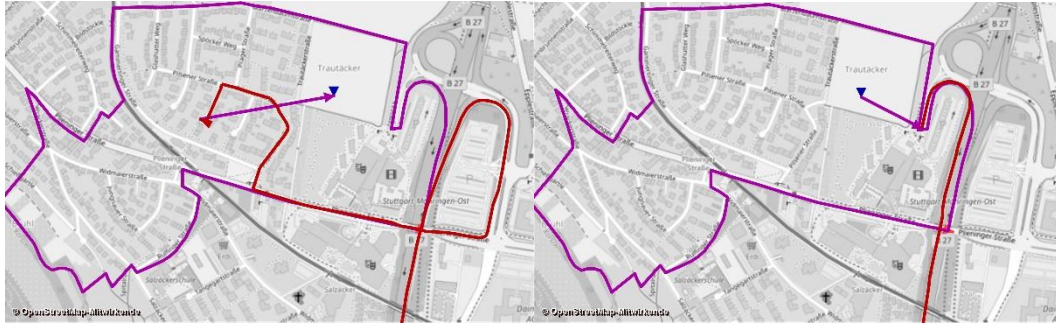


Abb. 87 Abweichungen in der Hinrichtung (links) und Gegenrichtung (rechts) am Beispiel «Stuttgart-Möhringen» - VM Region Stuttgart.

VM Neuchâtel

Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, weisen im VM Neuchâtel 48.6% aller betrachteten Relationen ein Verhältnis von 1 auf. Die restlichen 51.4% der Relationen weisen ein Hin- und Rückrichtungsverhältnis von 1 bis 1.2. auf. Das sehr ausgeglichene Hin- und Rückrichtungsverhältnis zwischen allen Relationen deutet auf eine korrekte Kodierung des Angebots hin.

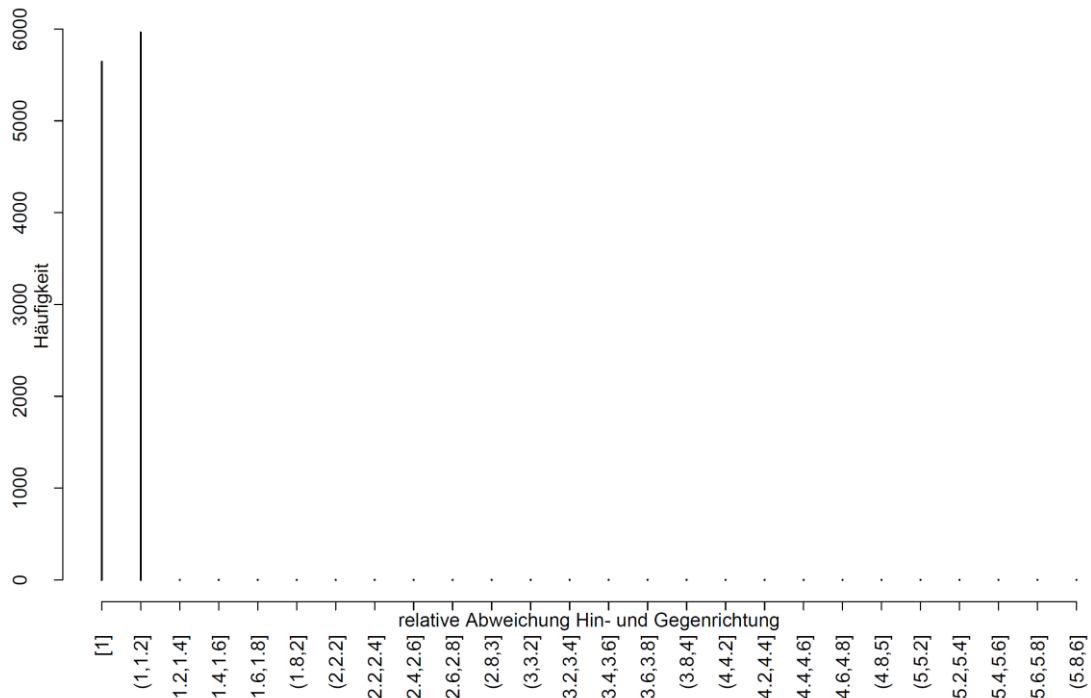


Abb. 88 Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung - VM Neuchâtel.

Anteil der Wartezeiten an Knotenpunkten bezogen auf die gesamte Fahrtzeit

GVM Zürich

Im Folgenden sind die Histogramme der Anteile der Abbiegezuschläge an der gesamten Reisezeit für folgende vier Distanzklassen dargestellt:

- < 5 km
- 5 – 20 km
- 20 – 50 km
- > 50 km

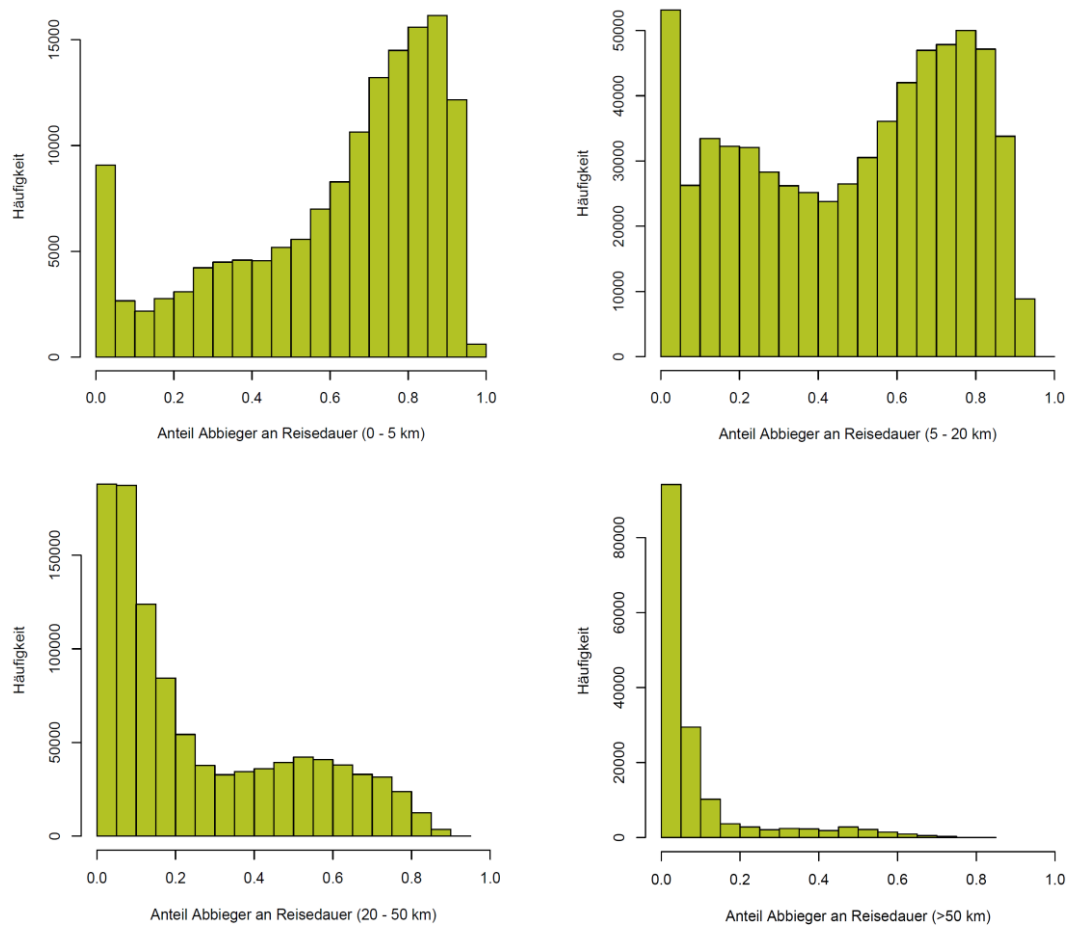


Abb. 89 Anteil der Abbiegezeiten an der Fahrtzeit nach Distanzklasse - GVM Zürich.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass bei kurzen Fahrten (< 5 km) der Anteil der Verlustzeiten an Knoten grösser ist als bei längeren Fahrten. So sind in den Städten auch die Knoten und nicht die Streckenkapazitäten für die Verkehrsqualität massgebend. Mit zunehmenden Distanzen wird die Verteilung dann sehr rechtsschief. Im GVM Zürich ist der Anteil der Abbiegezeiten an den Fahrtzeiten jedoch insbesondere für die tiefen Distanzklassen deutlich höher als erwartet. Dies ist wahrscheinlich auf die hohen Wartezeiten und geringen Kapazitäten an einigen Knoten zurückzuführen, welche bei der Analyse des «Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung» aufgefallen ist. Somit weist auch diese Analyse darauf hin, dass bei einer Qualitätssicherung des Modells die Kapazitäten der Abbieger und Abbiegezuschläge im Detail geprüft werden sollten.

VM Region Stuttgart

Im Folgenden sind die Histogramme der Anteile der Abbiegezeiten an der gesamten Reisezeit im belasteten Netz für folgende vier Distanzklassen dargestellt:

- < 5 km Luftlinienentfernung
- 5 – 20 km Luftlinienentfernung
- 20 – 50 km Luftlinienentfernung
- > 50 km Luftlinienentfernung

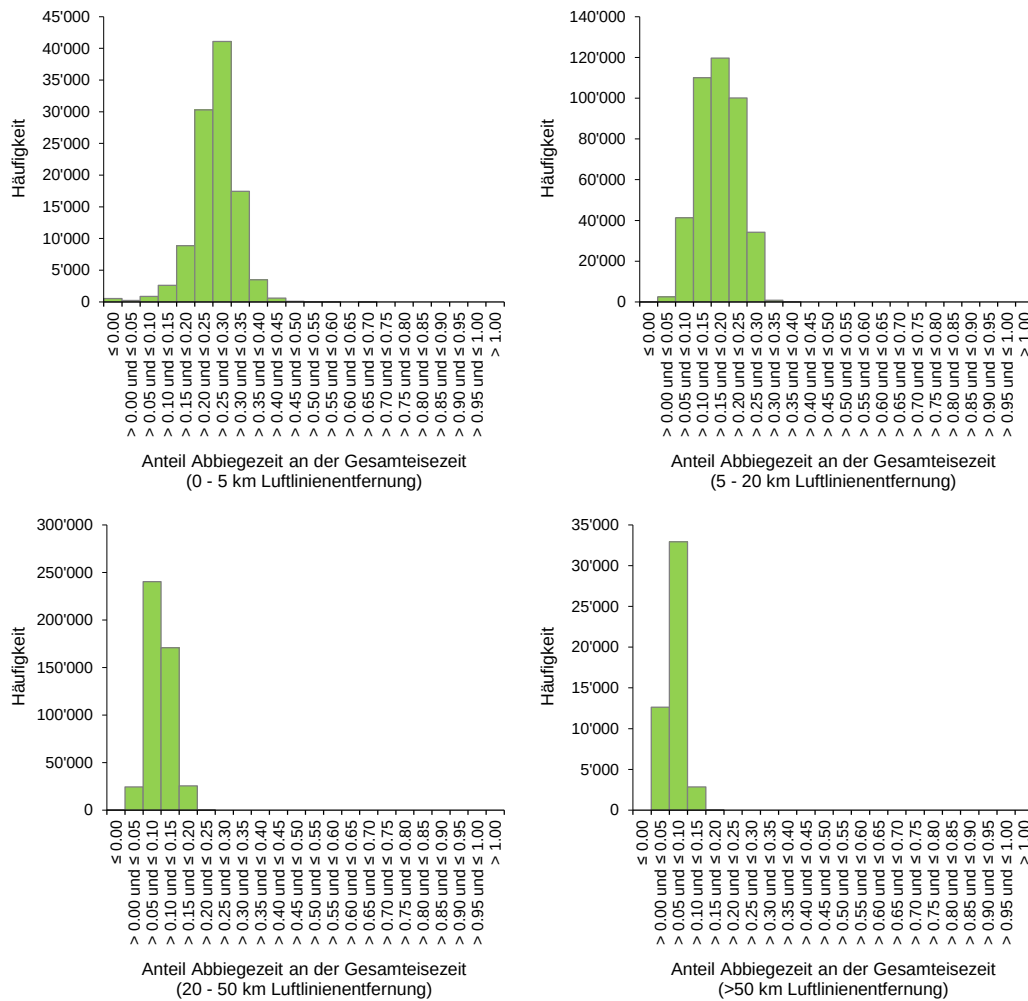


Abb. 90 Anteil der Abbiegezeit an der Gesamtreisezeit für verschiedene Reiseweitenklassen - VM Region Stuttgart.

Für diese Auswertung wurden nur Relationen betrachtet, die im Untersuchungsraum beginnen und enden. Die Abbildung zeigt, dass der Anteil der Abbiegezeit an der Gesamtreisezeit für kurze Strecken tendenziell höher ist als für lange Strecken. Ein niedriger Anteil bei langen Distanzen ist sinnvoll, da für diese Relationen hauptsächlich Autobahnen oder autobahnähnliche Strecken genutzt werden, die wenig Abbieger beinhalten. Bei den kurzen Relationen erscheint der Anteil etwas zu niedrig. Im VM Region Stuttgart werden kapazitätsunabhängige Knotenwiderstände modelliert (ca. 60% der ca. 536'000 PW-Abbieger besitzen eine Fahrzeit zwischen 1 sec und 15 min und ca. 40% besitzen eine Fahrzeit < 1 sec).

VM Neuchâtel

Im Folgenden ist das Histogramm der Anteil der Abbiegezuschläge an der gesamten Reisezeit für die Distanzklasse <5 km dargestellt:

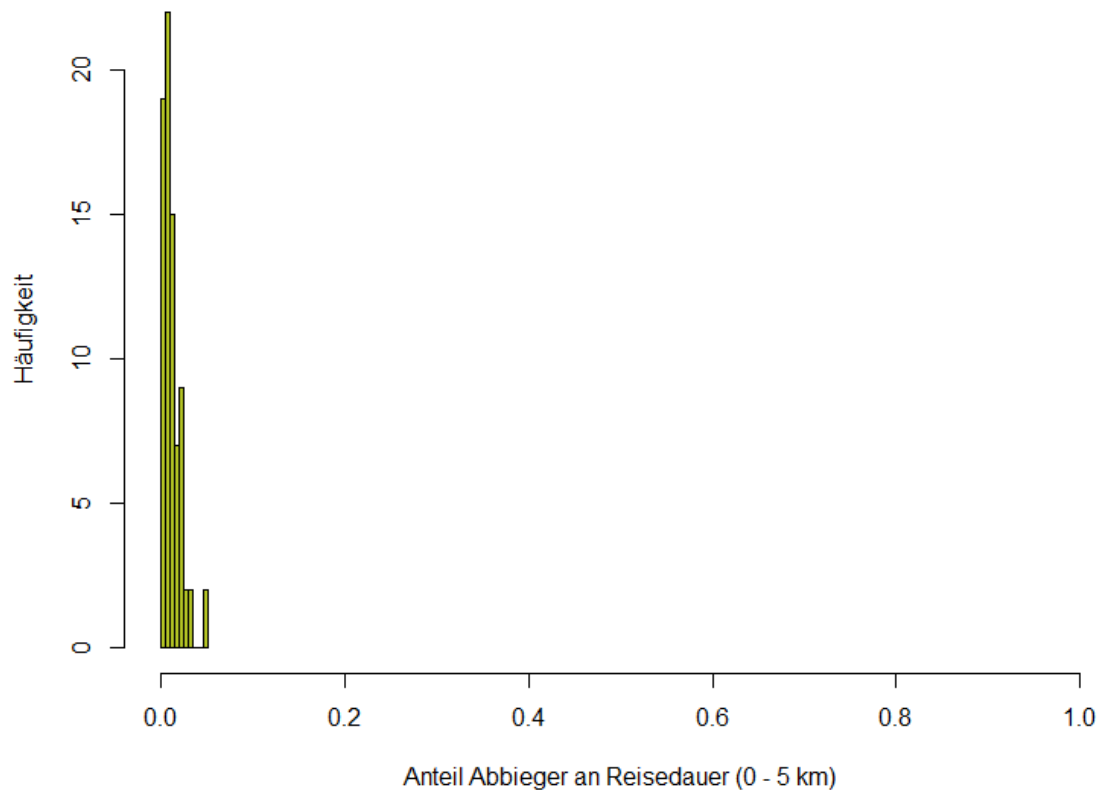


Abb. 91 Anteil Abbieger an der Reisedauer bei der Distanzklasse 0 – 5 km - VM Neuchâtel.

Bei allen Distanzklassen beträgt der Anteil Abbieger an der Gesamtreisedauer nie mehr als 6%. Analog zum VM Region Stuttgart wäre ein höherer Anteil Abbiegezeit an der Gesamtreisedauer bei kurzen Distanzen erwartet worden. Dies deutet darauf hin, dass im GVM-NE kaum Abbiegezuschläge modelliert sind. Eine Überprüfung der Modellversion zeigt, dass nur 112 von total 21'740 (0.5%) Abbieger mit einem Zuschlag versehen sind.

Dieselben Histogramme wurden auch für die Distanzklassen 5 – 20 km, 20 – 50 km und für Distanzen >50 km überprüft. Der Effekt der kleinen Anteile der Verlustzeiten am Knoten zeigt sich umso ausgeprägter je grösser die Distanzklasse wird.

Anteil der Anbindungszeiten an der gesamten Reisezeit

GVM Zürich

Im Folgenden sind die Histogramme der Anteile der Anbindungszeiten an der gesamten Reisezeit für folgende vier Distanzklassen dargestellt:

- < 5 km
- 5 – 20 km
- 20 – 50 km
- > 50 km

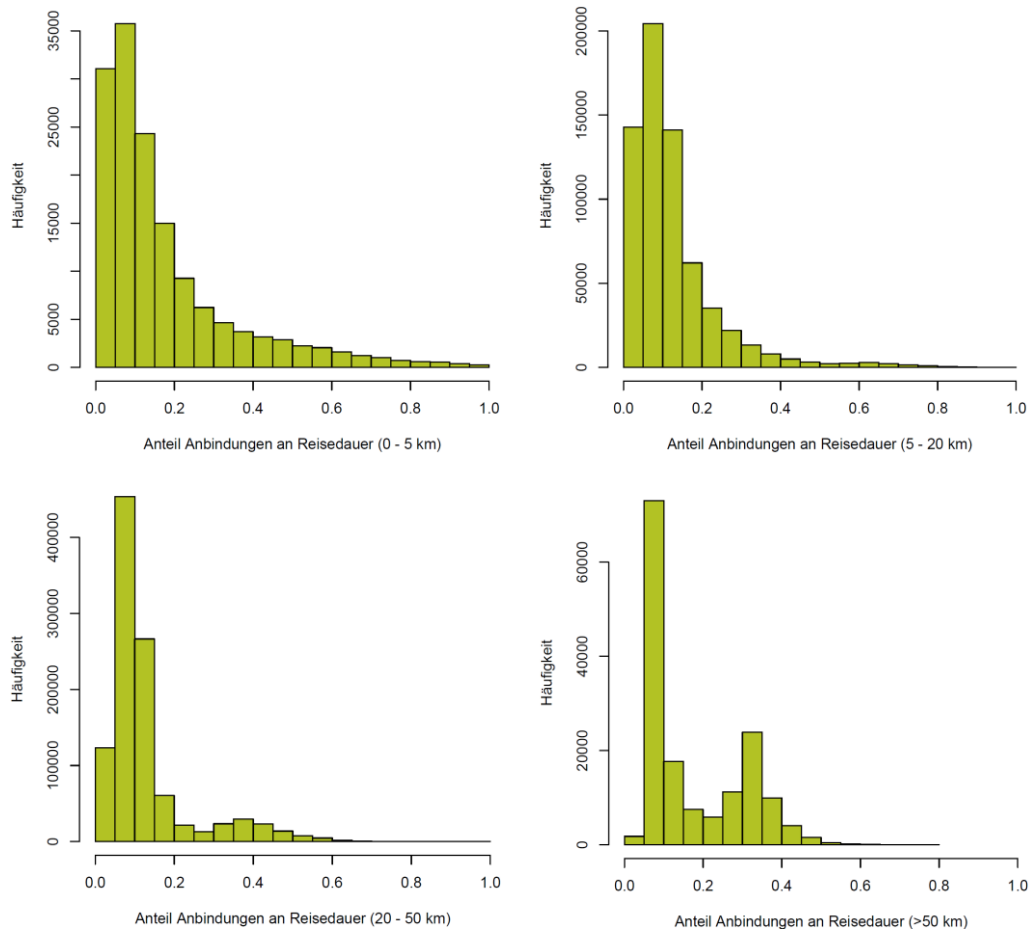


Abb. 92 Anteil der Anbindungszeiten an der Fahrtzeit nach Distanzklasse - GVM Zürich.

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Distanzklasse die Verteilung tendenziell rechtsschiefer wird. Dies ist so zu erwarten, da bei längeren Fahrten die Anbindungen einen kleineren Anteil an der gesamten Reisezeit haben. Allerdings wird die Verteilung überlagert durch den Effekt der Aussenzonen. Aussenzonen weisen höhere Anbindungszeiten auf und fallen daher bei längeren Distanzen wiederum stärker ins Gewicht. So lässt sich z.B. die grosse Häufigkeit bei ca. 0.3 in der Verteilung der grössten Distanzklasse (> 50 km) erklären. Insgesamt erscheint dies plausibel.

VM Region Stuttgart

Im Folgenden sind die Histogramme der Anteile der Anbindungszeiten an der gesamten Reisezeit im belasteten Netz für folgende vier Distanzklassen dargestellt:

- < 5 km Luftlinienentfernung
- 5 – 20 km Luftlinienentfernung
- 20 – 50 km Luftlinienentfernung
- > 50 km Luftlinienentfernung

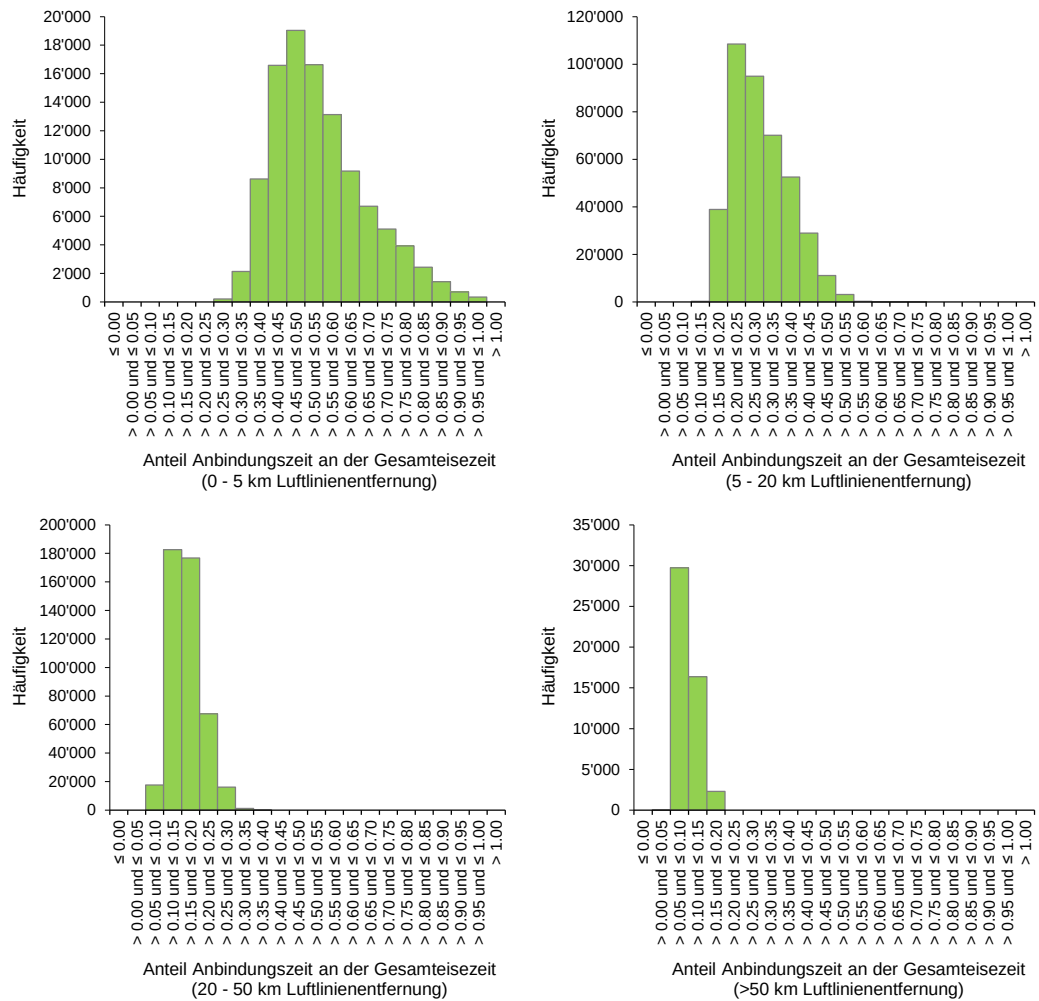


Abb. 93 Anteil der Anbindungszeit an der Gesamtreisezeit für verschiedene Reiseweitenklassen - VM Region Stuttgart.

Für diese Auswertung wurden nur Relationen betrachtet, die im Untersuchungsraum beginnen und enden. Während die Anbindungszeit bei kurzen Distanzen noch einen relativ hohen Anteil an der Gesamtreisezeit aufweist, nimmt dieser Anteil mit zunehmender Distanz ab. Dies erscheint plausibel.

VM Neuchâtel

Im Folgenden sind die Histogramme der Anteile der Anbindungszeiten an der gesamten Reisezeit für folgende vier Distanzklassen dargestellt:

- < 5 km
- 5 – 20 km
- 20 – 50 km
- > 50 km

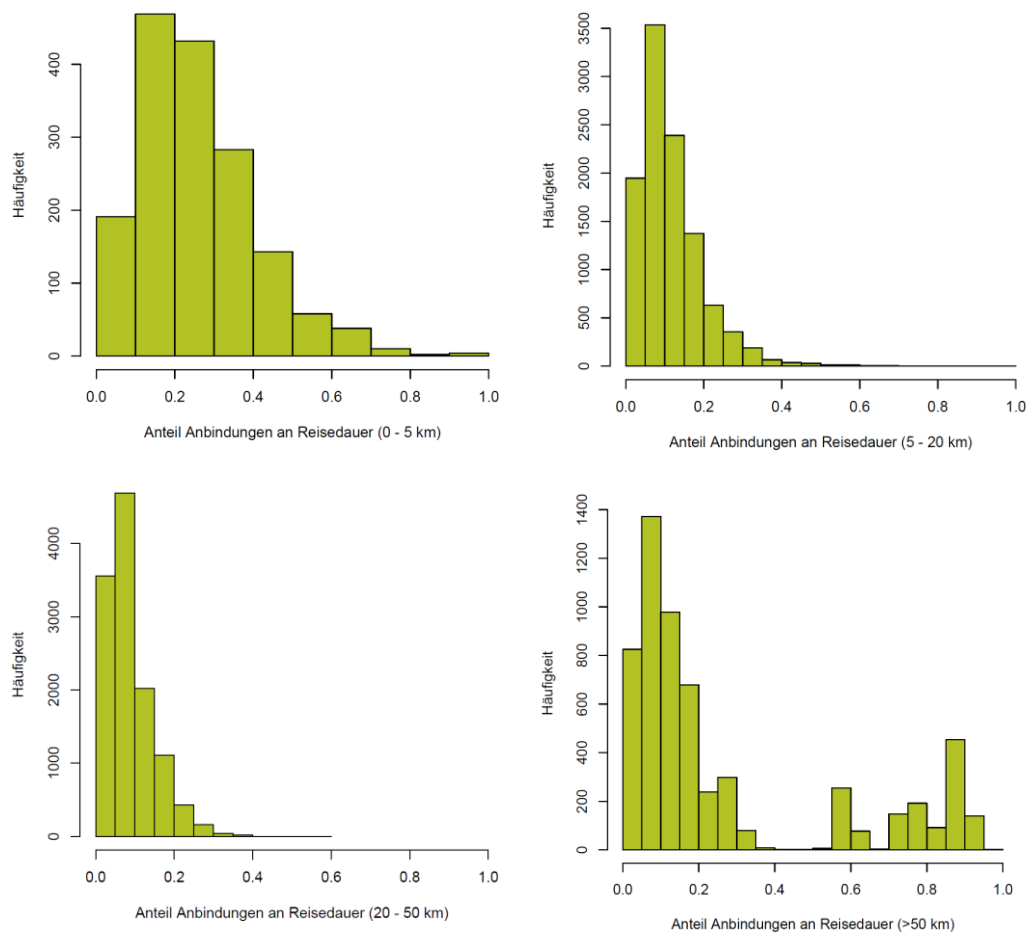


Abb. 94 Anteil Anbindungszeit an der Reisedauer nach Distanzklasse - VM Neuchâtel.

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Distanzklasse die Verteilung tendenziell rechtsschief wird. Dies ist so zu erwarten, da bei längeren Fahrten die Anbindungen einen kleineren Anteil an der Gesamtreisezeit ausmachen. Allerdings wird die Verteilung überlagert durch den Effekt der Aussenzonen. Aussenzonen weisen höhere Anbindungszeiten auf und fallen daher bei längeren Distanzen wiederum stärker ins Gewicht. So lassen sich die Anteile der Anbindungszeit an der Reisedauer von 0.6 und grösser in der Verteilung der grössten Distanzklasse (> 50 km) erklären. Insgesamt erscheint dies plausibel.

Vergleich der Kenngrössen (Reisezeiten) und der Fahrtrouten für ausgewählte Relationen mit Daten aus unabhängigen Quellen

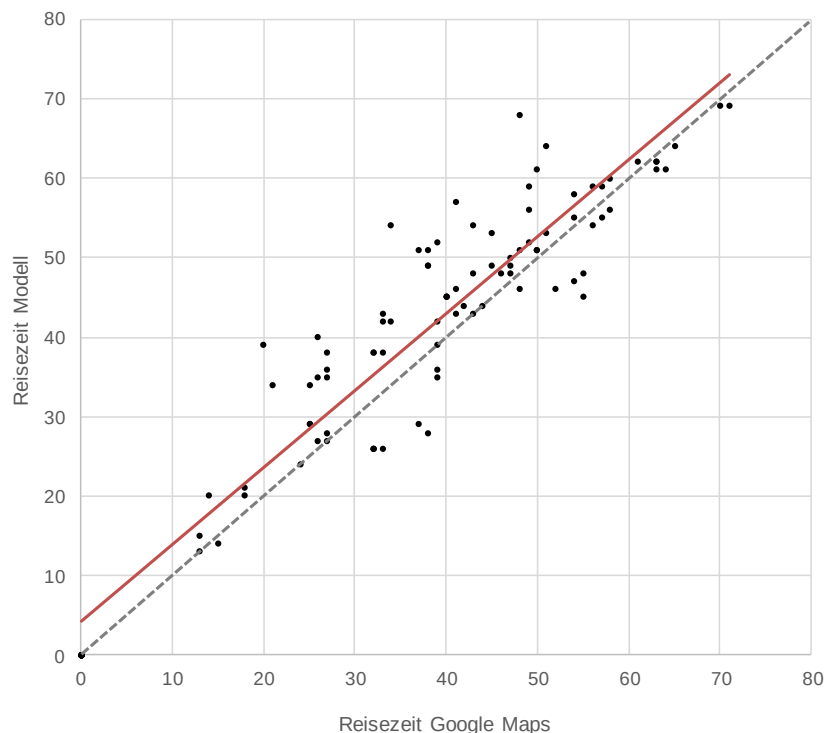
GVM Zürich

Es werden die Reisezeiten (aktuelle Reisezeit) MIV im Modell gemäss Kurzwegsuche (Wegwahl-Kriterium = aktuelle Reisezeit) mit den Reisezeiten gemäss Google Maps (im Januar um 20 Uhr) verglichen. Für den Vergleich werden sämtliche 90 Relationen zwischen den folgenden Knoten ausgewertet:

Tab. 28 Betrachtete Knoten für Reisezeitmessungen - GVM Zürich.

Koordinate	Ortschaft
47.269856, 8.637666	Meilen
47.502546, 8.730593	Winterthur
47.226622, 8.818443	Rapperswil
47.409189, 8.390845	Dietikon
47.699849, 8.635757	Schaffhausen
47.171888, 8.516349	Zug
47.518476, 8.538142	Bülach
47.556726, 8.895197	Frauenfeld
47.47177, 8.312026	Baden
47.420136, 8.556631	Zürich Oerlikon

Folgende Abbildung zeigt die Reisezeiten gemäss GVM Zürich und Google Maps in einem Streudiagramm. Es lässt sich nur eine sehr geringe systematische Abweichung feststellen. Die Werte streuen relativ zufällig um die gestrichelte Diagonale (Diagonale: Reisezeit gemäss Modell und gemäss Google Maps identisch). Es ist jedoch festzustellen, dass die Reisezeiten im Modell tendenziell tiefer sind als gemäss Google Maps (rote Regressionsgerade liegt über der Diagonalen). Zudem zeigt sich, dass bei langen Reisezeiten (>50 Minuten) die Werte gemäss GVM Zürich und Google Maps besser übereinstimmen als bei kürzeren Reisezeiten. Zumindest teilweise lässt sich dies damit erklären, dass bei längeren Routen kleinräumige Effekte vernachlässigbar sind.

**Abb. 95** Vergleich der DWV Reisezeiten aus Google Maps und GVM Zürich.

VM Region Stuttgart

Für diesen Test wurden ca. 2'250 Relationen zwischen Gewerbegebieten in der Region Stuttgart ausgewählt. Das Modell liefert als Tagesmodell eine Reisezeit (exkl. Anbindungszeit) je Relation. Sie wird den Google-Reisezeiten für drei Tageszeiten gegenübergestellt. Abb. 96 zeigt auf der x-Achse die Google-Reisezeiten und auf der y-Achse die zugehörigen modellierten Reisezeiten. Es wird deutlich, dass die modellierten Reisezeiten der morgendlichen und abendlichen Hauptverkehrszeit (mHVZ bzw. aHVZ) etwas niedriger sind als die Google-Reisezeiten. In der Normalverkehrszeit (NVZ) stimmen die Werte besser überein. Hier sind die modellierten Zeiten etwas höher als die Google-Reisezeiten. Die bessere Übereinstimmung zeigt sich beim Bestimmtheitsmass R^2 .

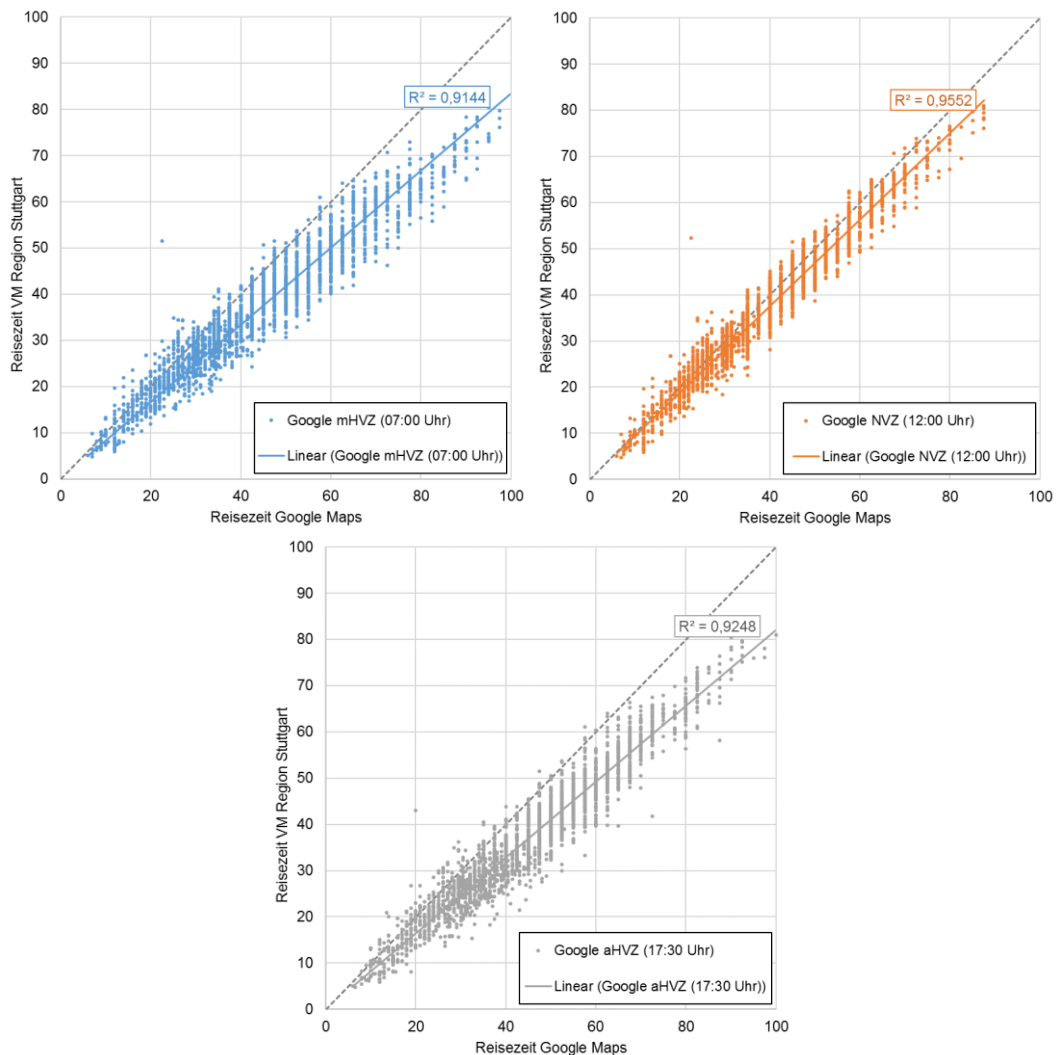


Abb. 96 Vergleich der Reisezeiten aus dem VM Region Stuttgart mit Google Maps Daten (oben links: morgendliche Hauptverkehrszeit; oben rechts: Normalverkehrszeit; unten: abendliche Hauptverkehrszeit).

Dieser Test liefert eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Modellwerten und den Referenzdaten von Google Maps. Die tageszeitlichen Unterschiede zeigen die Eigenschaften eines Tagesmodells.

VM Neuchâtel

Es werden die Reisezeiten MIV im Modell gemäss Kurzwegsuche (Wegwahl-Kriterium = aktuelle Reisezeit) mit den Reisezeiten gemäss Google Maps (im Januar um 20 Uhr) verglichen. Für den Vergleich werden sämtliche 90 Relationen zwischen den folgenden Knoten ausgewertet:

Tab. 29 Betrachtete Knoten für Reisezeitmessungen - VM Neuchâtel.

Koordinate	Ortschaft
46.995503, 6.94319	Neuchâtel, Maladière
47.133465, 7.243332	Biel
47.103454, 6.825808	La Chaux-de-Fonds
47.055899, 6.745714	Le Locle
46.894255, 6.772607	St-Aubin NE
46.777537, 6.652533	Yverdon
46.902187, 6.579182	Fleurier
46.979863, 6.60713	La Brévine
46.919583, 7.100639	Murten
47.25226, 7.004107	Saignelégier

Folgende Abbildung zeigt die Reisezeiten gemäss VM Neuchâtel und Google Maps in einem Streudiagramm. Es lässt sich eine systematische Abweichung feststellen. Die Reisezeiten im Modell liegen im Schnitt ungefähr 20% unter denjenigen aus Google Maps (rote Regressionsgerade liegt deutlich unter der Diagonalen). Die absolute Abweichung wird mit zunehmender Reisezeit sogar noch grösser (rote Regressionsgerade ist weniger steil als die Diagonale).

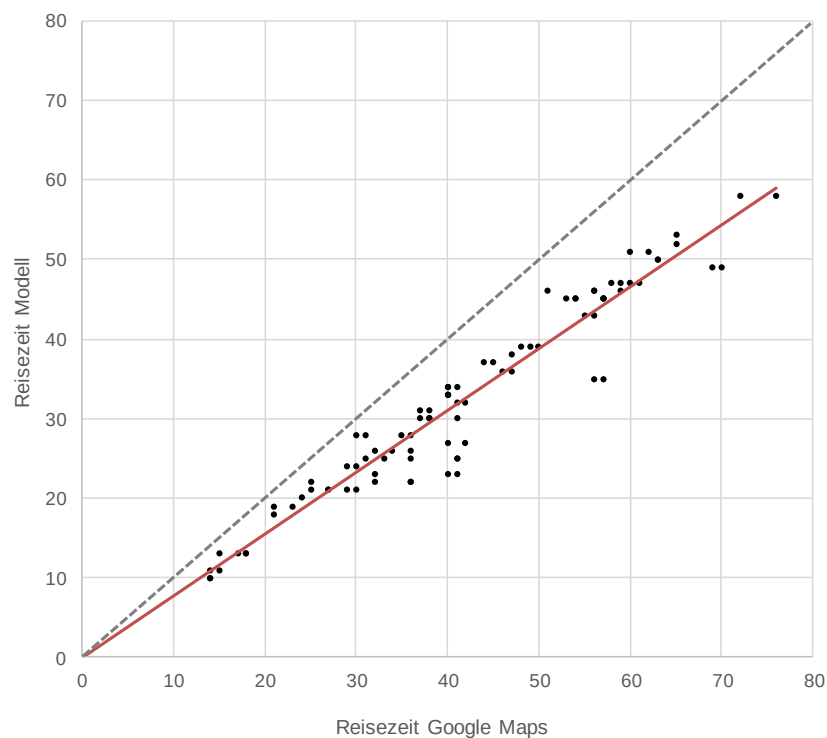


Abb. 97 Vergleich der DWV Reisezeiten aus Google Maps und VM Neuchâtel.

Fazit:

Für die Überprüfung des Verkehrsangebotes wurden Tests auf Ebene Netzwerkelemente und Kenngrößen ausgeführt. Die Tests waren bis auf eine Ausnahme gut durchführbar und hilfreich, um Hinweise darauf zu erhalten, welche Netzelemente genauer geprüft werden sollten. Die Ausnahme war der Vergleich der «mittleren Geschwindigkeit pro Strassenklasse». Zum einen sind für diesen Test keine Vergleichsdaten verfügbar und zum anderen ist die Aussagekraft des Tests stark abhängig davon, wie die Strassenklassen definiert worden sind.

8.2.4 Überprüfung der RIN-Kenngrößen

Die nachfolgenden Analysen zielen darauf ab, die Angebotsqualität des Verkehrsmodells zu evaluieren. Dazu wird der Anteil der Verbindungen zwischen allen Verkehrszellen ausgewiesen, welche die RIN-Kriterien erfüllen. RIN steht für «Richtlinien für integrierte Netzplanung» [27], ein in Deutschland gültiges Regelwerk zur Prüfung von Erreichbarkeiten und die funktionale Gliederung des Verkehrsnetzes. Im Rahmen von RIN stehen Kurven zur Verfügung, aus denen sich die Angebotsqualität (Stufen der Angebotsqualität – SAQ) verschiedener Kenngrößen in Abhängigkeit zur Luftlinienentfernung ablesen lässt. Für diesen Test werden die bestehenden Kurven erweitert, um damit „viel zu gute“ und „viel zu schlechte“ Verbindungen gezielt identifizieren zu können. Folgende Abbildung zeigt die modifizierten RIN-Kurven.

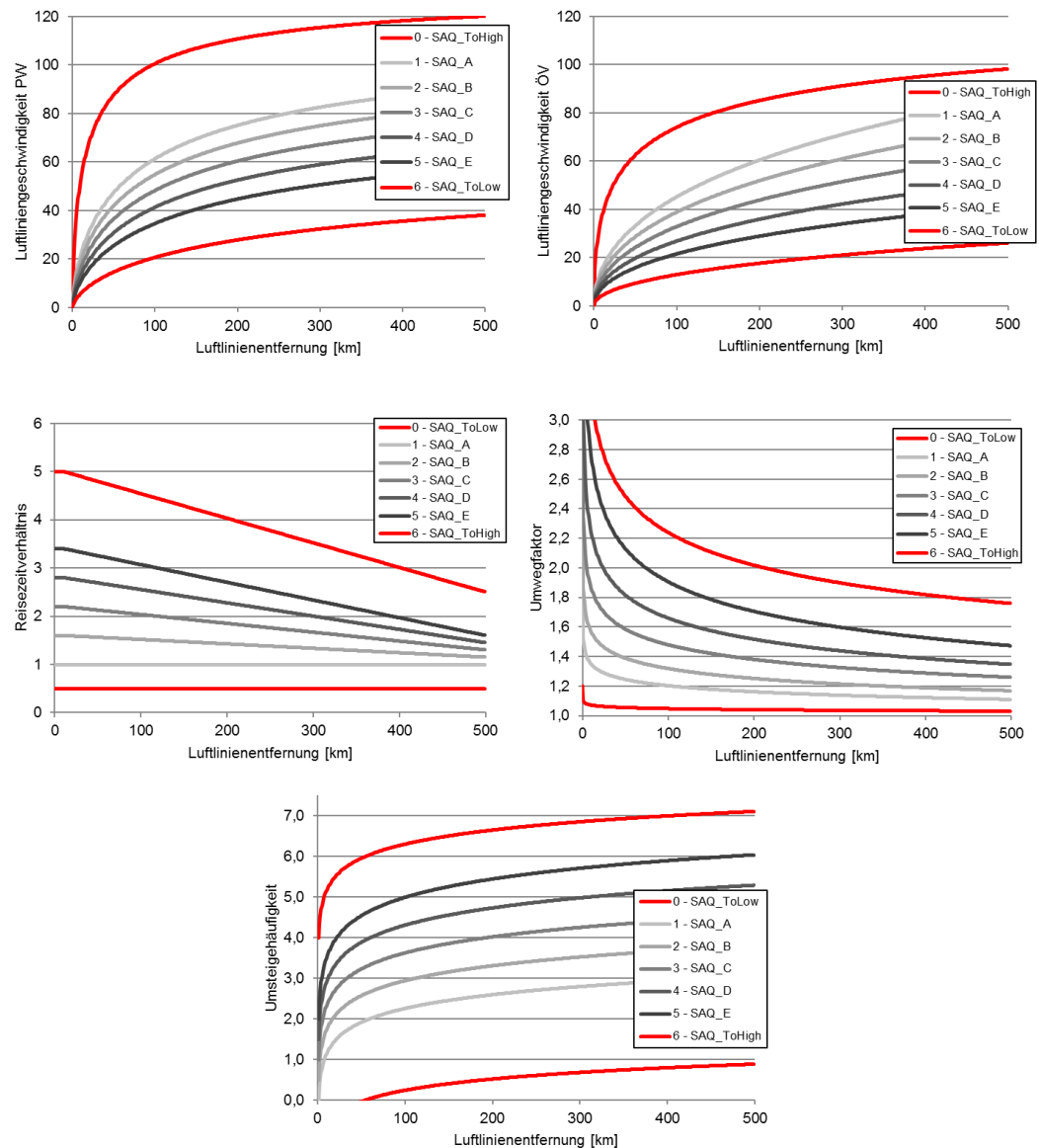


Abb. 98 RIN-Kurven für die PW-Luftliniengeschwindigkeit (oben links), die ÖV-Luftliniengeschwindigkeit (oben rechts), das Reisezeitverhältnis (ÖV/PW, Mitte links), den Umwegfaktor (Mitte rechts) und die Umsteigehäufigkeit (unten).

In den nachfolgenden Analysen wird für ausgewählte Kenngrößen die RIN-Qualitätsstufe für jede Relation ermittelt. Anschliessend wird jede Relation in eine der folgenden drei Evaluationskategorien eingeteilt

- Eval0 = Anforderungen eingehalten
- Eval1 = zu niedrige Werte
- Eval2 = zu hohe Werte

Daraus wurden Abbildungen erstellt, welche die Anteile der Verbindungen zwischen allen Verkehrszellen darstellen, welche in die Evaluationskategorie Eval1 oder Eval2 fallen.

Die Auswertung erfolgt für folgende Kennwerte (jeweils in Abhängigkeit zur Luftlinienentfernung):

- Luftliniengeschwindigkeit PW
- Luftliniengeschwindigkeit ÖV
- Reisezeitverhältnis ÖV/PW

- Umwegfaktor PW
- Umsteigehäufigkeit ÖV

Luftliniengeschwindigkeit PW

GVM Zürich

Wie in Abb. 99 zu sehen ist, weisen einzelne Gemeinden entlang der Goldküste des Zürichsees in über 10% aller Verbindungen eine zu niedrige Luftliniengeschwindigkeit im Verhältnis zur Luftlinienentfernung auf. Dies scheint grundsätzlich plausibel, da südlich des Zürichsees gelegene Gemeinden nur via Umwegfahrt durch die Stadt Zürich erreicht werden können. Im Gegensatz zu den Gemeinden auf der südlichen Seeseite, gibt es entlang der Goldküste keine Hochleistungsstrecke, was erklärt, weshalb bei Gemeinden entlang der Goldküste öfter die RIN Grösse unterschritten wird als bei Gemeinden auf der südlichen Seeseite.

Im Gegensatz dazu weisen Verkehrszellen des Kanton Zugs oder im «Säuliamt» verhältnismässig oft eine erhöhte Luftliniengeschwindigkeit auf. Diese Gebiete liegen allesamt im Einzugsgebiet der Autobahn N4, welche tendenziell eine geringere Auslastung als die restlichen Autobahnabschnitte des Kantons aufweist.

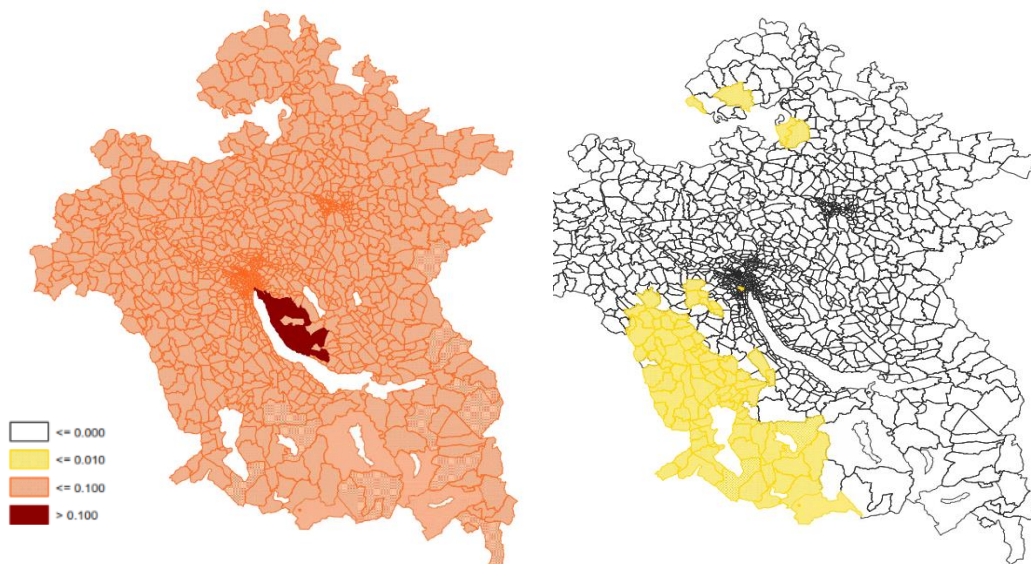


Abb. 99 Luftliniengeschwindigkeit PW zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - GVM Zürich.

Aufbauend auf dieser Grundeinschätzung können im Rahmen einer Modellüberprüfung dann einzelne Zellen genauer betrachtet werden, um die oben formulierten Hypothesen zu überprüfen. Exemplarisch für die Gemeinden mit einem höheren Anteil zu niedriger Reisezeiten wurde in Abb. 100 für die Gemeinde Erlenbach die Relationen mit zu niedriger Luftliniengeschwindigkeit dargestellt. Wie erwartet, sind dies vornehmlich Gemeinden auf der anderen Seite des Zürichsees. Dies bestätigt damit die oben formulierte Hypothese und ist grundsätzlich plausibel.

In Abb. 101 sind die Relationen mit einer zu hohen Luftliniengeschwindigkeit dargestellt. Es zeigt sich, dass es sich vor allem um Relationen zu einer Aussenzone handelt. Die Anbindung zu dieser Zone weist eine Geschwindigkeit von rund 190 km/h auf, was die hohen Luftliniengeschwindigkeiten für diese Relationen erklärt. Im Rahmen einer Modellüberprüfung wäre zu prüfen, ob dies vertretbar ist, da es sich um eine Aussenzone handelt oder ob an dieser Stelle Handlungsbedarf besteht.

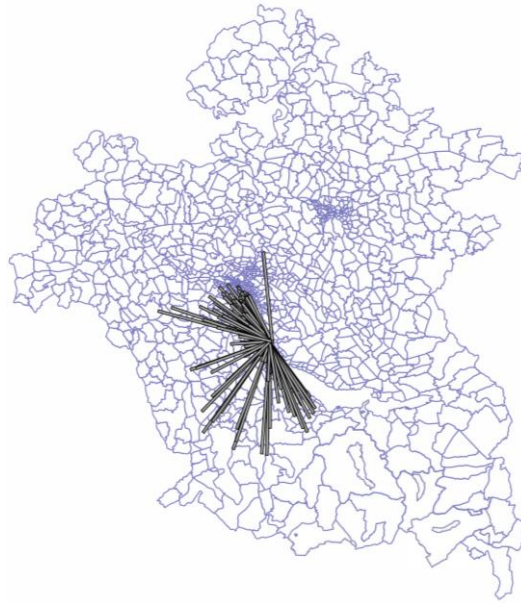


Abb. 100 Relationen von Erlenbach mit zu niedriger Luftliniengeschwindigkeit PW (Eval1)
- GVM Zürich.

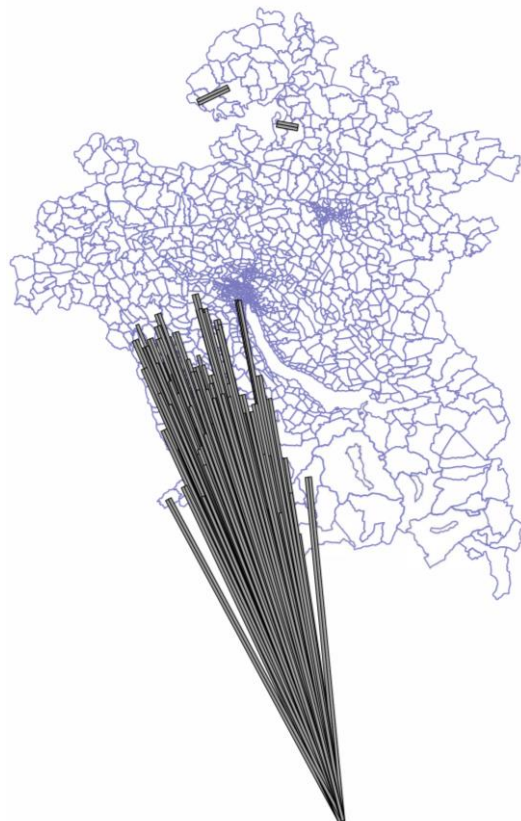


Abb. 101 Betroffene Relationen mit zu hoher Luftliniengeschwindigkeit PW (Eval2) - GVM Zürich.

VM Region Stuttgart

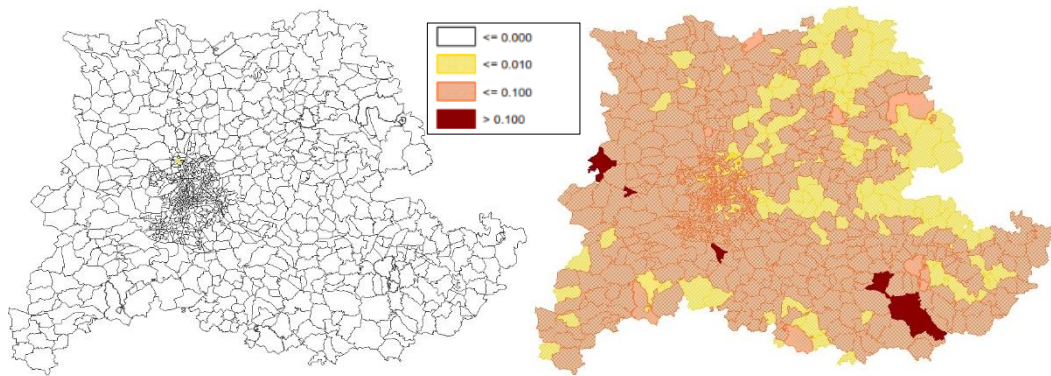


Abb. 102 Luftliniengeschwindigkeit PW zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Region Stuttgart.

Im Gebiet des VRS treten keine zu niedrigen PW-Luftliniengeschwindigkeiten auf. Die Verkehrszellen, bei denen mehr als 10% der Relationen zu schnell sind, liegen alle direkt an der Autobahn (A8). Dies plausibilisiert die Auffälligkeiten.

VM Neuchâtel

Eine zu geringe Luftliniengeschwindigkeit ist im GVM-NE in weniger als zehn Prozent aller Verbindungen vorzufinden. Stattdessen wird die Luftliniengeschwindigkeit PW in über 10% aller Fälle für die Zellen entlang des westlichen Ufers des Neuenburgersees als zu hoch eingeschätzt. Diesen Umstand lässt sich primär durch den dort vorhandenen HLS Abschnitt N5 begründen.

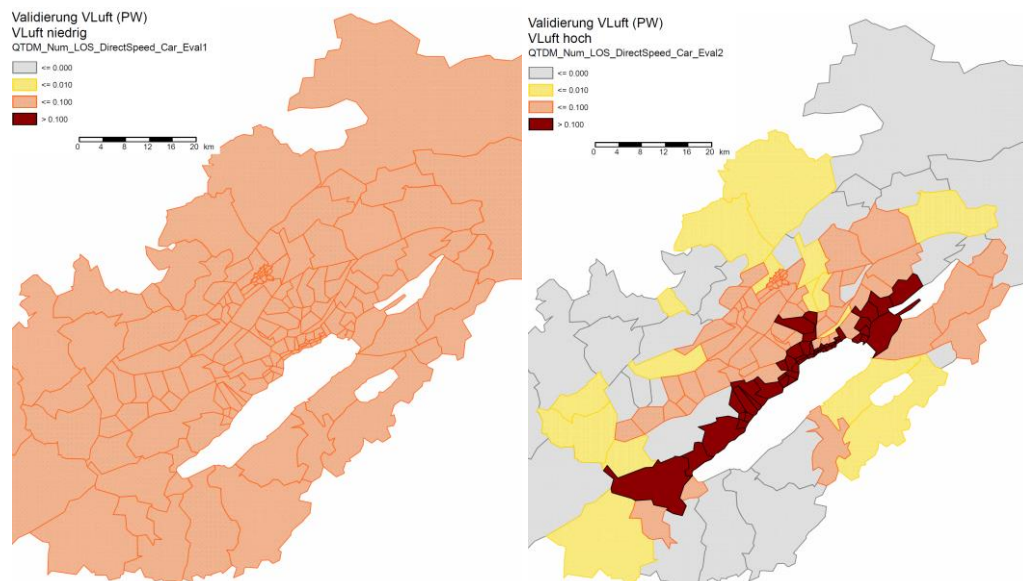


Abb. 103 Luftliniengeschwindigkeit PW zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Neuchâtel.

Luftliniengeschwindigkeit ÖV

GVM Zürich

Im Gegensatz zur Luftliniengeschwindigkeit PW weist die Luftliniengeschwindigkeit ÖV im GVM Zürich ein deutlich homogeneres Bild auf. Weniger als 1% aller Verbindungen von jeder Verkehrszelle weisen zu niedrige Luftliniengeschwindigkeiten ÖV auf. Mit der gewählten Klassifizierung weisen gar keine Verkehrszellen zu hohe Luftliniengeschwindigkeiten ÖV auf.

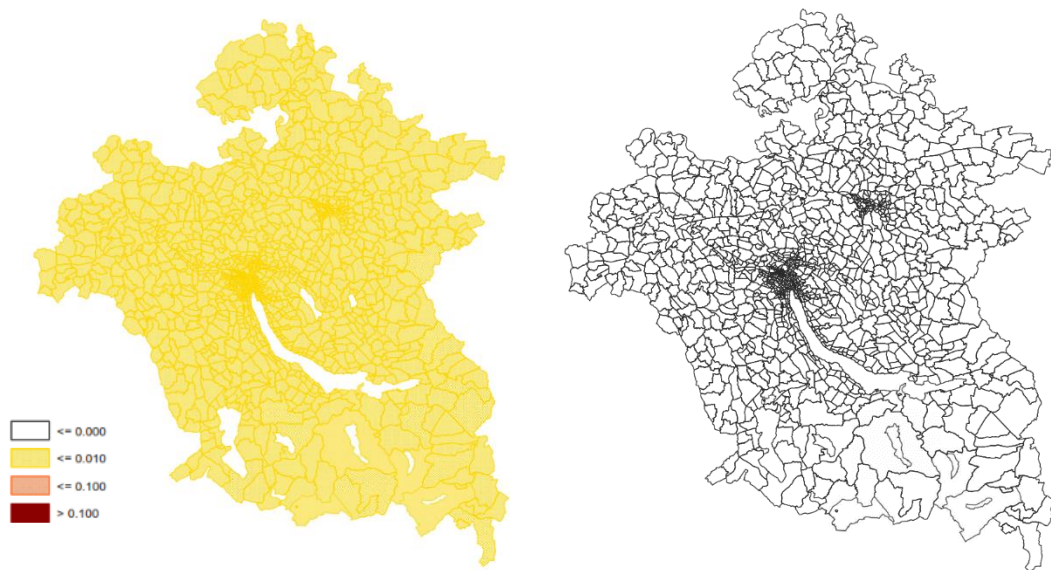


Abb. 104 Luftliniengeschwindigkeit ÖV zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - GVM Zürich.

VM Region Stuttgart

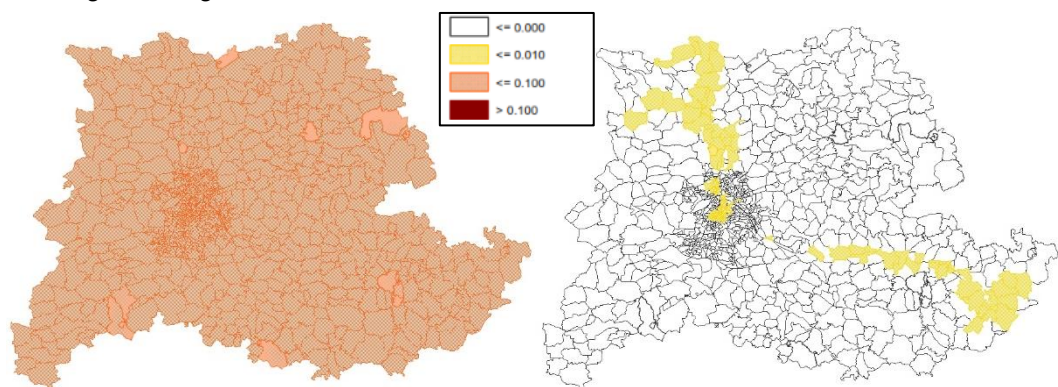


Abb. 105 Luftliniengeschwindigkeit ÖV zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Region Stuttgart.

Es fällt auf, dass zwischen 1% und 10% der Relationen aller Verkehrszellen eine zu niedrige ÖV-Luftliniengeschwindigkeit aufweisen. Da dies flächendeckend auftritt, ist es eher ein Rückschluss auf die verwendeten Kurvenparameter als auf Fehler im Modell. Daran zeigt sich, dass die Kurvenparameter für diesen Test in Abhängigkeit des jeweiligen Modells zu bestimmen sind.

Zu hohe ÖV-Luftliniengeschwindigkeiten zeigen sich einerseits im Innenstadtbereich von Stuttgart, der gut durch den öffentlichen Nahverkehr erschlossen ist, und entlang der Fernbahnstrecken im VRS-Gebiet. Beides erscheint plausibel.

Wird bei der Darstellung der zu niedrigen ÖV-Luftliniengeschwindigkeiten der erweiterte Modellraum des VM Region Stuttgart betrachtet, fallen zwei Verkehrszellen («Cleebronn» und «Sulzbach-Laufen») auf, für die eine genauere Untersuchung durchgeführt wurde (siehe Abb. 106). Es zeigte sich, dass die beiden Verkehrszellen nur schlecht ans ÖV-Netz angeschlossen sind. Im Fall von Cleebronn mit nur vier Buslinien (davon zwei Linien ohne Fahrplanfahrten) und im Fall von Sulzbach-Laufen mit nur einer Regionalbahnlinie. Hinzu kommt, dass beide Verkehrszellen während des eigestellten Umlegungszeitraumes, für den die Kenngrößen berechnet werden, nicht durch Fahrplanfahrten bedient werden. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um einen Fehler in den Eingangsdaten, da beide Verkehrszellen in der Realität durch verschiedene Buslinien bedient werden.

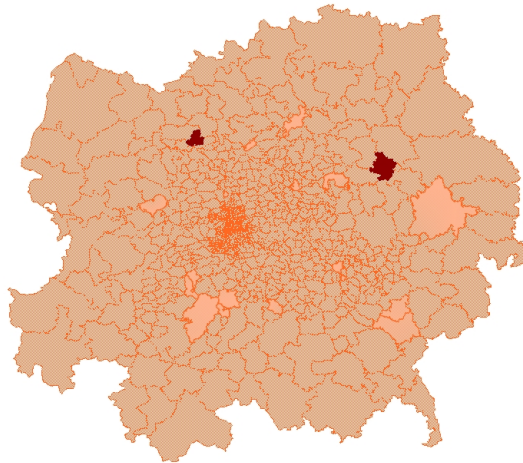


Abb. 106 Luftliniengeschwindigkeit ÖV zu niedrig (Eval1, erweiterter Modellraum) - VM Region Stuttgart.

VM Neuchâtel

Bei der Verteilung der zu niedrigen Luftliniengeschwindigkeit zeigt sich ein räumlich disperses Muster. Dort wo grössere Infrastrukturen vorhanden sind (Umgebung Neuenburgersee, La Chaux-de-Fonds) gibt es praktisch keine Zellen, wo die Luftliniengeschwindigkeit unterschritten wird. Ein konträres Bild zeigt sich in den Zonen im nahen Ausland oder mit dünnerem ÖV Angebot. Für diese Zonen ist es plausibel, dass die Luftliniengeschwindigkeit für mehrere Relationen zu niedrig ausfällt. Zu hohe Reisezeiten sind zwischen ein und zehn Prozent der Fälle über das gesamte Netz verteilt auszumachen.

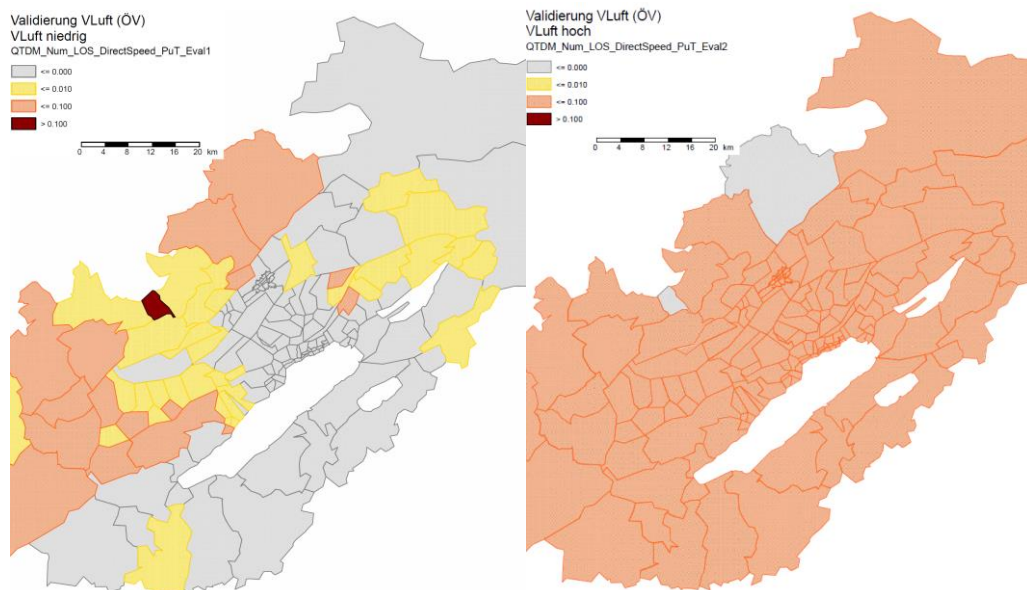


Abb. 107 Luftliniengeschwindigkeit ÖV zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Neuchâtel.

Reisezeitverhältnis ÖV/PW

GVM Zürich

Im Stadtgebiet ZH und Winterthur sowie in einzelnen Vorortsgemeinden liegt das Geschwindigkeitsverhältnis ÖV zu PW in über 10% aller Verbindungen unter dem minimalen Grenzwert. Dieser Grenzwert ist gemäss RIN Kurven für alle Distanzklassen auf 0.5 festgelegt. Dies bedeutet, dass in den rot eingefärbten Zellen die Reisezeit ÖV in über 10% der Fälle halb so gross wie diejenige des PW ist. Dies ist im GVM-ZH vor allem dort der

Fall, wo eine gute Erschliessung des Agglomerationsgebietes durch die S-Bahn gegeben ist und entspricht insbesondere dann der Realität, wenn die Zugangszeiten zum S-Bahnhof kurz sind. Die Verteilung der zu niedrigen Reisezeitverhältnisse ÖV/PW ist damit plausibel.

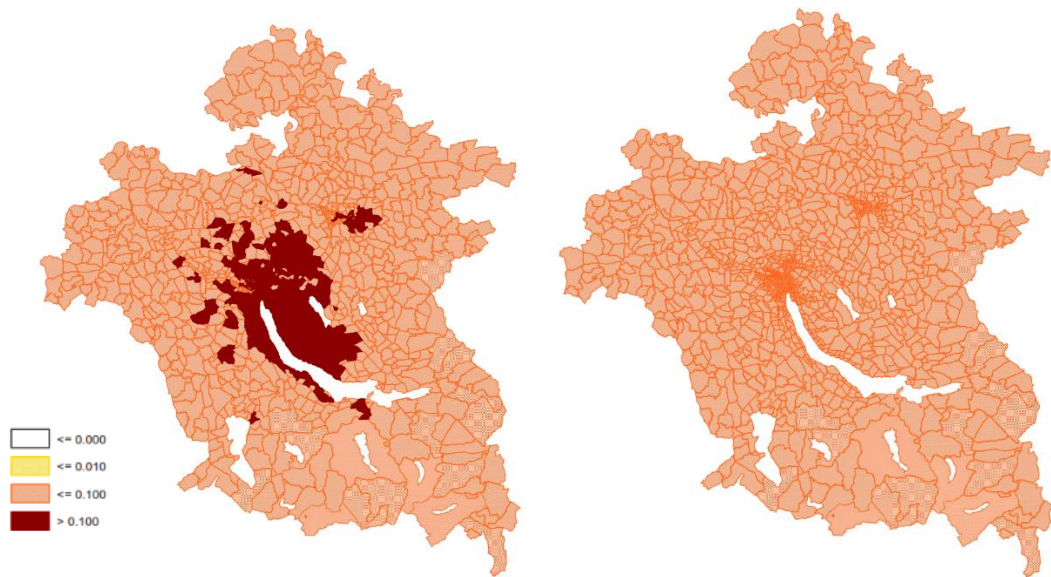


Abb. 108 Reisezeitverhältnis ÖV/PW zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - GVM Zürich.

Ein zu hohes Reisezeitverhältnis ÖV/PW weisen flächendeckend 1-10% der Relationen auf. Auch dies ist grundsätzlich plausibel, da es überall im Kanton Relationen gibt, die mit dem PW schneller zu erreichen sind als mit dem ÖV. Dass es hier keine Zonen gibt, bei denen dies für mehr als 10% der Relation zutrifft, spiegelt die grundsätzlich sehr gute ÖV-Erschliessung des gesamten Kantons.

VM Region Stuttgart

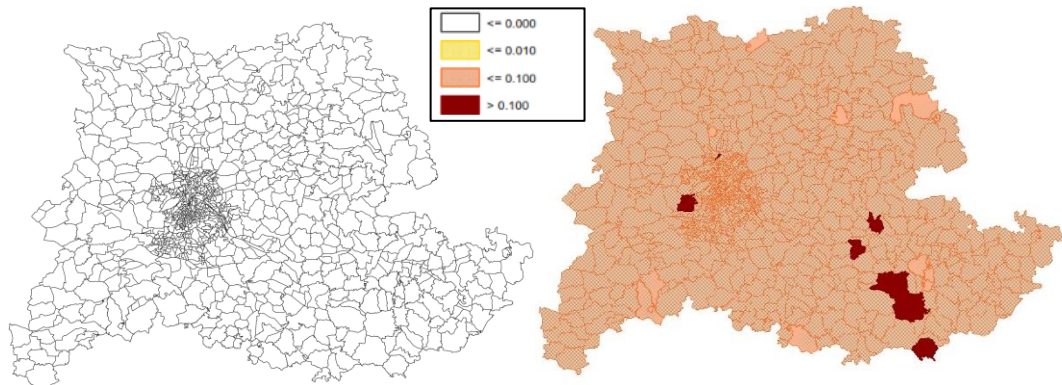


Abb. 109 Reisezeitverhältnis ÖV/PW zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Region Stuttgart.

Das Reisezeitverhältnis (ÖV/PW) in Abb. 109 zeigt keine Auffälligkeiten bei zu niedrigen Werten. Die roten Zellen im rechten Bild (zu hohes Reisezeitverhältnis) bedeuten, dass dort bei mindestens 10% der Relationen der Modus ÖV eine viel längere Reisezeit aufweist als der Modus PW. Auf diesen Relationen ist der ÖV demzufolge sehr schlecht im Vergleich zum PW. Diese Aussage deckt sich zum Teil mit der Feststellung aus Abb. 102 (zu hohe Luftliniengeschwindigkeit PW). Werden die Verkehrszellen, die eine zu hohe PW-Luftliniengeschwindigkeit aufweisen, aus der Betrachtung ausgeschlossen, kann für die restlichen Verkehrszellen stichprobenartig geprüft werden, ob die ÖV- und PW-Reisezeiten plausibel sind. Im Fall des VM Region Stuttgart fallen folgende Ursachen für das zu hohe Reisezeitverhältnis auf:

- die betroffenen Relationen beginnen und enden häufig an Autobahnen oder Bundesstrassen, was zu einer überdurchschnittlich guten Verbindungsqualität für den PW führt, und
- die betroffenen Relationen befinden sich ausserhalb des Stadtgebietes von Stuttgart. Das hat zur Folge, dass die Verkehrszellen grösser und damit die Zugangszeiten zu Haltestellen des ÖV länger sind, und dass das ÖV-Angebot (Direktheit, Taktfolge etc.) generell etwas schlechter ist.

Mit dieser Erläuterung und einer stichprobenartigen Prüfung ergibt sich ein plausibles Resultat.

VM Neuchâtel

Der Vergleich der Reisezeiten zwischen ÖV und PW zeigt, dass bei einer Vielzahl an Zellen die Reisezeitverhältnisse zu hoch sind. Die Reisezeit im ÖV ist folglich des Öfteren signifikant langsamer als eine Verbindung per PW. Begründet werden kann dies durch das eher dünne ÖV Angebot ausserhalb der Zentren, weshalb relativ wenige Direktverbindungen im Gegensatz zum PW möglich sind.

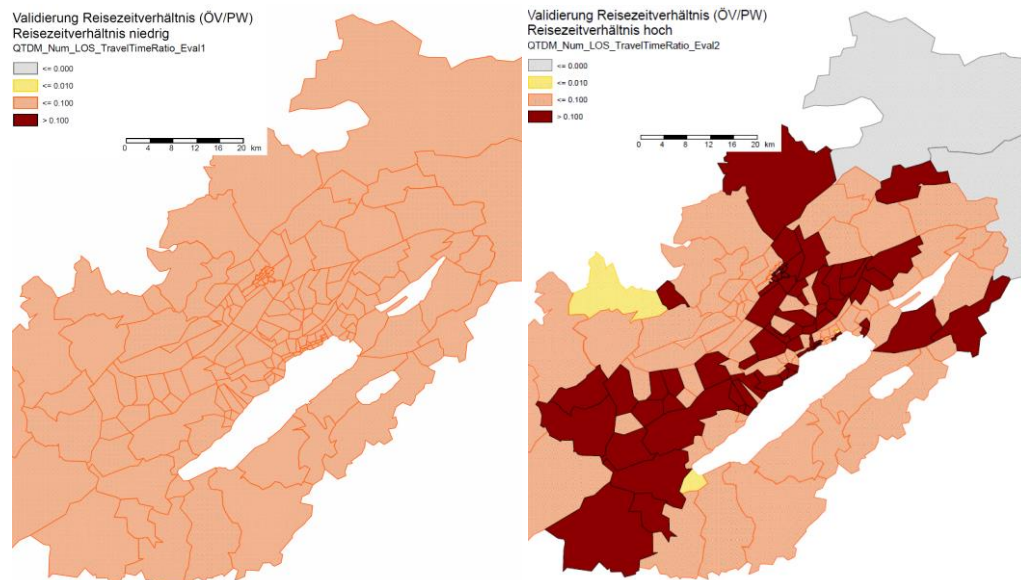


Abb. 110 Reisezeitverhältnis ÖV/PW zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Neuchâtel.

Umwegfaktor PW

GVM Zürich

Der Umwegfaktor vergleicht die Reiseweite im belasteten Netz für den PW mit der Luftliniendistanz. Verkehrszellen mit einem grösseren Anteil zu hoher Umwegfaktoren liegen auf beiden Seiten des Zürichsees, hinter dem Uetliberg und allgemein in eher ländlichen Gebieten mit weniger dichtem Streckennetz. Diese räumliche Verteilung erscheint plausibel. Bei den zu niedrigen Umwegfaktoren zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Kenngrösse der Luftliniengeschwindigkeit PW. Abgesehen von ein paar einzelnen Zonen entlang der Goldküsten resultieren unter 10% aller Verbindungen in Umwegfaktoren ausserhalb der RIN Kurven.

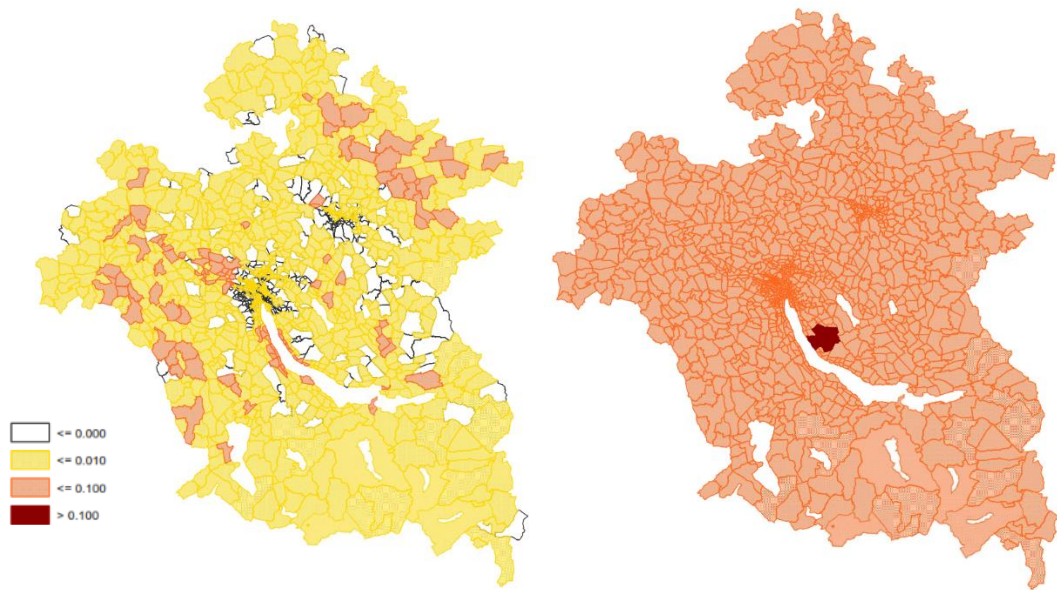


Abb. 111 Umweltfaktor PW zu hoch (Eval1, links) bzw. zu niedrig (Eval2, rechts) - GVM Zürich.

VM Region Stuttgart

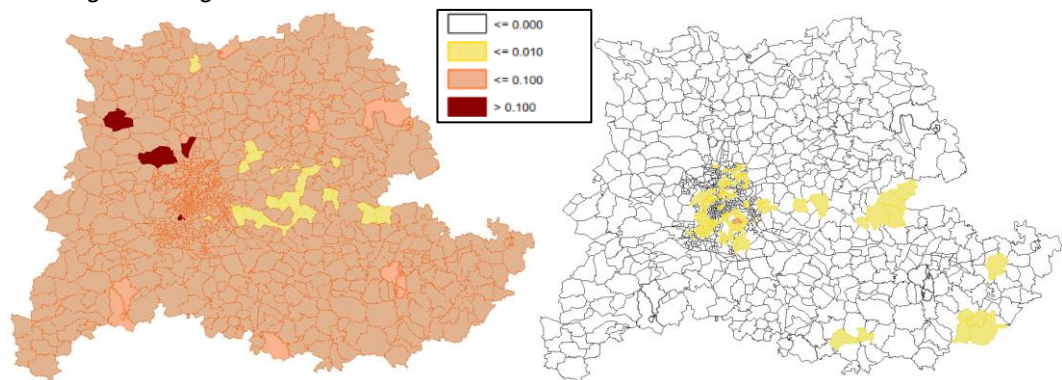


Abb. 112 Umweltfaktor PW zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Region Stuttgart.

Die einzige Verkehrszelle, bei der zwischen 1% und 10% der Relationen zu hohe Umweltfaktoren aufweisen, ist «Stuttgart Rohrer» (Nr. 22531). Bei genauerer Betrachtung der Verkehrszelle zeigt sich, dass sie einerseits mit nur einer Zufahrtsstrasse relativ isoliert liegt und sie sich andererseits in kurzer Luftliniendistanz zum Stadtzentrum von Stuttgart befindet, das eine sehr hohe Verkehrszellenauflösung hat. Der verkehrliche Anschluss deckt sich mit der Realität, der hohe Umweltfaktor zu den Nachbarzellen ist somit gerechtfertigt.

Das flächendeckende Ergebnis, dass bis zu 10% der Relationen einen zu niedrigen Umweltfaktor aufweisen, kann wiederum auf eine schlecht parametrisierte RIN-Kurve hindeuten. Es muss bei diesem Test aber auch berücksichtigt werden, dass es theoretisch zu Umweltfaktoren < 1 kommen kann, wenn die für die Berechnung notwendige Fahrweite keine Anbindungsstrecken enthält. Da die Luftlinienentfernung immer von Zellenschwerpunkt zu Zellenschwerpunkt misst, kann sie in manchen Fällen länger als die Fahrweite sein bzw. die Berechnung des Umweltfaktors verfälschen. Die auffälligen Verkehrszellen im VM Region Stuttgart «leiden» alle an dieser Eigenschaft.

VM Neuchâtel

Im VM Neuchâtel liegen Verkehrszellen mit zu hohen Umwegfaktoren vor allem am Ufer des Neuenburgersees. Dies ist plausibel, da zur Umfahrung des Sees grössere Umwege in Kauf genommen werden müssen. Deutlich mehr Verkehrszellen weisen jedoch einen grösseren Anteil an Relationen mit einem gemäss RIN-Kurven zu niedrigen Umwegfaktor auf. Bei stichprobenartigen Betrachtung der entsprechenden Relationen für einzelne Verkehrszellen zeigt sich, dass dies vor allem auf Relationen mit direkten Strassenverbindungen zurückzuführen ist. Damit ist der niedrige Umwegfaktor grundsätzlich plausibel. Bei einer Modellvalidierung müsste jedoch allenfalls noch eine Prüfung von mehr Zonen erfolgen.

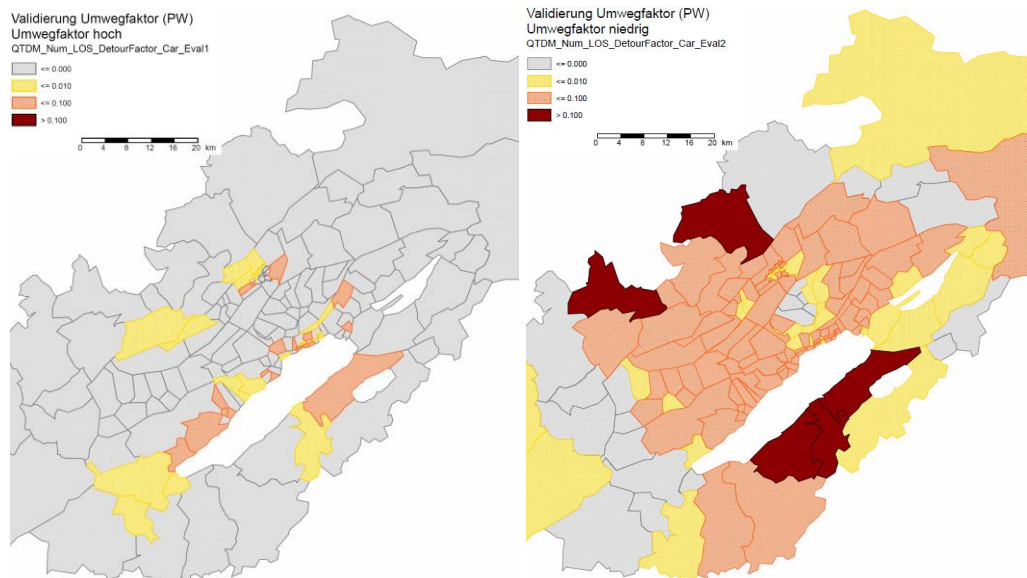


Abb. 113 Umwegfaktor PW zu hoch (Eval1, links) bzw. zu niedrig (Eval2, rechts) - VM Neuchâtel.

Umsteigehäufigkeit ÖV*GVM Zürich*

Die Auswertung der Umsteigehäufigkeiten im ÖV für das GVM Zürich ergibt ein sehr homogenes Bild ohne wirkliche räumliche Muster. Für jede Verkehrszelle gibt es Relationen mit zu hohen und zu niedrigen Umsteigehäufigkeiten gemäss RIN-Kurven. Es gibt damit keine Hinweise auf einen grundsätzlichen Fehler im Modell. Für genauere Analysen müssten allenfalls einzelne Verkehrszellen und Relationen betrachtet werden.

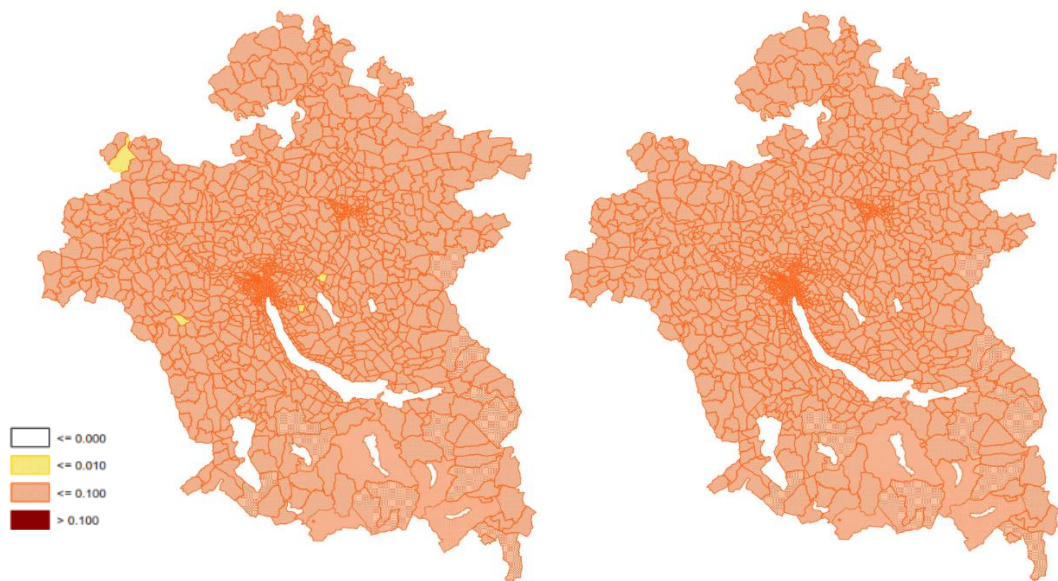


Abb. 114 Umsteigehäufigkeit ÖV zu hoch (Eval1, links) bzw. zu niedrig (Eval2, rechts) - GVM Zürich.

VM Region Stuttgart

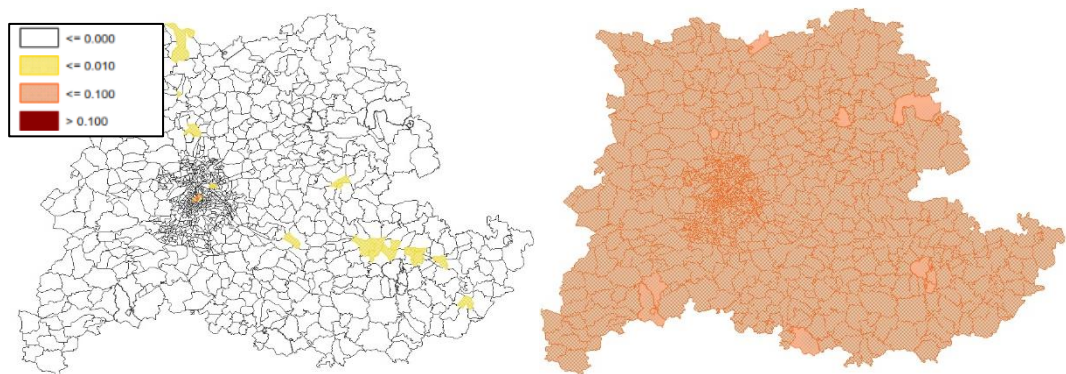


Abb. 115 Umsteigehäufigkeit ÖV zu niedrig (Eval1, links) bzw. zu hoch (Eval2, rechts) - VM Region Stuttgart.

Eine zu niedrige Umsteigehäufigkeit gibt es zum Teil in Verkehrszellen entlang der S-Bahnlinien, die in der Region Stuttgart ein sehr grosses Gebiet abdecken, und im Bereich von Stuttgart-Mitte, wo sich sehr viele U- und S-Bahnen bündeln. Eine zu hohe Umsteigehäufigkeit findet sich flächendeckend über den gesamten Untersuchungsraum, was wieder auf eine schlecht parametrisierte RIN-Kurve schliessen lässt, d.h. die Grenze für «zu hohe» Werte ist nicht gut gewählt.

VM Neuchâtel

Im VM Neuenburg gibt es keine Relationen auf denen die Umsteigehäufigkeit gemäss RIN-Kurven als «zu niedrig» eingestuft würde. Es hat hingegen relativ viele Verkehrszellen mit einem hohen Anteil an Relationen auf denen «zu häufig» umgestiegen werden muss. Dies liegt vor allem in der Struktur des dortigen ÖV-Netzes begründet, das nicht sehr dicht ist und eher sternförmig auf Neuchâtel und La Chaux-de-Fonds ausgerichtet ist. Die resultierenden Umsteigehäufigkeiten im VM Neuchâtel sind somit plausibel.

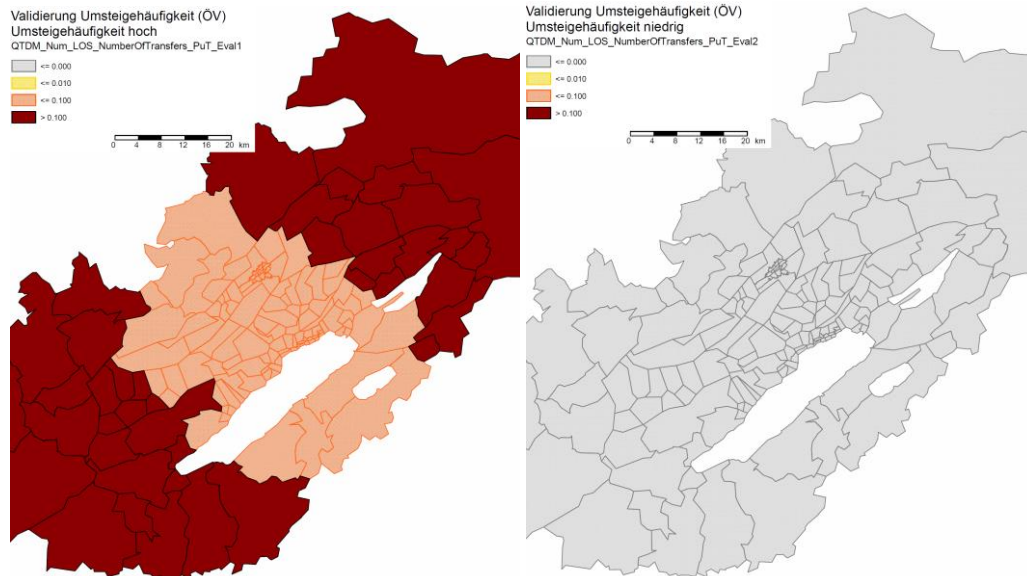


Abb. 116 Umsteigehäufigkeit ÖV zu hoch (Eval1, links) bzw. zu niedrig (Eval2, rechts) - VM Neuchâtel.

Fazit:

Die Interpretation der flächendeckenden Darstellung der RIN-Kenngrößen war teilweise sehr anspruchsvoll, kann aber dabei helfen, Auffälligkeiten in der Modellierung des Verkehrsangebots zu finden. Sehr hilfreich waren die RIN-Kenngrößen für die Analyse einzelner Zellen. Eine solche detaillierte Analyse ist in der Praxis jedoch aufwändig. Zu beachten ist zudem, dass die Verläufe der Kurven, die «zu gute» und «zu schlechte» Verbindungen anzeigen, ggf. auf das konkrete Untersuchungsgebiet angepasst werden müssen. In der Anwendung sollte sorgfältig geprüft werden, welche Aussagen erwartet werden können und mit welchem Aufwand diese verbunden sind.

8.3 Überprüfung der Parameter

Wie u.a. in Pestel et al. [67] erläutert, kann bei der Untersuchung der Parameter in drei Teilbereiche unterschieden werden:

- Überprüfung der Parametervorzeichen:
Parameter die einen Widerstand bewerten, sollten mit einem negativen Vorzeichen in die Nutzenfunktion eingehen.
- Überprüfung des Wertebereichs:
Die Wertebereiche der Parameter werden mit Wertvorgaben der Literatur (z.B. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [18] oder FSUTMS-Cube Framework Phase I und II [39; 40]) verglichen. Ein direkter Vergleich der Wertebereiche muss aber immer die Modellarchitektur (z.B. lineare oder transformierte Nutzenfunktion) sowie die Gesamtanzahl der Parameter berücksichtigen. Aus diesem Grund wird in der folgenden Auswertung auf einen Vergleich der Wertebereiche verzichtet.
- Überprüfung von Parameterverhältnissen:
Ähnlich der Überprüfung der Wertebereiche werden bei diesem Test die Verhältniswerte mit Wertvorgaben der Literatur (z.B. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [18], FSUTMS-Cube Framework Phase II [40], WebTag [21] oder Axhausen et. al. [2]) verglichen. Im Gegensatz zu den Wertebereichen ist das Verhältnis aber unabhängig von der Gesamtanzahl an Parametern. Die Modellarchitektur (z.B.

lineare oder transformierte Nutzenfunktion) muss aber dennoch berücksichtigt werden. Folgende Tabelle stellt eine Übersicht von in der Literatur vorgeschlagenen Verhältnisbandbreiten dar.

Tab. 30 Vorgeschlagene Parameterverhältnisse.

Verhältnis der Parameter von :		Reisezeit / Fahrzeit	Fahrzeit (nicht Heim zur Arbeit) / Fahrzeit (Heim zur Arbeit)	Fahrzeit (Heim zu nicht Arbeit) / Fahrzeit (Heim zur Arbeit)	Gehzeit / Fahrzeit	Wartezeit / Fahrzeit			
Allgemein	Untere Grenze	2	2	≈ 1	0.1	1.5	1.5		
	Obere Grenze	3	3		0.5	2	2.5		
Wege mit Quelle: Heim Ziel: Arbeit	Untere Grenze	2	1.5			1.5	1.5		
	Obere Grenze	3	3			3	3		
Wege mit Quelle: Heim Ziel: nicht Arbeit	Untere Grenze	2	2			2	2		
	Obere Grenze	≥3	6			6	6		
Wege mit Quelle: nicht Heim Ziel: Arbeit	Untere Grenze		2			2	2		
	Obere Grenze		7			7	7		
Literaturquelle		[18]	[40]	[18]	[18]	[21]	[40]	[21]	[40]

Dieser Test wurde nur für das VM Region Stuttgart durchgeführt.

VM Region Stuttgart

Die Überprüfung der Vorzeichen zeigt, dass alle Kenngrößenmatrizen mit negativen Parametern bewertet werden. Eine Ausnahme bildet der Modus ÖV, bei dem eine logarithmisch transformierte Luftlinienentfernung positiv bewertet wird. Möglicherweise wurde dieser Summand in die Nutzenfunktion eingefügt, um den ÖV auf längeren Relationen attraktiver zu machen¹⁶. Er widerspricht jedoch der allgemeinen Anforderung nach negativen Parametern für Widerstände.

Der Vergleich der Parameterverhältnisse ergab Folgendes:

- Das Verhältnis von Reisezeit- zu Fahrzeitparametern kann für das VM Region Stuttgart nicht ausgewertet werden, da die Nutzenfunktion die Zeitkomponenten der Gesamtreisezeit separat bewertet und die Gesamtreisezeit somit keinen Parameter besitzt.
- Die Parameter der Fahrzeit (nicht Heim zur Arbeit), der Fahrzeit (Heim zur Arbeit) und der Fahrzeit (Heim zu nicht Arbeit) sind identisch. Das VM Region Stuttgart besitzt nur modusspezifische aber keine zweckspezifischen Parameter. Das Verhältnis ist somit immer gleich 1.
- Das Verhältnis von Gehzeit- zu Fahrzeitparameter ist für den Modus ÖV mit 1.2 laut der oben genannten Literatur etwas zu niedrig. Für den Modus Rad ergibt sich ein akzeptabler Wert von 2.2.

¹⁶ Da die Luftlinienweite in Metern berechnet wird, ist der logarithmisch transformierte Term praktisch immer positiv.

- Das Verhältnis von Wartezeit- zu Fahrzeitparameter liegt für den Modus ÖV mit 1.6 im zulässigen Wertebereich der oben genannten Literatur.

8.4 Überprüfung der Modellergebnisse

8.4.1 Mobilitätsraten und Verkehrsaufkommen

Für die Überprüfung der Verkehrsaufkommen werden die Anzahl Wege pro Einwohner, Tag und Verkehrsmodus im Modell ausgewertet und mit den entsprechenden Werten aus einer Haushaltsbefragung verglichen.

GVM Zürich

Vergleichsgrösse für das GVM Zürich ist der Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) 2010. Daraus wurden die Wege der Einwohner des Kantons Zürich und die durchschnittliche Anzahl Wege pro Person unter Berücksichtigung der Personengewichte berechnet. Da es sich bei dem GVM Zürich um ein Einzelwegmodell handelt ist eine direkte Filterung nach Wegen der Einwohner des Kantons nicht möglich. Näherungsweise wurde daher für die Berechnung des Verkehrsaufkommens im Modell die Wege innerhalb des Untersuchungsraums gefiltert und die durchschnittliche Anzahl Wege je im Modell hinterlegtem Einwohner im Untersuchungsraum berechnet. Der Aussenverkehr, das heisst Wege zu und von den Aussenzonen werden nicht berücksichtigt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Auswertung der Verkehrsaufkommen für das GVM Zürich, den Vergleich mit dem MZMV 2010 sowie das daraus resultierende Gütemass SQV. In der Summe über alle Verkehrsmodi weist das GVM Zürich gemäss dieser Auswertung eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Mikrozensus auf. Auch für die einzelnen Verkehrsmodi wird mindestens eine gute Übereinstimmung erzielt. Die grösste Abweichung ergibt sich beim MIV. Dies ist aber zumindest teilweise darauf zurück zu führen, dass nur Wege innerhalb des Untersuchungsraums betrachtet wurden.

Tab. 31 Mittlere Anzahl Wege pro Person – GVM Zürich.

Modus	GVM-ZH	MZMV 2010	Gütemass SQV mit $f = 1$
MIV	1.23	1.44	0.85
ÖV	0.54	0.67	0.86
Velo (*)	0.28	0.20	0.85
Fuss (*)	1.13	1.02	0.90
Total	3.18	3.34	0.92

(*) Anzahl Wege gemäss VISEVA vor der Kalibration

VM Region Stuttgart

Referenzgrösse für die Ergebnisdaten ist eine Haushaltsbefragung [62]. Gemäss Tab. 16 wird in diesem Kapitel die Anzahl der Wege pro Person, die Anzahl der Wege pro Person und Modus, die Anzahl der Wege pro Person und Nachfragesegment (Modus x Wegezweck) sowie die Konsistenz der produzierten und angezogenen Wege betrachtet. Die Auswertung bezieht sich dabei immer auf den Untersuchungsraum des VM Region Stuttgart. In der Haushaltsbefragung wurden darüber hinaus nur Wege betrachtet die werktags (Montag bis Freitag) stattfanden. Die Summe der jeweiligen gewichteten Wege wurde dann durch die Summe der Personen ab 6 Jahre dividiert¹⁷. Tab. 32 zeigt die Ergebnisse der

¹⁷Für Personen unter 6 Jahre wurden keine Wege erfasst.

Auswertung. Das Gütemass SQV zeigt bei allen zu prüfenden Werten eine gute Übereinstimmung.

Tab. 32 Mittlere Anzahl Wege pro Person – VM Region Stuttgart.

Inhaltliche Differenzierung	VM Region Stuttgart	Haushalts-be-fragung	Gütemass SQV mit $f = 1$
Mittlere Anzahl Wege pro Person	2.40	2.94	0.76
Mittlere Anzahl Wege pro Person Modus (wegebezogener Modal Split)			
• Fuss	0.30	0.62	0.71
• Rad	0.16	0.22	0.88
• ÖV	0.40	0.43	0.96
• PW (Mitfahrer)	0.24	0.32	0.88
• PW (Selbstfahrer)	1.31	1.35	0.96
Mittlere Anzahl Wege pro Person und Nachfragesegment			
• PW (Mitfahrer) x Arbeit	0.15	0.22	0.87
• PW (Mitfahrer) x Arbeit	0.01	0.01	0.97
• ÖV x Arbeit	0.04	0.08	0.88

Zur Überprüfung der Konsistenz von produzierten und angezogenen Wegen wurden die Abweichungen zwischen dem Quell- und Zielverkehr der 1'013 Untersuchungsraumzellen in 10%-Klassen eingeteilt und die Häufigkeit für jede Abweichungsklasse ermittelt. Abb. 117 zeigt das Ergebnis für ausgewählte Verkehrsmittel und über alle Verkehrsmittel (Gesamt). Über alle Verkehrsmittel weisen 93% der Verkehrszellen eine Abweichung <10% auf und 98% der Verkehrszellen liegen im Bereich von <20% Abweichung.

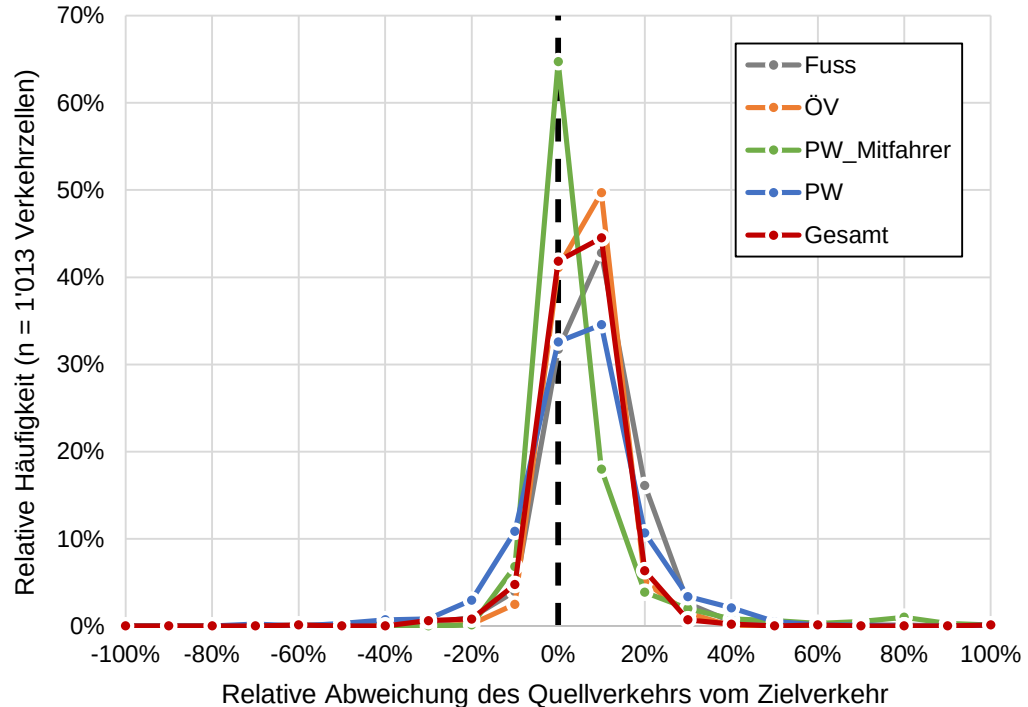


Abb. 117 Überprüfung der Konsistenz von produzierten und angezogenen Wegen - VM Region Stuttgart.

8.4.2 Wegeweiten und Verkehrsleistung

Im ersten Schritt der Überprüfung der Wegeweiten und Verkehrsleistung erfolgt analog zur Überprüfung der Verkehrsaufkommen ein Vergleich der mittleren Verkehrsleistung pro Person im Modell mit derjenigen aus einer Haushaltsbefragung. Dazu werden die mittleren Wegeweiten pro Einwohner, Tag und Verkehrsmodus im Modell und in der Haushaltsbefragung bestimmt und mittels Gütemass verglichen. Nicht berücksichtigt wird dabei der Zellbinnenverkehr (vgl. Hinweise Kapitel 6.1.3).

Im zweiten Schritt werden die Wegeweitenverteilungen überprüft. Dazu wird wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben eine äquiquantile Darstellung der Reiseweitenverteilung verwendet. Die Klassengrenzen werden aus der Haushaltsbefragung bestimmt.

GVM Zürich

Vergleichsgrösse für die mittlere Verkehrsleistung im GVM Zürich ist wiederum der MZMV 2010. Daraus wurden die Wege der Einwohner des Kantons Zürich gefiltert und die mittlere Verkehrsleistung pro Person unter Berücksichtigung der Personengewichte berechnet. Da der Fuss- und Veloverkehr nicht umgelegt oder kalibriert wurde, wird er bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Auswertung der mittleren Verkehrsleistung pro Person zeigt sowohl für den MIV als auch für den ÖV eine sehr gute Übereinstimmung der mittleren Verkehrsleistung pro Person.

Tab. 33 Mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person – GVM Zürich.

Modus	GVM-ZH	MZMV 2010	Gütemass SQV mit $f = 10$
MIV	21.16	20.13	0.93
ÖV	11.67	12.98	0.90

Der Vergleich der Reiseweitenverteilung der MIV-Wege zeigt, dass im GVM Zürich weniger kurze und mehr lange Wege enthalten sind als im MZMV. Das Fehlen des Zellbinnenverkehrs hat hierzu sicher einen Beitrag, wird aber nicht die gesamte Verschiebung erklären. Diese Tendenz wurde bereits im Bericht zur Modellaktualisierung [43] aufgezeigt und ausgeführt, dass auf eine genauere Anpassung bewusst verzichtet wurde um eine bessere Konsistenz mit den vorliegenden Zählenden zu erzielen.

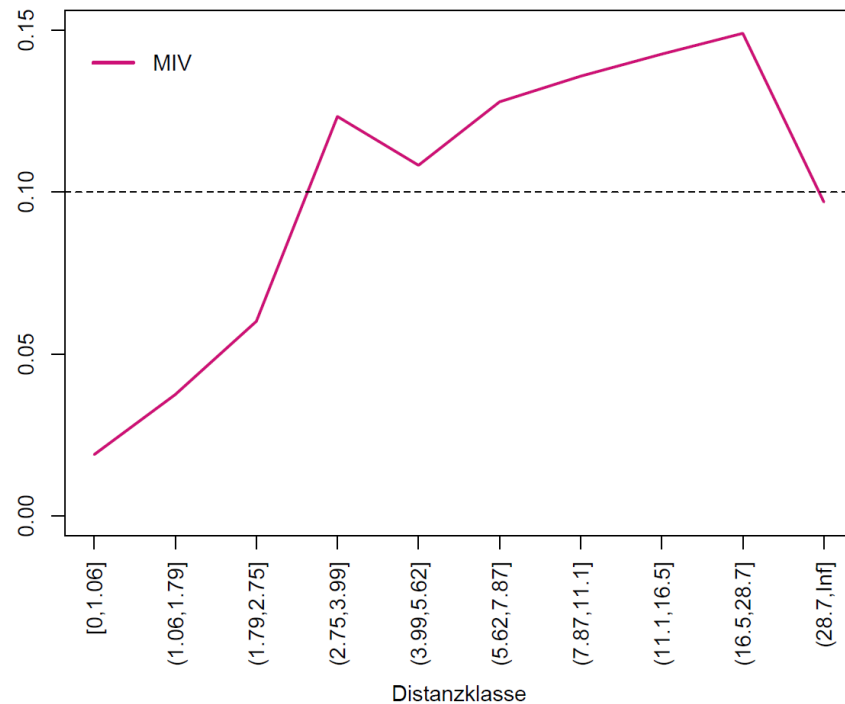


Abb. 118 Reisweitenverteilung MIV-Wege im GVM Zürich - äquiquantilen Darstellung auf Basis der MIV-Wege im MZMV 2010.

Die Reisweitenverteilung für den ÖV zeigt insgesamt eine bessere Übereinstimmung und keinen direkten Trend. Die grösste Abweichung gibt es hier bei den langen Fahrten von über 37.7 km.

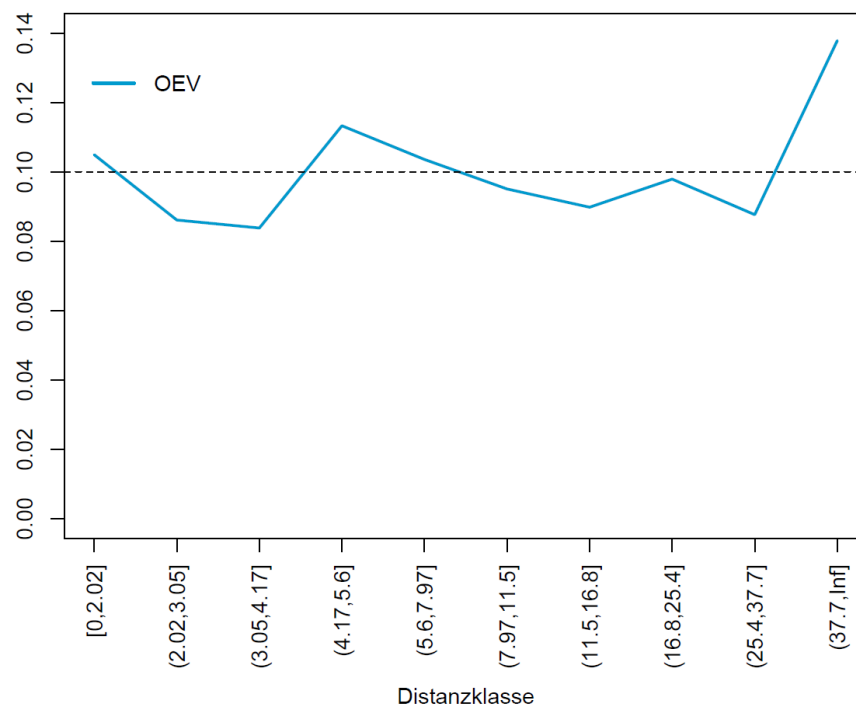


Abb. 119 Reisweitenverteilung ÖV-Wege im GVM Zürich - äquiquantilen Darstellung auf Basis der ÖV-Wege im MZMV 2010.

VM Region Stuttgart

Referenz für die Analyse der mittleren Verkehrsleistung und mittleren Wegeweite ist hier wiederum die Haushaltsbefragung des VRS. Die Auswertung mit dem Gütemass SQV zeigt bei allen zu prüfenden Werten eine gute Übereinstimmung.

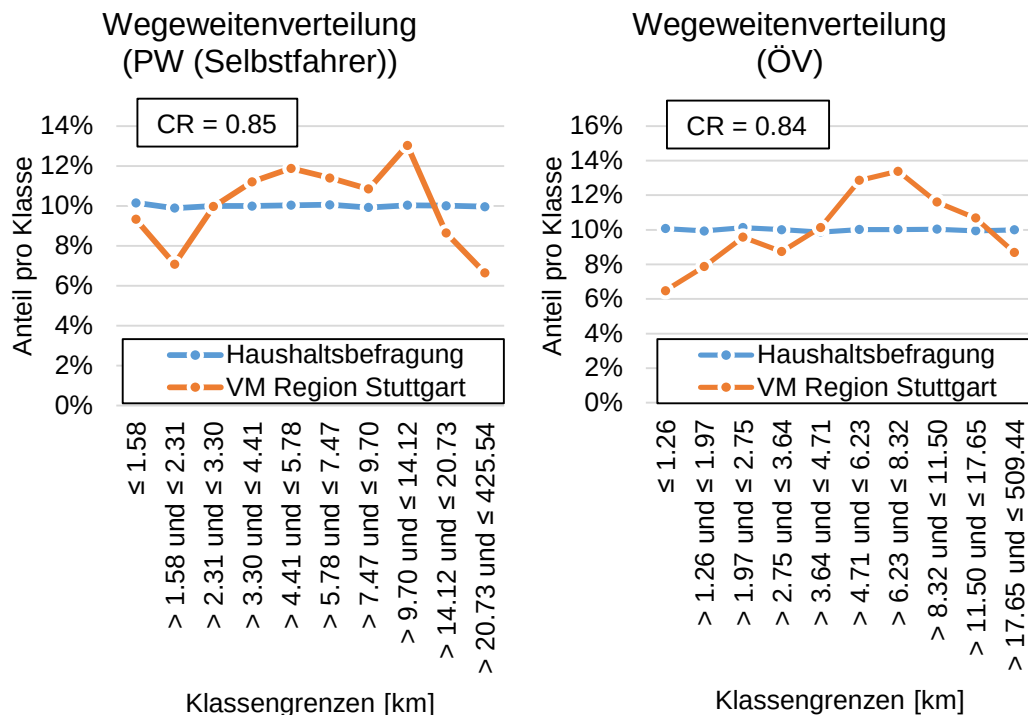
Tab. 34 Mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person – VM Region Stuttgart.

Inhaltliche Differenzierung	VM Region Stuttgart	Haushalts-befragung	Gütemass SQV mit $f = 10$
Mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person	20.98	24.95	0.80
Mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person Modus (wegebezogener Modal Split)			
• Fuss	0.47	0.68	0.92
• Rad	0.60	0.55	0.98
• ÖV	3.99	6.15	0.78
• PW (Mitfahrer)	2.02	3.22	0.83
• PW (Selbstfahrer)	13.90	14.34	0.96
Mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person und Nachfragesegment			
• PW (Mitfahrer) x Arbeit	2.07	3.20	0.83
• PW (Mitfahrer) x Arbeit	0.17	0.16	1.00
• ÖV x Arbeit	0.58	1.29	0.83

Zusätzlich wird die Wegeweitenverteilung analysiert. Wie in Tab. 35 zu erkennen ist, stimmen die mittleren Wegeweiten pro Person und pro Person und Modus sehr gut überein. Wird die jeweilige Verteilung (äquiquantil) über alle Distanzklassen aufgetragen (exemplarisch für PW und ÖV in Abb. 120), zeigen sich trotz des guten Coincidence Ratios von 0.85 bzw. 0.84 Abweichungen zwischen Modell und Referenz. So werden im VM Region Stuttgart weniger Wege bis 2.31 km und über 14.12 km modelliert dafür aber mehr Wege zwischen diesen beiden Grenzen. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den ÖV, nur mit jeweils anderen Grenzen.

Tab. 35 Mittlere Wegeweite [km] pro Person – VM Region Stuttgart.

Inhaltliche Differenzierung	VM Region Stuttgart	Haushaltsbefragung	Gütemass SQV mit $f = 10$
Mittlere Wegeweite [km] pro Person	6.65	6.99	0.96
Mittlere Wegeweite [km] pro Person Modus (wegebezogener Modal Split)			
• Fuss	1.18	1.28	0.97
• Rad	2.88	2.68	0.96
• ÖV	7.52	8.99	0.87
• PW (Mitfahrer)	6.43	6.79	0.96
• PW (Selbstfahrer)	8.14	8.07	0.99

**Abb. 120** Reiseweitenverteilung PW und ÖV im VM Region Stuttgart - äquiquantilen Darstellung auf Basis der Haushaltsbefragung [62].

8.4.3 Wegezeitaufwand und Verkehrszeitaufwand

Im ersten Schritt der Überprüfung des Wegezeitaufwands erfolgt analog zur Überprüfung der mittleren Verkehrsleistung pro Person eine Gegenüberstellung des mittleren Verkehrszeitaufwands pro Einwohner, Tag und Verkehrsmodus im Modell mit den entsprechenden Kennzahlen aus der Haushaltsbefragung. Nicht berücksichtigt wird dabei wiederum der Zellbinnenverkehr (vgl. Hinweise Kapitel 6.1.3).

Im zweiten Schritt werden die Reisezeitverteilungen überprüft. Dazu wird wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben eine äquiquantile Darstellung der Reisezeitverteilung verwendet. Die Klassengrenzen werden aus der Haushaltsbefragung bestimmt.

GVM Zürich

Vergleichsgrösse für den mittleren Verkehrszeitaufwand im GVM Zürich ist wiederum der MZMV 2010. Daraus wurden die Wege der Einwohner des Kantons Zürich gefiltert und der mittlere Verkehrszeitaufwand pro Person unter Berücksichtigung der Personengewichte berechnet. Da der Fuss- und Veloverkehr nicht umgelegt oder kalibriert wurde, wird er bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt. Bei der Ermittlung der Klassengrenzen für die äquiquantile Reisezeitverteilung konnten anders als für die Reiseweitenverteilung nur neun

Klassen gebildet werden. Dies liegt daran, dass im MZMV die Reisezeiten – welche von den Befragten angegeben werden – zum Teil stark gerundet wurden. Daher ergab die Einteilung in zehn Quantile mehrere Klassen mit der gleichen Klassengrenze. Es wurden daher neun Quantile gebildet. Darüber hinaus sollte der Rundungseffekt bei der Interpretation der Ergebnisse entsprechend beachtet werden.

Die Auswertung des mittleren Verkehrszeitaufwands pro Person zeigt insgesamt eine schlechtere Übereinstimmung als die mittlere Verkehrsleistung. Das Modell wurde auch primär auf Wegeweiten und nicht auf Wegezeiten kalibriert. Für den ÖV wurde eine ausreichende Übereinstimmung mit dem MZMV erreicht. Im MIV sind die Wegezeiten im GVM Zürich hingegen deutlich länger als im MZMV.

Tab. 36 Mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person – GVM Zürich.

Modus	GVM-ZH	MZMV 2010	Gütemass SQV mit $f = 30$
MIV	41.84	29.10	0.70
ÖV	17.49	23.70	0.81

Dies spiegelt sich auch in der Reisezeitverteilung MIV-Wege im GVM Zürich wieder. In der äquiquantilen Darstellung auf Basis der MIV-Wege im MZMV 2010 sieht man deutlich, dass der Anteil Wege mit Reisezeiten von über 37.6 Minuten im GVM Zürich deutlich grösser ist als im MZMV, was möglicherweise mit den hohen Abbiegezeiten zusammenhängt.

Im ÖV hingegen sind im GVM Zürich mehr Wege von kurzer Zeitdauer (unter 21 Minuten) enthalten als im MZMV und weniger mit Wege mit Zeitdauern von 54 bis 64 Minuten. Insgesamt sind die Abweichungen jedoch deutlich geringer als im MIV.

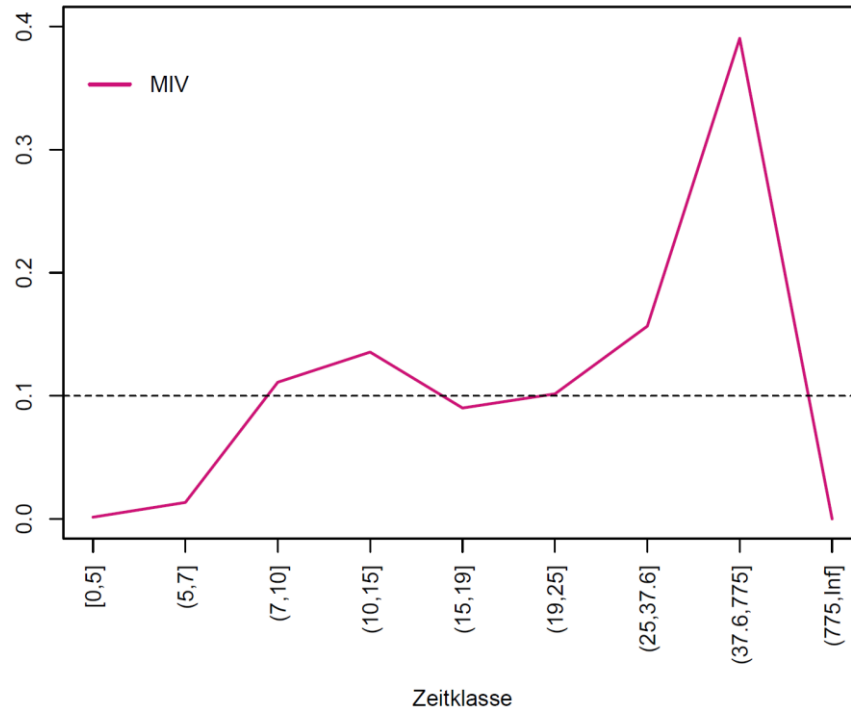


Abb. 121 Reisezeitverteilung MIV-Wege im GVM Zürich - äquiquantilen Darstellung auf Basis der MIV-Wege im MZMV 2010.

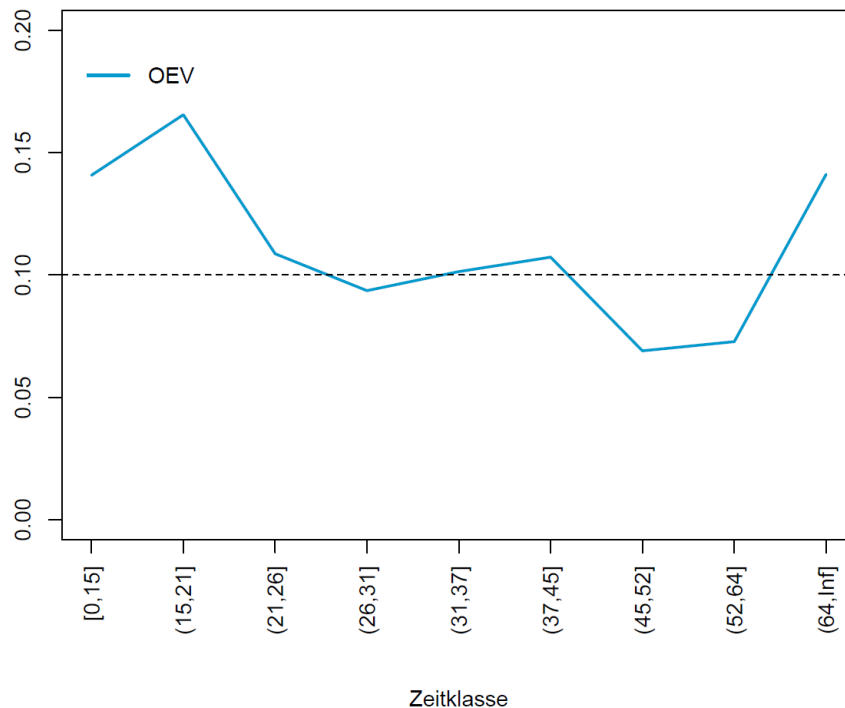


Abb. 122 Reisezeitverteilung ÖV-Wege im GVM Zürich - äquiquantilen Darstellung auf Basis der ÖV-Wege im MZMV 2010.

VM Region Stuttgart

Für die Auswertung des mittleren Verkehrszeitaufwandes und der mittleren Wegezeit diene erneut die Haushaltsbefragung des VRS als Referenz. Die Bewertung des mittleren Verkehrszeitaufwandes mit dem g-Wert (mit $f = 30$) ergibt eine gute Übereinstimmung der modellierten Werte mit den Erhebungswerten (siehe Tab. 37), obwohl die Werte teilweise eine relative grosse absolute Abweichung aufweisen. Gegebenenfalls müsste der Skalierungsfaktor f für die Bewertung von mittleren Reisezeiten angepasst werden.

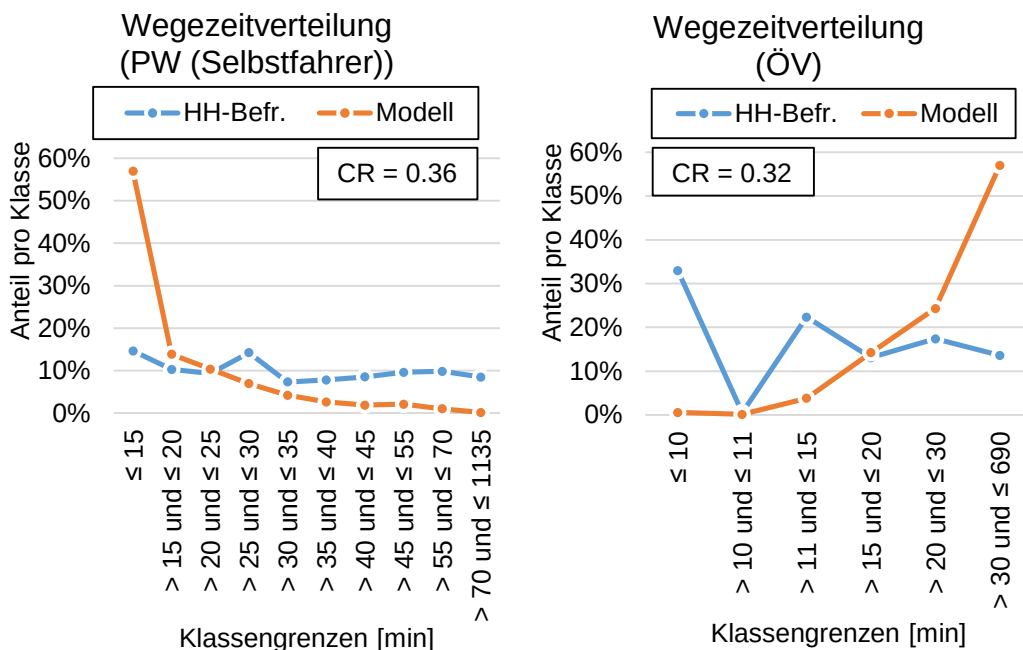
Tab. 37 Mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person – VM Region Stuttgart.

Inhaltliche Differenzierung	VM Region Stuttgart	Haushalts-befragung	Gütemass SQV mit $f = 30$
Mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person	43.04	60.45	0.71
Mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person Modus (wegebezogener Modal Split)			
• Fuss	2.82	8.24	0.74
• Rad	1.94	3.07	0.89
• ÖV	14.10	17.23	0.88
• PW (Mitfahrer)	3.13	6.04	0.82
• PW (Selbstfahrer)	21.05	25.87	0.85
Mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person und Nachfragesegment			
• PW (Mitfahrer) x Arbeit	2.38	5.26	0.81
• PW (Mitfahrer) x Arbeit	0.19	0.29	0.97
• ÖV x Arbeit	1.84	3.42	0.86

Tab. 38 Mittlere Wegezeit [min] pro Person – VM Region Stuttgart.

Inhaltliche Differenzierung	VM Region Stuttgart	Haushalts-befragung	Gütemass SQV mit $f = 30$
Mittlere Wegezeit [min] pro Person	17.90	23.50	0.83
Mittlere Wegezeit [min] pro Person Modus (wegebezogener Modal Split)			
• Fuss	9.36	16.71	0.75
• Rad	12.52	17.48	0.82
• ÖV	35.45	39.66	0.89
• PW (Mitfahrer)	12.83	19.75	0.78
• PW (Selbstfahrer)	16.12	20.49	0.85

Trotz der relativ guten Übereinstimmung der mittleren Wegezeiten stimmen die Wegezeitenverteilungen aus Modell und Haushaltsbefragung nicht gut überein, was sich auch am Coincidence Ratio zeigt (exemplarisch für PW und ÖV in Abb. 123). Darüber hinaus zeigt sich bei dieser Auswertung der Nachteil von Befragungen: Die Befragten runden die benötigte Zeit (ebenso wie die Distanz). Aus diesem Grund sind die Klassen in Abb. 123 alle runde 5-Minuten-Werte. Weil dadurch bestimmte Klassen zu stark besetzt sind, kann es dazu kommen, dass eine äquiquantile Verteilung nur möglich ist, wenn die Klassenanzahl reduziert wird. Dies ist z.B. in Abb. 123 bei der Wegezeitverteilung des ÖV geschehen. Dieses Problem könnte behoben werden, indem der Erhebung die modellierten Wegezeiten (und Wegeweiten) zugespielt werden (vgl. Kapitel 6.1.3).

**Abb. 123** Reisezeitverteilung PW und ÖV im VM Region Stuttgart - äquiquantilen Darstellung auf Basis der Haushaltsbefragung [62].

8.4.4 Verkehrsstärken

Im letzten Schritt der Überprüfung der Modellergebnisse werden die Verkehrsstärken auf einzelnen Netzelementen mit verfügbaren Zählwerten verglichen. Dazu wird für jedes Netzelement, für das Zählwerte vorliegen, die entsprechende Gütemasse bestimmt. Anschließend können diese Gütemasse für eine bessere Übersicht klassifiziert und in Form von Histogrammen oder Tabellen dargestellt werden.

GVM Zürich

Für das GVM Zürich liegen für den MIV Zählwerte auf den Strecken vor. Um die Übereinstimmung der Modellwerte mit diesen Zählwerten zu beurteilen, wurde für jede Strecke mit zugeordnetem Zählwert der g-Wert bestimmt und anschliessend die g-Werte in Abb. 124 in einem Histogramm dargestellt. Es ist zu sehen, dass für über 80% der Strecken eine sehr gute Übereinstimmung mit den Zählwerten, und nur für 1% keine ausreichende Übereinstimmung erreicht wurde.

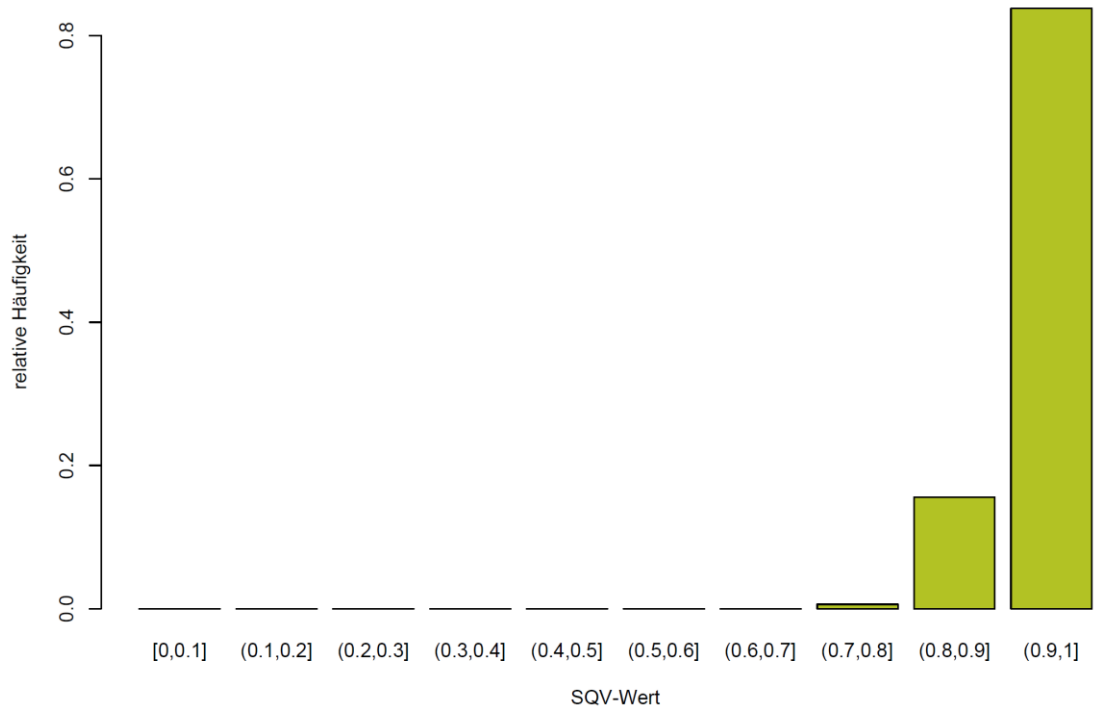


Abb. 124 Histogramm der Güte der täglichen Verkehrsstärken im GVM Zürich – SQV-Wert.

VM Region Stuttgart

Auch das VM Region Stuttgart berechnet tägliche Verkehrsstärken. Als Referenzwerte standen mehrere Verkehrserhebungen für den PW- und LW-Verkehr zur Verfügung, die durch den Modellersteller qualitativ bewertet wurden (vgl. Kapitel 8.2.1). Für die Auswertung werden die beiden Gütemasse SQV und GEH gegenübergestellt. Der Skalierungsfaktor f beträgt 10'000, da es sich beim VM Region Stuttgart um ein Tagesmodell handelt. Die Grenzen des GEH sind dabei so gewählt, dass sie die SQV -Grenzen in etwa widerspiegeln. Wie in Abb. 125 zu sehen ist, gibt es eine relativ gute Übereinstimmung bei den LW-Werten und PW-Werten. Für nur 4% der PW-Modellwert-Zählstellen-Paare gilt $g_{SQV} \leq 0.7$. Diese 4% entsprechen 2 Zählstellenpaaren (eine Zählstelle je Richtung) an einer Autobahn.

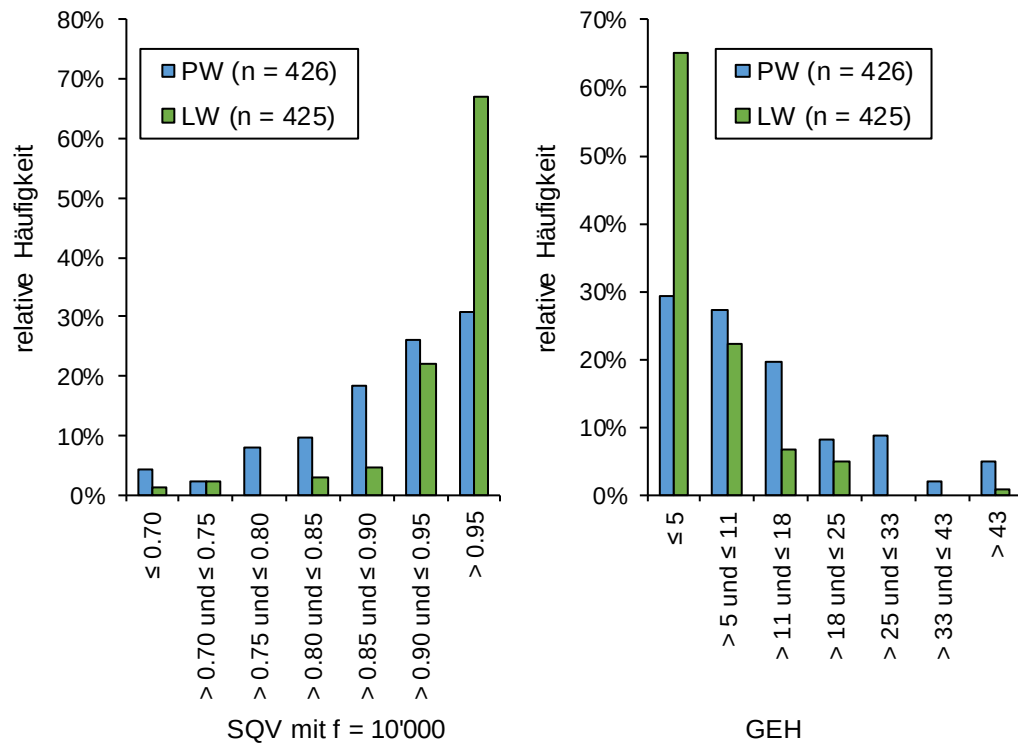


Abb. 125 Histogramm der Güte der täglichen Verkehrsstärken im VM Region Stuttgart - GEH und SQV-Wert.

Fazit:

Die Tests zur Überprüfung der Modellergebnisse waren effizient durchführbar und erwiesen sich als gute Indikatoren für Besonderheiten eines Modells. Für diese Tests sind gute Vergleichsdaten jedoch essenziell. So ist bei der Überprüfung der Reiseweitenverteilungen zu beachten, dass Reisezeiten im MZMV (Vergleichsdaten) stark gerundet sind.

8.5 Sensitivitätstests

In diesem Kapitel werden für die Beispielm Modelle Sensitivitätstests durchgeführt. In Kapitel 8.5.1 werden zuerst die Tests beschrieben und Erwartungen an die Testergebnisse formuliert. Hierfür wird in Anlehnung an Tab. 16 eine tabellarische Form gewählt (siehe Tab. 39). In Kapitel 8.5.2 werden dann die Testergebnisse dokumentiert.

Tab. 39 Vorlage für die Formulierung der Erwartungen bei den Sensitivitätstests.

	Kenngrösse	Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	

	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	
Verkehrsleistung	_____	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	

Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	
	_____	hier wird die Erwartung formuliert
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	
Verkehrszeitaufwand	_____	
	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	

Verkehrszeitaufwand	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	

8.5.1 Beschreibung der Tests und der Erwartungen

Veränderung der Abbruchbedingungen bei der PW-Umlegung

Mit diesem Test wird das Abbruchkriterium (Relative Gap, vgl. Abb. 67) bei der PW-Umlegung verändert. Durch diesen Test lässt sich die Konvergenz der Modellergebnisse bewerten. Es werden zwei Testszenarien vorgeschlagen:

- Relative Gap auf das 0,1-fache des Original- Relative Gap absenken.
- Relative Gap auf das 10-fach des Original- Relative Gap erhöhen.

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario (und / oder einer Erhebung) analysiert.

Tab. 40 Erwartungen für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der PW-Umlegung».

	Kenngrösse	Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	Konstant bleibend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	Je geringer die sich ergebenden Änderungen, desto besser ist die Konvergenz zu bewerten.
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	

Zusätzlich zu diesen Kenngrössen kann gerade bei diesem Test das Umlegungsergebnis, d.h. die umgelegten Verkehrsstärken auf den Strecken, untersucht werden. Das Umlegungsergebnis wird dazu mit einer Zählung oder einem Referenzszenario verglichen.

Das Ergebnis dieses Tests gibt darüber Aufschluss, in welchem Verhältnis der Aufwand (insbesondere die Rechenzeit) und der daraus resultierende Nutzen (d.h. die Genauigkeitserhöhung) zueinander stehen. In jedem Fall sollte eine Stufe höher sowie niedriger als der gewünschte Relative Gap berechnet werden, um im Anschluss an diesen Test eine Aussage treffen zu können, ob das gewünschte Konvergenzniveau akzeptabel ist.

Veränderung der Abbruchbedingungen bei der Rückkopplung während der Nachfrageberechnung

Mit diesem Test wird die Abbruchbedingung bei der Rückkopplung während der Nachfrageberechnung modifiziert. Dadurch lässt sich ebenfalls die Konvergenz der Modellergebnisse bewerten. Es werden die folgenden Veränderungen vorgeschlagen:

- Erhöhung der maximalen Rückkopplungsanzahl um den Faktor 10.
- Reduzierung der zulässigen relativen Abweichung um den Faktor 10.
- Erhöhung der zulässigen relativen Abweichung um den Faktor 10.¹⁸

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt¹⁹. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario (und / oder einer Erhebung) analysiert.

¹⁸ Eine Veränderung der absoluten Abweichung oder einer zulässigen Toleranz ist ebenso denkbar, wird hier jedoch nicht explizit beschrieben.

¹⁹ Wenn möglich können auch Zwischenschritte der Nachfrageberechnung analysiert werden.

Tab. 41 Erwartungen für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der Rückkopplung während der Nachfrageberechnung».

	Kenngrosse	Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	Konstant bleibend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	Je geringer die sich ergebenden Änderungen, desto besser ist die Konvergenz zu bewerten.
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	

Teilung von n Strecken im Netzmodell

Eine endliche Anzahl Strecken des Netzmodells wird mittig geteilt, sodass ein neuer Knoten eingefügt wird. Sonst werden keine Änderungen vorgenommen. Durch die Streckenteilung und die neuen Knoten sollten keine gravierenden Änderungen in den Modellergebnissen auftreten, kleinere Änderungen sind jedoch zu erwarten, da bei gleichen Routenwiderständen die Strecken- und Knotennummerierung als finales Entscheidungskriterium mit einfließen kann.

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario (und / oder einer Erhebung) analysiert.

Tab. 42 Erwartungen für den Test «Teilung von n Strecken im Netzmodell».

	Kenngrösse	Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	Konstant bleibend
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	

Veränderung der Knotennummerierung im Netzmodell

Die Knotennummerierung des Netzmodells wird umgedreht. Sonst werden keine Änderungen vorgenommen. Durch die Umnummerierung sollten keine gravierenden Änderungen in den Modellergebnissen auftreten, kleinere Änderungen sind jedoch zu erwarten, da bei gleichen Routenwiderständen die Knotennummer als finales Entscheidungskriterium mit einfließen kann.

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario (und / oder einer Erhebung) analysiert.

Tab. 43 Erwartungen für den Test «Veränderung der Knotennummerierung im Netzmodell».

	Kenngrosse	Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	Konstant bleibend
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	

Veränderung der Nutzenfunktion (Moduswahl)

Bei diesem Test wird die Nutzenfunktion der Moduswahl modifiziert. Es werden die folgenden Veränderungen vorgenommen:

- Entfernung aller Konstanten aus der Nutzenfunktion (besitzt die Funktion nur Konstanten²⁰, ist der sich ergebende Nutzen konstant 0):
Die Angebotsqualität der einzelnen Moduswahlalternativen hat somit einen determinierenden Einfluss auf die Entscheidung. Die Wahl ist unabhängig von der modusspezifischen Konstanten.
- Entfernung aller Nicht-Konstanten aus der Nutzenfunktion (besitzt die Funktion keine Konstanten, ist der sich ergebende Nutzen konstant 0):
Die Angebotsqualität der einzelnen Moduswahlalternativen sowie die Netzauslastung haben damit keinen Einfluss auf die Entscheidung. Die Wahl ist ausschliesslich von der modusspezifischen Konstanten abhängig.

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario (und / oder einer Erhebung) analysiert. Die Auswertung dieser Kenngrößen zeigt jedoch, dass die Ergebnisse nur bedingt interpretierbar sind.

- Im Fall ohne Konstanten wird ersichtlich, bei welchem Modus die Wahl massgeblich durch die Konstante und nicht durch Kenngrößen der Angebotsqualität beeinflusst wird.
- Besteht die Nutzenfunktion wiederum nur aus Konstanten hat der Widerstand einer Relation (z.B. die Entfernung) keinen Einfluss. Es sollte somit auf jeder Relation der gleiche Modal Split vorliegen. Zudem profitiert der Modus, der keine modusspezifische Konstante aufweist, von dieser Regelung.

Aufgrund der eingeschränkten Interpretierbarkeit wird dieser Test vorerst nicht zur allgemeinen Anwendung empfohlen. Für spezielle Fragestellungen kann eine solche Auswertung wiederum sinnvoll sein. Beispielsweise kann der Einfluss der modusspezifischen Konstanten auf die Nutzenmatrizen je Modus untersucht werden. Hierfür wären die Nutzendifferenz bzw. der Nutzenquotient der konkurrierenden Alternativen auszuwerten.

8.5.2 Auswertung der Tests für die Beispielmodelle

Veränderung der Abbruchbedingungen bei der PW-Umlegung

Dieser Test wurde nur für die das VM Region Stuttgart und das VM Neuchâtel durchgeführt.

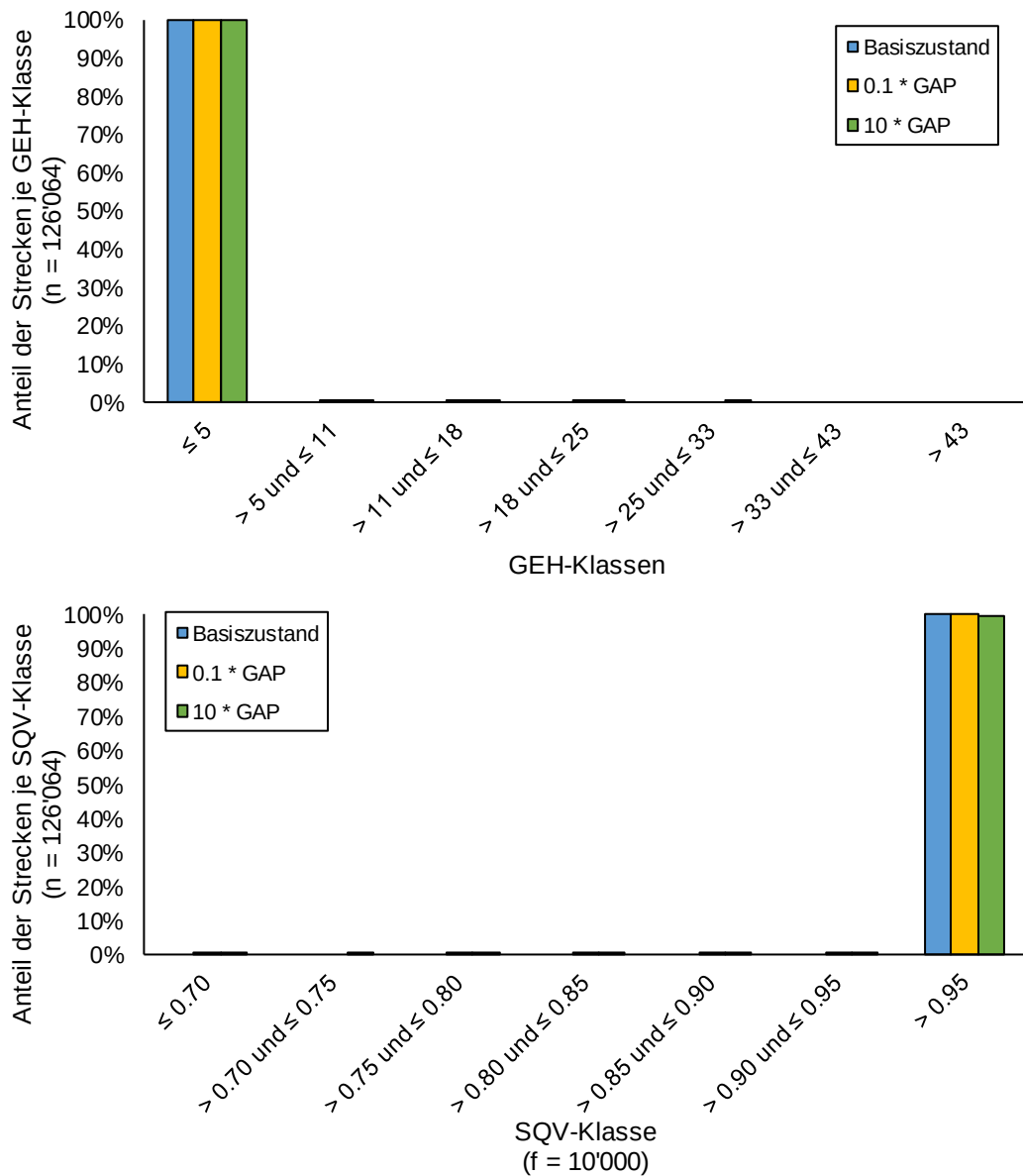
VM Region Stuttgart

Exemplarisch wird im Folgenden nur eine Auswertung der Modi PW (Selbstfahrer) und ÖV betrachtet. Als Referenz wird eine unveränderte Variante des VM Region Stuttgart mit einer zulässigen Relative Gap von $5 \cdot 10^{-5}$ und maximal 100 Iterationen herangezogen. Im Ausgangszustand wurde nach 51 Iterationen eine Relative Gap von ca. $4.52 \cdot 10^{-5}$ erreicht. Durch die Modifikation wird die Relative Gap einmal auf $5 \cdot 10^{-6}$ erhöht und einmal auf $5 \cdot 10^{-4}$ reduziert, die Iterationsanzahl bleibt in beiden Fällen unverändert. Im Fall der höheren Abbruchgrenze ergibt sich nach 64 Iterationen eine Relative Gap von ca. $4.32 \cdot 10^{-6}$; im Fall einer Reduzierung ca. $4.24 \cdot 10^{-4}$ nach 38 Iterationen. Es ergeben sich nur sehr marginale Abweichungen zum Ausgangszustand, wie aus Tab. 44 und Abb. 126 ersichtlich wird. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Konvergenz in allen Fällen ausreichend hoch ist. In diesem Beispiel wäre also auch ein niedrigerer Relative Gap vertretbar.

²⁰ Der Fall, dass eine Nutzenfunktion ausschliesslich aus Konstanten besteht, sollte unbedingt vermieden werden.

Tab. 44 Auswertung für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der PW-Umlegung» – VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	0,1 * Relative Gap	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	☑
	10 * Relative Gap	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	☑

**Abb. 126** Auswertung des Umlegungsergebnisses für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der PW-Umlegung» mit GEH (oben) und SQV (unten) – VM Region Stuttgart.

VM Neuchâtel

Das VM Neuchâtel verwendet für die PW-Umlegung das LUCE Gleichgewichtsverfahren. Der maximale Relative Gap war im übergebenen Modell auf 10^{-5} eingestellt. Im Rahmen dieses Sensitivitätstests wurde er einmal auf 10^{-6} und einmal auf 10^{-4} gesetzt und erneut eine Umlegung gerechnet.

Die originale Umlegung konvergierte nach 14 von max. 200 Iterationen mit einem GAP von $6.24 \cdot 10^{-6}$. Die Umlegung mit dem verschärften Relative Gap konvergierte nach 17 von max. 200 Iterationen mit einem GAP von $6.53 \cdot 10^{-7}$. Die Umlegung mit dem weniger scharfen Relative Gap konvergierte nach 11 von max. 200 Iterationen mit einem GAP von $5.63 \cdot 10^{-5}$.

Tab. 45 Auswertung für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der PW-Umlegung» – VM Neuchâtel.

	Szenario	Pkm PW	Ph PW	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	0,1 * Relative Gap	0.0%	0.0%	☒
	10 * Relative Gap	0.0%	0.0%	☒

Die Abweichungen zur Originalversion hinsichtlich Fahrleistung und Verkehrszeitaufwand sind sehr klein. Die Umlegung zeigt damit eine sehr gute Konvergenz und erfüllt die Erwartungen. Dies spiegelt sich auch im Differenzplot in Abb. 127 wieder. Es sind in beiden Fällen lediglich Verlagerungen zwischen zwei Routen kleinräumiger Maschen zu beobachten.

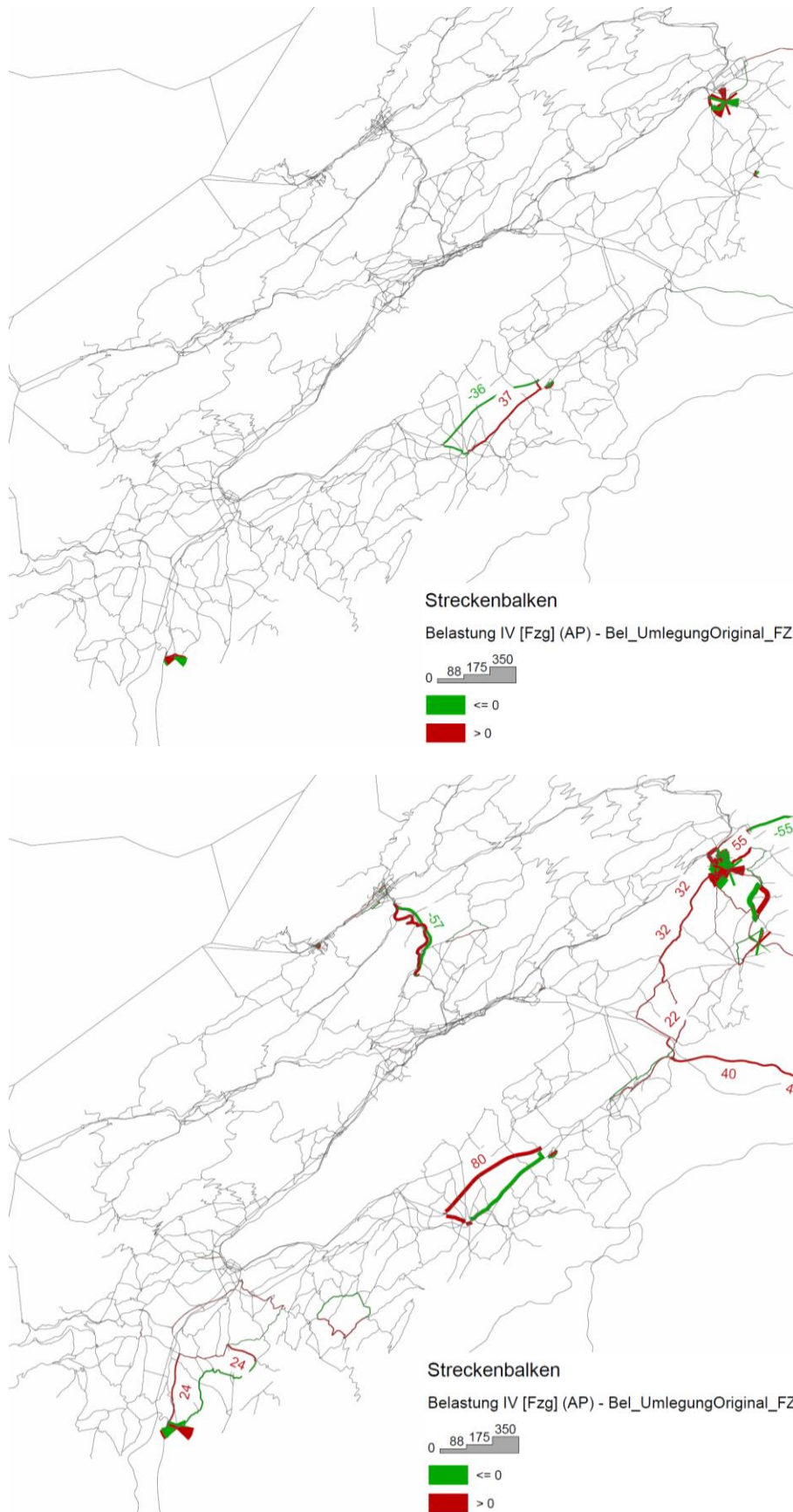


Abb. 127 Differenzplot der Umlegungsergebnisse für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der PW-Umlegung» mit Relative Gap * Faktor 0.1 (oben) und Relative Gap * Faktor 10 (unten) – VM Neuchâtel.

Veränderung der Abbruchbedingungen bei der Rückkopplung während der Nachfrageberechnung

VM Region Stuttgart

Exemplarisch wird im Folgenden nur eine Auswertung der Modi PW (Selbstfahrer) und ÖV betrachtet. Es wird deutlich, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen erfüllt, da sich nur sehr geringe Änderungen ergeben.

Hierzu muss jedoch erwähnt werden, dass die systematische Änderung der maximalen Rückkopplungsanzahl und der zulässigen relativen Abweichung keinen Effekt auf das Ergebnis der Nachfrageberechnung haben. Die Rückkopplung weist standardmässig eine Toleranz von 0 auf. Daher finden so lang Rückkopplungen statt, bis die zu vergleichenden Matrizen im aktuellen und vorhergehenden Iterationsschritt vollkommen identisch sind oder bis die maximale Rücksprunganzahl erreicht ist. Die maximale Rücksprunganzahl ist somit in nahezu jedem Fall das bestimmende Abbruchkriterium. Während diese maximale Rücksprunganzahl eventuell noch zu einer besseren Konvergenz führt, bringt eine Verschärfung der zulässigen relativen Abweichung somit keine Verbesserung.

Tab. 46 Auswertung für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der Rückkopplung während der Nachfrageberechnung» – VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	maximalen Rückkopplungsanzahl	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	☒
	0,1 * zul. rel. Abw.	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	☒

VM Neuchâtel

Bei der Prüfung der Abbruchkriterien für die Rückkopplung im VM Neuchâtel wurde festgestellt, dass diese bereits im Original sehr streng sind. Daher wurde die relative zulässige Abweichung in diesem Test nicht verringert, sondern um einen Faktor 10 erhöht und anschliessend ein voller Modelldurchlauf durchgeführt. Mit den originalen Einstellungen erreicht das Modell Konvergenz nach 5 von 100 Iterationen mit der Lockerung des Abbruchkriteriums nach 4 von 100 Iterationen. Wie in der nachfolgenden Tabelle zu sehen ist, sind die Abweichungen zwischen den beiden Modelldurchläufen gering. Das Modell entspricht also den Erwartungen. Dies zeigt sich auf im Differenzplot der MIV-Belastungen in Abb. 128. Die maximale Änderung je Strecke beträgt 5 Fahrzeuge.

Tab. 47 Auswertung für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der Rückkopplung während der Nachfrageberechnung» – VM Neuchâtel.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
	10 * zul. rel. Abw.	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	☒

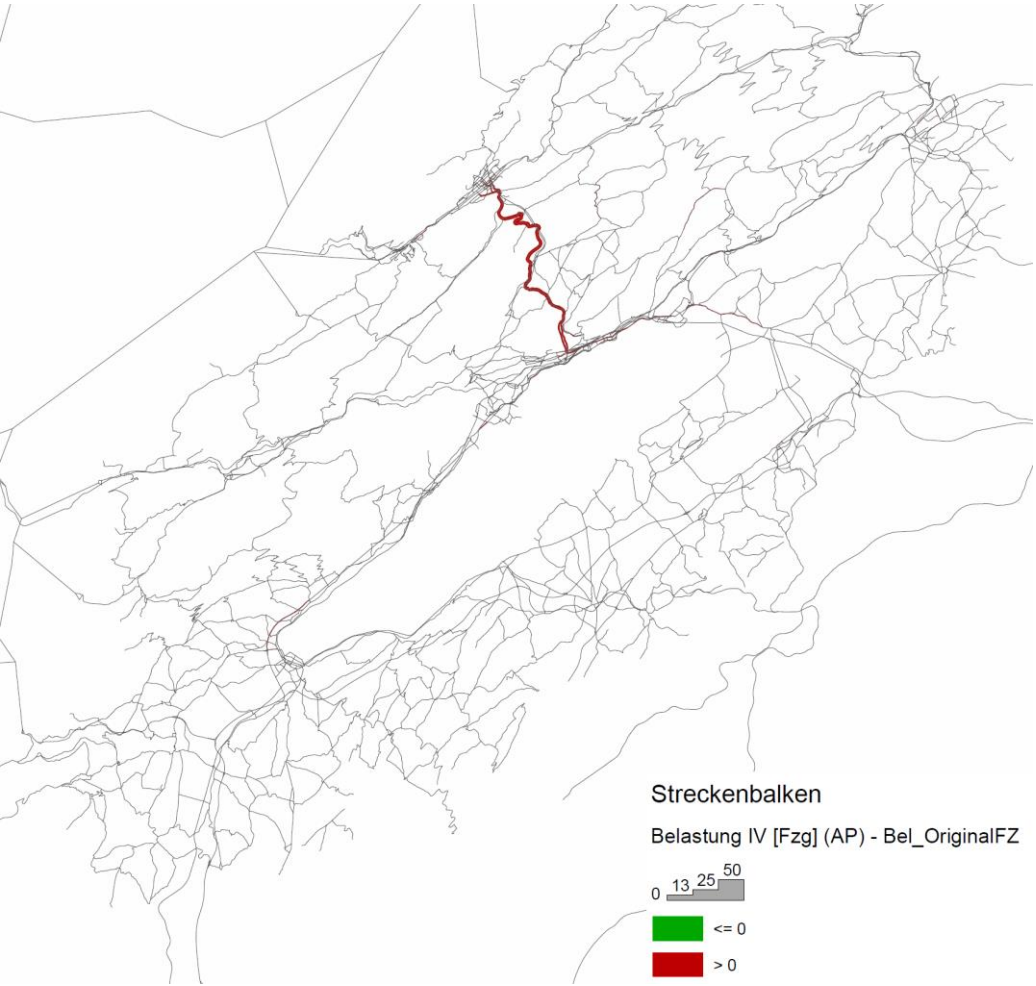


Abb. 128 Differenzplot der Umlegungsergebnisse für den Test «Veränderung der Abbruchbedingungen bei der bei der Rückkopplung» – VM Neuchâtel.

Teilung von *n* Strecken im Netzmodell

VM Region Stuttgart

Bei diesem Test wurden 100 zufällig ausgewählt Strecken im Netzmodell geteilt. Exemplarisch wird im Folgenden nur eine Auswertung der Modi PW (Selbstfahrer) und ÖV betrachtet. Zudem wird eine äquiquantile Reiseweitenverteilung gezeigt. Es wird deutlich, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen erfüllt, da sich keine grossen Änderungen ergeben.

Tab. 48 Auswertung für den Test «Teilung von *n* Strecken im Netzmodell» – VM Region Stuttgart.

Szenario		Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	100 geteilte Strecken	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	☑

Veränderung der Knotennummerierung im Netzmodell

VM Region Stuttgart

Exemplarisch wird im Folgenden nur eine Auswertung der Modi PW (Selbstfahrer) und ÖV betrachtet. Zudem wird eine äquiquantile Reiseweitenverteilung gezeigt. Es wird deutlich, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen erfüllt, da sich keine grossen Änderungen ergeben.

Tab. 49 Auswertung für den Test «Veränderung der Knotennummerierung im Netzmodell»– VM Region Stuttgart.

Szenario		Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	Knoten-umnumme- rierung	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	☒

Fazit:

Wesentlich für die Durchführung der Sensitivitätstests ist die vorgängige Formulierung der Erwartungen. Nur so kann anschliessend im Rahmen des Tests festgestellt werden, ob sich das Modell erwartungsgemäss verhält. Die hier durchgeführten Tests waren aussagekräftig und lieferten gute Einblicke in das Verhalten der Modelle. Zu beachten ist, dass diese Tests – je nach Modell – sehr lange Rechenzeiten verursachen können, da ganze Modelldurchläufe durchgeführt werden. Da diese Tests insbesondere hinsichtlich der Massnahmensensitivität der Modelle sehr aufschlussreich waren, wird dennoch empfohlen, sie durchzuführen und die notwendigen Rechenzeiten bei der Zeitplanung entsprechend zu beachten.

8.6 Realitätstests

In diesem Kapitel werden für die Beispielm Modelle Sensitivitätstests durchgeführt. In Kapitel 8.6.1 werden zuerst die Tests beschrieben und Erwartungen an die Testergebnisse formuliert. Hierfür wird in Anlehnung an Tab. 16 eine tabellarische Form gewählt (siehe Tab. 50). Ergänzend zu der Tabelle der Sensitivitätstests (Tab. 39) kommt noch eine Auswertung der Elastizitäten hinzu. In Kapitel 8.6.2 werden dann die Testergebnisse dokumentiert.

Tab. 50 Vorlage für die Formulierung der Erwartungen bei den Realitätstests.

Kenngrosse		Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	hier wird die Erwartung formuliert
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	
Elastizität	• Verkehrsaufkommen / Variablenänderung	
	• Verkehrsleistung / Variablenänderung	
	• Verkehrszeitaufwand / Variablenänderung	

8.6.1 Beschreibung der Tests und der Erwartungen

Veränderung der Einwohnerzahl

Die Zahl der Einwohner im Untersuchungsgebiet wird in allen Verkehrszellen bezogen auf ein Referenzszenario linear verändert. Alle anderen Variablen einschliesslich des externen Verkehrs bleiben unverändert.

Durch eine Erhöhung der Einwohnerzahl sollte sich aufgrund der Annahmen in der Verkehrserzeugung einer Steigerung der Wegeanzahl ergeben. Dies führt wiederum zu mehr Wegen bei allen Modi. Da für manche Modi kapazitätsabhängige Widerstände modelliert werden, nimmt die Wegeanzahl nicht über alle Modi gleichmässig zu. Verkehrsleistung und Verkehrszeitaufwand resultieren aus der veränderten Wegeanzahl.

Es werden die folgenden Veränderungen vorgeschlagen:

- Zunahme +10%
- Zunahme +20%
- Abnahme -10%
- Abnahme -20%

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario analysiert.

Tab. 51 Erwartungen für den Test «Veränderung der Einwohnerzahl».

Kenngrösse	Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner mit zunehmender Einwohnerzahl zunehmend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner mit zunehmender Einwohnerzahl konstant bleibend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split) mit zunehmender Einwohnerzahl • kapazitätsabhängige Modi (PW, ggf. ÖV) abnehmend • kapazitätsunabhängige Modi (Fuss, Velo, ggf. ÖV) konstant bleibend oder leicht zunehmend
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km] mit zunehmender Einwohnerzahl • kapazitätsabhängige Modi (PW, ggf. ÖV) abnehmend • kapazitätsunabhängige Modi (Fuss, Velo, ggf. ÖV) konstant bleibend oder leicht zunehmend
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km] mit zunehmender Einwohnerzahl zunehmend, wobei kapazitätsabhängige Modi (PW, ggf. ÖV) nicht so stark zunehmen wie kapazitätsunabhängige Modi
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h] mit zunehmender Einwohnerzahl konstant bleibend oder leicht zunehmend (falls sich die die Wegeanzahl für einen kapazitätsabhängigen Modus stark reduziert, kann auch ein leicht sinkender Verkehrszeitaufwand plausibel sein)
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h] mit zunehmender Einwohnerzahl zunehmend
Elastizität	über alle Einwohner: • Verkehrsaufkommen / Einwohneränderung • $\varepsilon < 1$ für kapazitätsabhängige Modi (PW, ggf. ÖV) • $\varepsilon > 1$ für kapazitätsunabhängige Modi (Fuss, Velo, ggf. ÖV) • Verkehrsleistung / Einwohneränderung pro Einwohner: • $\varepsilon < 0$ für kapazitätsabhängige Modi (PW, ggf. ÖV) • $\varepsilon > 0$ für kapazitätsunabhängige Modi (Fuss, Velo, ggf. ÖV) • Verkehrszeitaufwand / Einwohneränderung

Veränderung der Reisegeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit im unbelasteten Netz wird auf allen Strecken bezogen auf ein Referenzszenario linear verändert. Alle anderen Variablen bleiben unverändert.

Eine veränderte Geschwindigkeit im unbelasteten Netz sollte dazu führen, dass der Widerstand einer Relation sinkt, wenn ein Modus von der Geschwindigkeitsänderung profitiert. Dadurch wird die Zielwahl (und durch eine Verknüpfung der Modellstufen auch die Moduswahl) beeinflusst.

Es werden die folgenden Veränderungen vorgeschlagen:

- Zunahme +10%
- Zunahme +20%
- Abnahme -10%
- Abnahme -20%

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario analysiert.

Tab. 52 Erwartungen für den Test «Veränderung der Reisegeschwindigkeit».

	Kenngroße	Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	mit zunehmender Streckengeschwindigkeit
	_____	• über alle Modi: konstant bleibend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	• wenn Modus von Geschwindigkeitsänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW): zunehmend
	_____	• wenn Modus nicht direkt von Geschwindigkeitsänderung betroffen ist: zugunsten der anderen Modi abnehmend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	mit zunehmender Streckengeschwindigkeit
	_____	• über alle Modi: zunehmend
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	• wenn Modus von Geschwindigkeitsänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW): zunehmend
		• wenn Modus nicht direkt von Geschwindigkeitsänderung betroffen ist: zugunsten der anderen Modi abnehmend
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	mit zunehmender Streckengeschwindigkeit abnehmend (wobei die Abnahme bei den Modi, die nicht von Geschwindigkeitsänderung profitieren, von einer Moduswahlverschiebung herrührt)

	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	
Elastizität	Verkehrsaufkommen / Streckengeschwindigkeitsänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner:
	• Verkehrsleistung / Streckengeschwindigkeitsänderung	• $\varepsilon > 0$ wenn Modus von Geschwindigkeitsänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW) ²¹
		• $\varepsilon < 0$ wenn Modus nicht direkt von Geschwindigkeitsänderung betroffen ist
	Verkehrszeitaufwand / Streckengeschwindigkeitsänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner, für alle Modi: $\varepsilon < 0$

²¹ Dies steht nicht im Kontrast zu den von WebTAG [1] geforderten $\varepsilon \geq -2$, da WebTAG genau betrachtet einen gegenteiligen Test durchführt. Dort wird die Fahrzeit verändert, was z.B. bei einer Erhöhung zu einer Reduzierung der Wegeanzahl führen sollte. Im hier gezeigten Test wird die Geschwindigkeit verändert. Eine Erhö-

Veränderung der Bedienungshäufigkeiten

Die Bedienungshäufigkeit im ÖV wird um 50% reduziert. Dadurch halbieren sich die Anzahl der Ankünfte und Abfahrten an den Haltestellen und es ist mit einer Erhöhung der Warte- und Gesamtreisezeit zu rechnen. Durch diese Angebotsreduzierung sinkt die Attraktivität des ÖV und es sollte zusätzlich zu einer Verschiebung in der Moduswahl kommen, was sich z.B. in weniger ÖV-Wegen äussert.

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario analysiert.

Für die Auswertung der Kenngrössen Startwartezeit, Umsteigehäufigkeit und Bedienungshäufigkeit sollte neben einer reinen Analyse der Kenngrössenänderung auf Relations-ebene auch eine Gewichtung mit der Nachfrage dieser Relation stattfinden. Um dabei den Effekt aus der Moduswahl nicht zu berücksichtigen, wird die ÖV-Nachfragematrix des Ausgangszustandes in beiden Fällen (mit und ohne Reduzierung der Bedienungshäufigkeit) zur Gewichtung genutzt.

Tab. 53 Erwartungen für den Test «Veränderung der Bedienungshäufigkeiten».

Kenngrösse		Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	mit abnehmender Bedienungshäufigkeit
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	- über alle Modi: konstant bleibend - ÖV: starke Reduzierung - Andere Modi: Zunahme zulasten des ÖV
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	mit abnehmender Bedienungshäufigkeit
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	- über alle Modi: konstant bleibend oder leicht abnehmend - ÖV: starke Reduzierung - Andere Modi: Zunahme zulasten des ÖV
Verkehrszeit-aufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	mit abnehmender Bedienungshäufigkeit
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	- über alle Modi: konstant bleibend oder leicht abnehmend - ÖV: starke Reduzierung - Andere Modi: Zunahme zulasten des ÖV

hung der Geschwindigkeit führt zu einer Reduzierung der Fahrzeit, was wiederum zu einer Erhöhung des Verkehrsaufkommen bzw. der Verkehrsleistung führen sollte, sofern der betroffene Modus von der Geschwindigkeitsänderung profitiert..

Darüber hinaus ist der von WebTAG geforderte Test wahrscheinlich so zu interpretieren, dass die Fahrzeitmatrix direkt modifiziert wird und die Nachfrage und Umlegung anhand dieser modifizierten Matrix berechnet wird. Im hier gezeigten Test wird die Freifahrtgeschwindigkeit der Strecke modifiziert. Durch Auslastungseffekte kommt es aber trotzdem zu Zeitverlusten, wodurch sich die Fahrzeiten nicht auf allen Routen gleichmässig verändern.

Allgemein ist zu beachten, dass der Effekt dieses Tests vom Funktionstyp der Nutzenfunktion abhängt. Zum Beispiel bewerten z.B. Logit-Modelle Verhältnisse während z.B. Kirchhoff-Modelle Differenzen bewerten. Um einen bestimmten Faktor modifizierte Reisezeiten, sollten also nur bei Logit-Nutzenfunktionen zu Änderungen führen.

Elastizität	• Verkehrsaufkommen / Bedienungshäufigkeitsänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner:
	• Verkehrsleistung / Bedienungshäufigkeitsänderung	• $\varepsilon < 0$ für andere Modi
	• Verkehrszeitaufwand / Bedienungshäufigkeitsänderung	• $\varepsilon > 0$ für Modus ÖV • $\varepsilon \approx 0$ über alle Modi
Sonstiges	mittlere Startwartezeit [h]	Zunahme
	mittlere Umsteigehäufigkeit	Konstant bleibend
	mittlere Bedienungshäufigkeit	Reduzierung um ca. 50%

Veränderung der IV-Preise

Beschreibung

Der globale Treibstoffpreis wird bezogen auf ein Referenzszenario linear verändert. Alle anderen Variablen bleiben unverändert.

Ein veränderter Treibstoffpreis sollte dazu führen, dass der Widerstand einer Relation sinkt, wenn ein Modus von der Preisreduzierung direkt betroffen ist (i.d.R. PW). Dadurch wird die Zielwahl (und durch eine Verknüpfung der Modellstufen auch die Moduswahl) beeinflusst. Die Verkehrserzeugung sollte von der Preisänderung nur betroffen sein, wenn sie wiederum von den Mobilitätskosten (z.B. eines Haushalts) abhängig ist.

Es werden die folgenden Veränderungen vorgeschlagen:

- Zunahme +10%
- Zunahme +20%
- Abnahme -10%
- Abnahme -20%

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario analysiert.

Tab. 54 Erwartungen für den Test «Veränderung der IV-Preise».

Kenngrösse		Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	mit abnehmendem Treibstoffpreis
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	• über alle Modi: konstant bleibend, wenn die Verkehrserzeugung unabhängig von den Mobilitätskosten ist • wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW): zunehmend • wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist: zugunsten der anderen Modi abnehmend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	mit abnehmendem Treibstoffpreis
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	• über alle Modi: konstant bleibend oder leicht zunehmend (je nach direkt betroffener Nachfragesegmentgrösse) • wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW): zunehmend • wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist: zugunsten der anderen Modi abnehmend
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	

Elastizität	Verkehrsaufkommen / Treibstoffpreisänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner: • $\varepsilon < 0$ wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW) • $\varepsilon > 0$ wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist • $\varepsilon \approx 0$ über alle Modi
	Verkehrsleistung / Treibstoffpreisänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner: • $\varepsilon < 0$ wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW; WebTAG [19] fordert $-0,35 \leq \varepsilon \leq -0,25$) • $\varepsilon > 0$ wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist • $\varepsilon \leq 0$ über alle Modi
	Verkehrszeitaufwand / Treibstoffpreisänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner: • $\varepsilon < 0$ wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. PW) • $\varepsilon > 0$ wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist • $\varepsilon \leq 0$ über alle Modi

Veränderung der ÖV-Preise

Beschreibung

Alle ÖV-Ticketpreise werden bezogen auf ein Referenzszenario linear verändert. Alle anderen Variablen bleiben unverändert.

Ein veränderter Ticketpreis sollte dazu führen, dass der Widerstand einer Relation sinkt, wenn ein Modus von der Preisreduzierung direkt betroffen ist (i.d.R. ÖV). Dadurch wird die Zielwahl (und durch eine Verknüpfung der Modellstufen auch die Moduswahl) beeinflusst. Die Verkehrserzeugung sollte von der Preisänderung nur betroffen sein, wenn sie wiederum von den Mobilitätskosten (z.B. eines Haushalts) abhängig ist.

Es werden die folgenden Veränderungen vorgeschlagen:

- Zunahme +10%
- Zunahme +20%
- Abnahme -10%
- Abnahme -20%

Weitere Änderungen am Modell werden nicht vorgenommen. Mit diesen Einstellungen wird jeweils eine Modellrechnung durchgeführt. Dann werden die Änderungen gegenüber dem Referenzszenario analysiert.

Tab. 55 Erwartungen für den Test «Veränderung der ÖV-Preise».

Kenngrösse		Erwartung
Verkehrsaufkommen	Anzahl Wege über alle Einwohner	mit abnehmendem Ticketpreis
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner	• über alle Modi: konstant bleibend, wenn die Verkehrserzeugung unabhängig von den Mobilitätskosten ist • wenn Modus von Ticketpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. ÖV): zunehmend • wenn Modus nicht direkt von Ticketpreisänderung betroffen ist: zugunsten der anderen Modi abnehmend
	mittlere Anzahl Wege pro Einwohner und Modus (wegebezogener Modal Split)	
Verkehrsleistung	mittlere Verkehrsleistung pro Person und Modus [km]	
	Verkehrsleistung aller Einwohner im UR pro Modus [Pers*Km]	mit abnehmendem Ticketpreis
Verkehrszeitaufwand	mittlerer Verkehrszeitaufwand pro Person und Modus [h]	• über alle Modi: konstant bleibend oder leicht zunehmend (je nach direkt betroffener Nachfragesegmentgrösse) • wenn Modus von Ticketpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. ÖV): zunehmend • wenn Modus nicht direkt von Ticketpreisänderung betroffen ist: zugunsten der anderen Modi abnehmend
	Verkehrszeitaufwand aller Personen im UR pro Modus [h]	

Elastizität	Verkehrsaufkommen / Ticketpreisänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner: • $\varepsilon < 0$ wenn Modus von Ticketpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. ÖV; WebTAG [19] fordert $-0,9 \leq \varepsilon \leq -0,2$ bzw. konkret für Bus: $-0,9 \leq \varepsilon \leq -0,7$) • $\varepsilon \geq 0$ wenn Modus nicht direkt von Ticketpreisänderung betroffen ist • $\varepsilon \approx 0$ über alle Modi
	• Verkehrsleistung / Ticketpreisänderung • Verkehrszeitaufwand / Ticketpreisänderung	über alle Einwohner und pro Einwohner: • $\varepsilon < 0$ wenn Modus von Ticketpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. ÖV) • $\varepsilon \geq 0$ wenn Modus nicht direkt von Ticketpreisänderung betroffen ist • $\varepsilon \leq 0$ über alle Modi

8.6.2 Auswertung der Tests für die Beispielmmodelle

Veränderung der Einwohnerzahl

VM Region Stuttgart

Für das VM Region Stuttgart werden in den folgenden Auswertungen nur exemplarisch die Modi PW (Selbstfahrer) und ÖV betrachtet. In Tab. 56 werden die Auswertungskenngrößen über alle Einwohner dargestellt und in Tab. 57 pro Einwohner. Zudem wird in Abb. 129 eine äquiquantile Reiseweitenverteilung gezeigt. Es wird deutlich, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen aus Kapitel 8.6.1 erfüllt.

Tab. 56 Auswertung für den Test «Veränderung der Einwohnerzahl» (über alle Einwohner) - VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	80% Einwohner	-16.5%	-20.2%	-14.6%	-20.5%	-17.9%	-20.4%	☑
	90% Einwohner	-8.2%	-10.2%	-7.2%	-10.4%	-9.0%	-10.3%	☑
	110% Einwohner	8.1%	10.3%	6.9%	10.6%	9.1%	10.5%	☑
	120% Einwohner	16.0%	20.8%	13.5%	21.5%	18.4%	21.3%	☑
Elastizität	80% Einwohner	0.81	1.01	0.71	1.03	0.89	1.02	☑
	90% Einwohner	0.81	1.02	0.71	1.03	0.90	1.03	☑
	110% Einwohner	0.81	1.03	0.70	1.06	0.92	1.05	☑
	120% Einwohner	0.81	1.04	0.70	1.07	0.93	1.06	☑

Tab. 57 Auswertung für den Test «Veränderung der Einwohnerzahl» (pro Einwohner) - VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	80% Einwohner	4.4%	-0.2%	6.7%	-0.6%	2.6%	-0.5%	☑
	90% Einwohner	2.0%	-0.2%	3.1%	-0.4%	1.1%	-0.3%	☑
	110% Einwohner	-1.8%	0.3%	-2.8%	0.5%	-0.8%	0.5%	☑
	120% Einwohner	-3.4%	0.7%	-5.4%	1.2%	-1.3%	1.1%	☑
Elastizität	80% Einwohner	-0.19	0.01	-0.29	0.03	-0.11	0.02	☑
	90% Einwohner	-0.19	0.02	-0.29	0.04	-0.10	0.03	☑
	110% Einwohner	-0.19	0.03	-0.30	0.06	-0.08	0.05	☑
	120% Einwohner	-0.19	0.04	-0.30	0.07	-0.07	0.06	☑

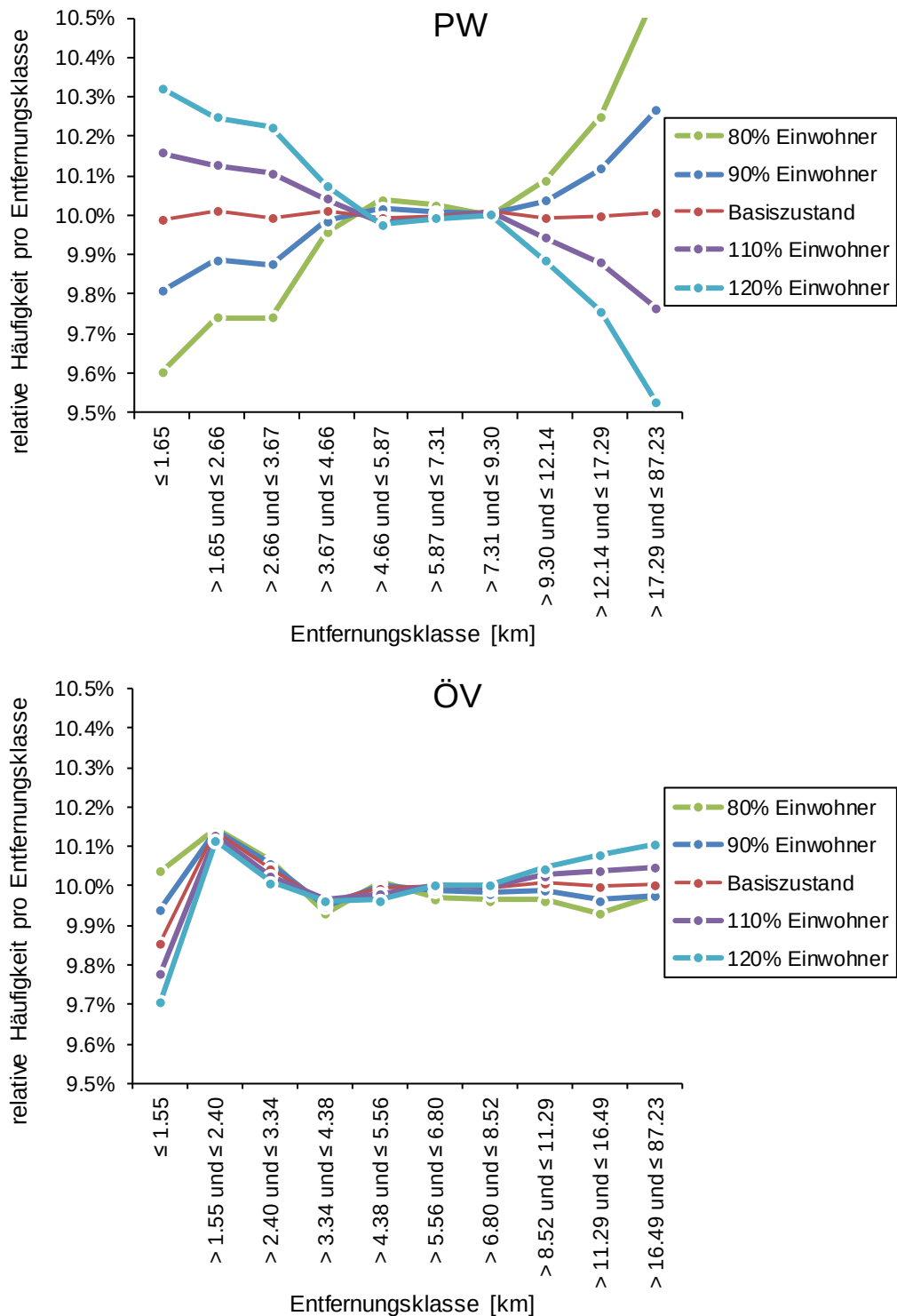


Abb. 129 Äquiquantile Reiseweitenverteilung für PW (oben) und ÖV (unten) beim Test «Veränderung der Einwohnerzahl» - VM Region Stuttgart.

VM Neuchâtel

In der nachfolgenden Tabelle werden die Kontrollgrößen Anzahl Wege, Fahrleistung und Verkehrszeitaufwand für die Modi PW und ÖV über alle Einwohner dargestellt. Das Verkehrsmodell erfüllt dabei grösstenteils die Erwartungen. Während die Gesamtzahl der Wege exakt proportional zur Zahl der Einwohner wächst, ist ein leichter Modal Shift zu beobachten. Die Zahl der Wege des kapazitätsabhängigen Modus PW wächst oder schrumpft weniger stark als die Zahl der Einwohner und es erfolgt eine Verschiebung zu

den anderen Modi hier beispielhaft aufgezeigt am Modus ÖV. Dementsprechend sind die Elastizitäten der Wege für den PW kleiner als eins und für den ÖV grösser als eins. Das gleiche gilt für die Fahrleistung.

Einzig beim Verkehrszeitaufwand für den PW entsprechen die Elastizitäten nicht den Erwartungen. Dies lässt sich unter anderem auf die stellenweise sehr hohe Netzauslastung bei gleichzeitigem Fehlen echter Routenalternativen zurückführen. Dadurch sinkt die Reisegeschwindigkeit im Netz insgesamt ab und die Reisezeiten nehmen überproportional zu den Wegelängen zu.

Insgesamt ist der Modal-Shift Effekt aber klein. Dies ist wahrscheinlich auf einen grossen Einfluss der verkehrsmittelspezifischen Konstanten zurück zu führen. Auch die Reisezeitenverteilung ändert sich nur geringfügig wie in Abb. 130 zu sehen ist.

Tab. 58 Auswertung für den Test «Veränderung der Einwohnerzahl» (über alle Einwohner) - VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	80% Einwohner	-19.8%	-20.3%	-19.6%	-20.3%	-21.2%	-20.2%	☑
	90% Einwohner	-9.9%	-10.2%	-9.8%	-10.2%	-10.8%	-10.2%	☑
	110% Einwohner	9.8%	10.2%	9.7%	10.1%	10.8%	10.1%	☑
	120% Einwohner	19.6%	20.3%	19.3%	20.1%	21.8%	20.2%	☑
Elastizität	80% Einwohner	0.988	1.013	0.982	1.015	1.062	1.011	(☑)
	90% Einwohner	0.986	1.016	0.984	1.021	1.075	1.016	(☑)
	110% Einwohner	0.983	1.016	0.967	1.007	1.079	1.012	(☑)
	120% Einwohner	0.980	1.016	0.965	1.007	1.088	1.012	(☑)

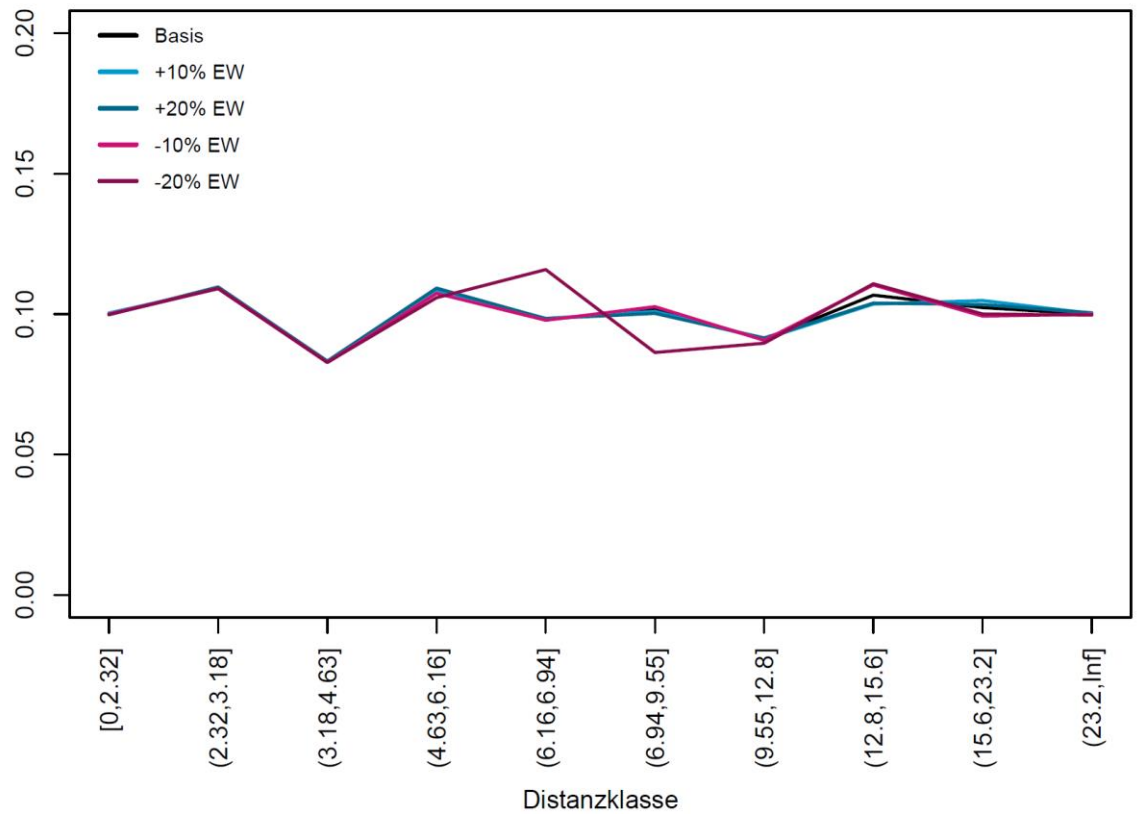


Abb. 130 Äquiquantile Reiseweitenverteilung für PW beim Test «Veränderung der Einwohnerzahl» - VM Neuchâtel.

Veränderung der Reisegeschwindigkeit

VM Region Stuttgart

Erneut zeigt sich in Tab. 59 und Abb. 131, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen aus Kapitel 8.6.1 erfüllt.

Tab. 59 Auswertung für den Test «Veränderung der Reisegeschwindigkeit» - VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	80% Geschwindigkeit v_0	-4.0%	4.9%	-7.8%	8.1%	8.4%	6.4%	☑
	90% Geschwindigkeit v_0	-1.8%	2.2%	-3.6%	3.5%	3.9%	2.8%	☑
	110% Geschwindigkeit v_0	1.5%	-1.8%	3.2%	-2.8%	-3.5%	-2.3%	☑
	120% Geschwindigkeit v_0	2.8%	-3.3%	6.1%	-5.2%	-6.6%	-4.2%	☑
Elastizität	80% Geschwindigkeit v_0	0.18	-0.21	0.36	-0.35	-0.36	-0.28	☑
	90% Geschwindigkeit v_0	0.17	-0.21	0.35	-0.33	-0.37	-0.26	☑
	110% Geschwindigkeit v_0	0.16	-0.19	0.33	-0.30	-0.37	-0.24	☑
	120% Geschwindigkeit v_0	0.15	-0.18	0.33	-0.29	-0.38	-0.23	☑

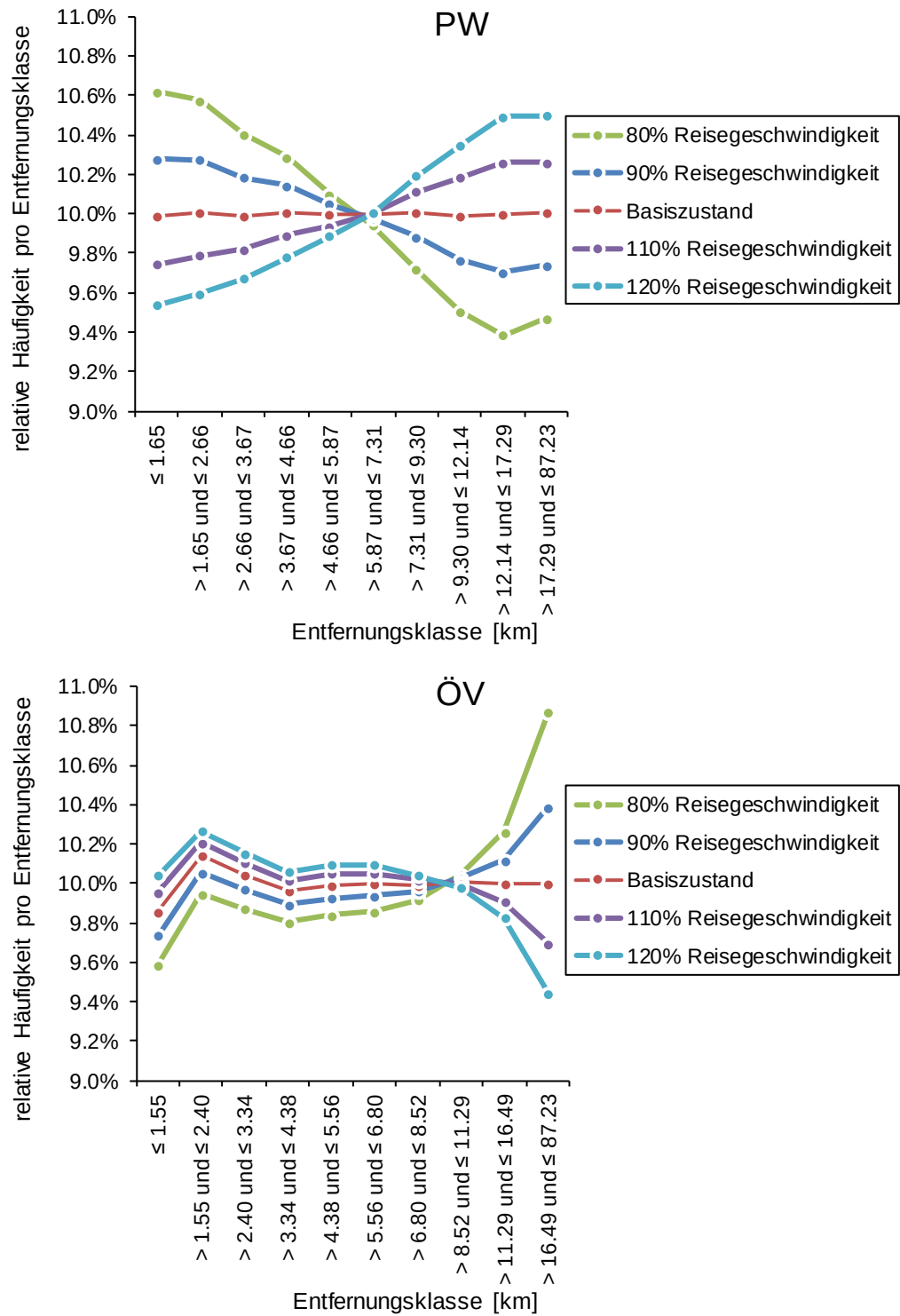


Abb. 131 Äquiquantile Reiseweitenverteilung für PW (oben) und ÖV (unten) beim Test «Veränderung der Reisegeschwindigkeit» - VM Region Stuttgart.

VM Neuchâtel

Wie erwartet führt eine Erhöhung der Reisegeschwindigkeiten auf der Strasse zu einem Modal Shift zum PW und eine Verringerung der Reisegeschwindigkeiten auf der Strasse zu einem Modal Shift weg vom PW. Die Gesamtzahl der Wege über alle Verkehrsmittel bleibt dabei konstant. Insgesamt ist der Effekt eher klein und erwartungsgemäss auch nicht symmetrisch.

In der nachfolgenden Tabelle sind neben den relativen Veränderungen für die Gesamtbevölkerung wiederum die Elastizitäten ausgewiesen. Wie schon für den Test zur Veränderung der Einwohnerzahl entsprechen die Elastizitäten für die Anzahl Wege und die Fahrleistung den Erwartungen. Die Elastizität für den Verkehrszeitaufwand des PW ist jedoch negativ. Das heisst, der durch die sinkende Reisegeschwindigkeit erzeugte Modal Shift kompensiert in der Summe nicht die Reisezeitverluste für die verbleibenden PW-Wege. Eine mögliche Erklärung dafür ist wiederum ein grosser Einfluss der verkehrsmittelspezifischen Konstanten.

Tab. 60 Auswertung für den Test «Veränderung der Reisegeschwindigkeit» (über alle Einwohner) - VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	80% Geschwindigkeit v_0	-2.4%	3.0%	-4.8%	5.5%	15.1%	3.5%	☒
	90% Geschwindigkeit v_0	-1.1%	1.3%	-2.1%	2.3%	7.0%	1.5%	☒
	110% Geschwindigkeit v_0	0.9%	-1.0%	1.6%	-1.9%	-6.1%	-1.2%	☒
	120% Geschwindigkeit v_0	1.6%	-1.9%	3.1%	-3.3%	-11.4%	-2.1%	☒
Elastizität	80% Geschwindigkeit v_0	0.121	-0.152	0.239	-0.275	-0.753	-0.175	(☒)
	90% Geschwindigkeit v_0	0.106	-0.131	0.214	-0.233	-0.698	-0.149	(☒)
	110% Geschwindigkeit v_0	0.086	-0.104	0.163	-0.186	-0.613	-0.119	(☒)
	120% Geschwindigkeit v_0	0.078	-0.093	0.153	-0.163	-0.571	-0.106	(☒)

Die Auswirkung auf die Distanzverteilung sind in Abb. 132 dargestellt und nicht ganz einfach zu interpretieren. Es scheint, dass es vor allem bei den kurzen Distanzen zu Wechseln zwischen benachbarten Distanzklassen kommt. Ein interpretierbares Muster ist aber nicht zu erkennen.

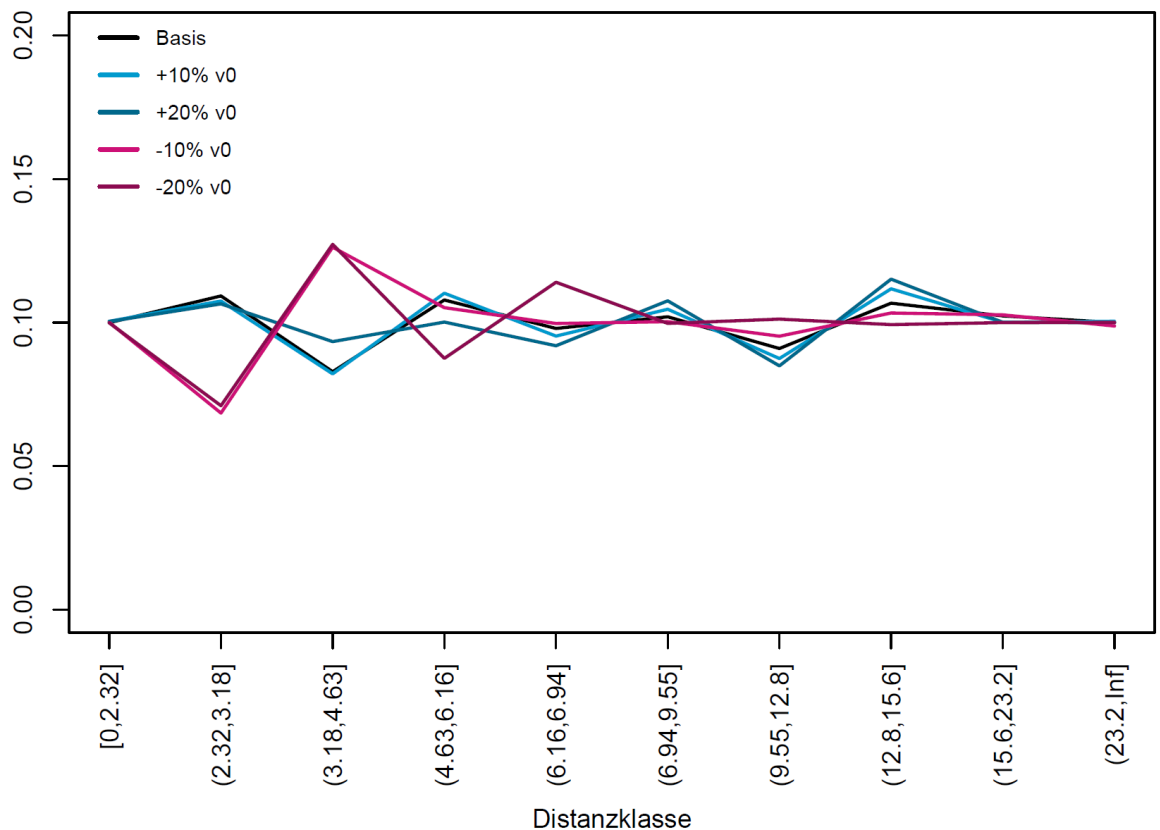


Abb. 132 Äquiquantile Reiseweitenverteilung für PW beim Test «Veränderung der Reisegeschwindigkeit» - VM Neuchâtel.

Veränderung der Bedienungshäufigkeiten

VM Region Stuttgart

In Tab. 61 und Abb. 133 wird ersichtlich, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen aus Kapitel 8.6.1 erfüllt.

Tab. 61 Auswertung für den Test «Veränderung der Bedienungshäufigkeiten» (1/3) - VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Änderung	50% Bedie- nungs-häufig- keit	4.0%	-38.0%	4.0%	-39.0%	5.5%	-39.3%	☑
	50% Bedie- nungs-häufig- keit	-0.06	0.69	-0.06	0.71	-0.08	0.72	☑

Die mittlere Startwartezeit pro Relation erhöht sich durch die Massnahme um ca. 32.6%. Durch eine Gewichtung mit der ursprünglichen ÖV-Nachfrage ergibt sich eine Startwartezeitzunahme von 49.2%. Bei der Umsteigehäufigkeit ergeben sich 0.6% Zunahme (ungewichtet) bzw. 0.7% Abnahme (gewichtet). Die Bedienungshäufigkeit je Relation nimmt um 50.7% (ungewichtet) bzw. 47.3% (gewichtet) ab, was nochmals die Wirkung der Massnahme ausdrückt. Dies entspricht den Erwartungen [7].

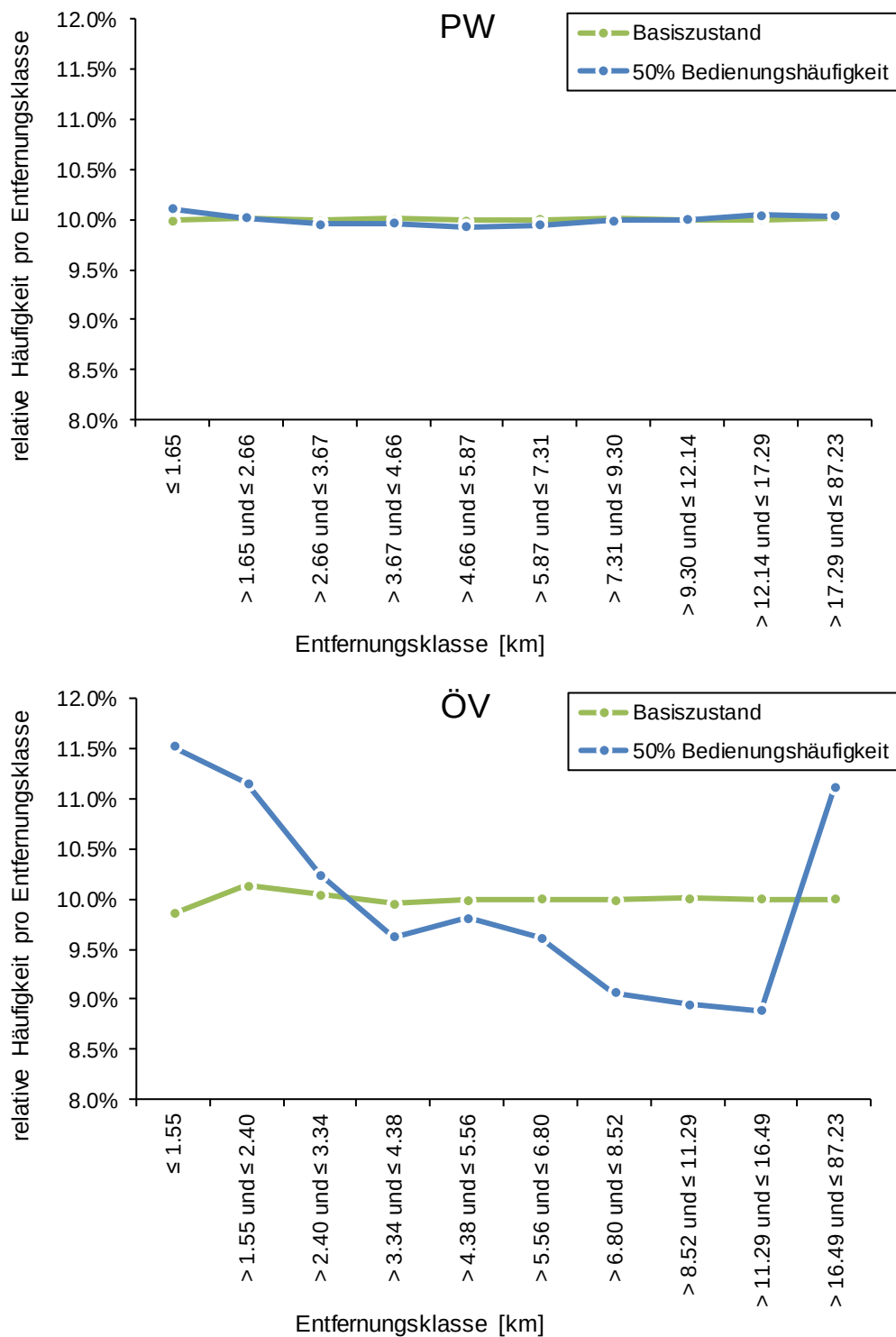


Abb. 133 Äquiquantile Reiseweitenverteilung für PW (oben) und ÖV (unten) beim Test « Veränderung der Bedienungshäufigkeiten » - VM Region Stuttgart.

Veränderung der IV-Preise

Da die beiden Schweizer Modelle keine Preise beinhalten wurde dieser Realitätstest nur mit dem VM Region Stuttgart durchgeführt.

VM Region Stuttgart

In Tab. 62 und Abb. 134 wird ersichtlich, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen aus Kapitel 8.6.1 erfüllt. Die Forderung von WebTAG [19] wird ebenso knapp erfüllt.

Tab. 62 Auswertung für den Test «Veränderung der IV-Preise» – VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Ände- rung	80% Kraftstoffpreis	2.3%	-1.7%	5.0%	-2.5%	6.2%	-2.0%	☑
	90% Kraftstoffpreis	1.1%	-0.9%	2.5%	-1.3%	3.0%	-1.0%	☑
	110% Kraftstoffpreis	-1.2%	0.9%	-2.4%	1.4%	-2.8%	1.0%	☑
	120% Kraftstoffpreis	-2.3%	1.7%	-4.6%	2.8%	-5.5%	2.1%	☑
Elastizität	80% Kraftstoffpreis	-0.10	0.08	-0.22	0.12	-0.27	0.09	☑
	90% Kraftstoffpreis	-0.11	0.08	-0.23	0.12	-0.28	0.10	☑
	110% Kraftstoffpreis	-0.12	0.09	-0.25	0.14	-0.30	0.11	☑
	120% Kraftstoffpreis	-0.13	0.09	-0.26	0.15	-0.31	0.11	☑

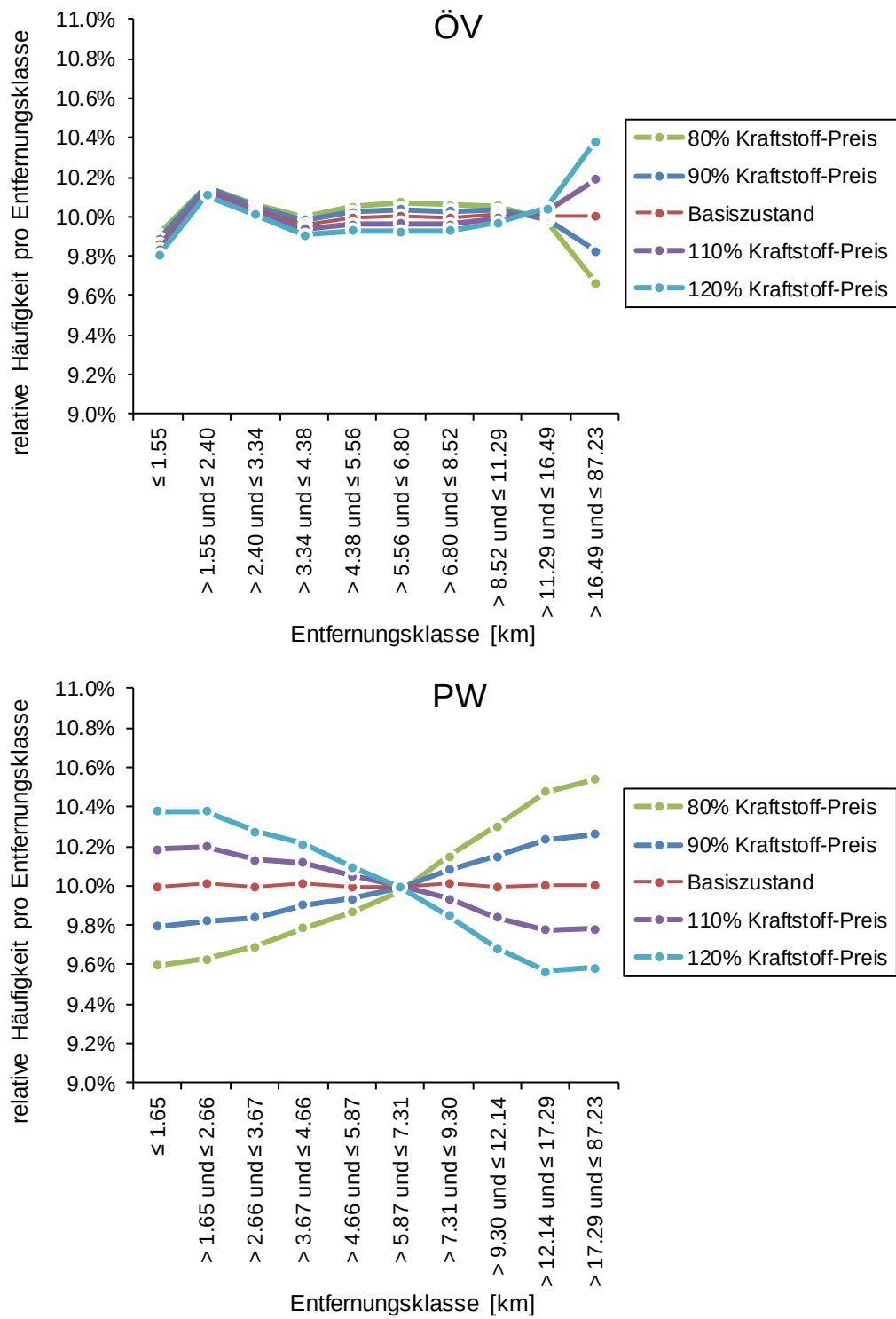


Abb. 134 Äquiquantile Reisweitenverteilung für PW (oben) und ÖV (unten) beim Test «Veränderung der IV-Preise» - VM Region Stuttgart.

Veränderung der ÖV-Preise

Da die beiden Schweizer Modelle keine Preise beinhalten wurde dieser Realitätstest nur mit dem VM Region Stuttgart durchgeführt.

VM Region Stuttgart

In Tab. 63 und Abb. 135 wird ersichtlich, dass das Verkehrsnachfragemodell die aufgestellten Erwartungen aus Kapitel 8.6.1 und WebTAG [19] erfüllt.

Tab. 63 Auswertung für den Test «Veränderung der ÖV-Preise» – VM Region Stuttgart.

	Szenario	Wege PW	Wege ÖV	Pkm PW	Pkm ÖV	Ph PW	Ph ÖV	Erwartung erfüllt?
Relative Ände- rung	80% Ticketpreis	-1.0%	7.4%	-1.1%	9.4%	-1.4%	8.5%	☑
	90% Ticketpreis	-0.5%	3.6%	-0.5%	4.5%	-0.7%	4.1%	☑
	110% Ticketpreis	0.4%	-3.4%	0.5%	-4.2%	0.6%	-3.9%	☑
	120% Ticketpreis	0.9%	-6.6%	0.9%	-8.1%	1.2%	-7.5%	☑
Elastizität	80% Ticketpreis	0.04	-0.32	0.05	-0.40	0.06	-0.37	☑
	90% Ticketpreis	0.04	-0.33	0.05	-0.42	0.06	-0.38	☑
	110% Ticketpreis	0.05	-0.36	0.05	-0.45	0.07	-0.41	☑
	120% Ticketpreis	0.05	-0.37	0.05	-0.46	0.07	-0.43	☑

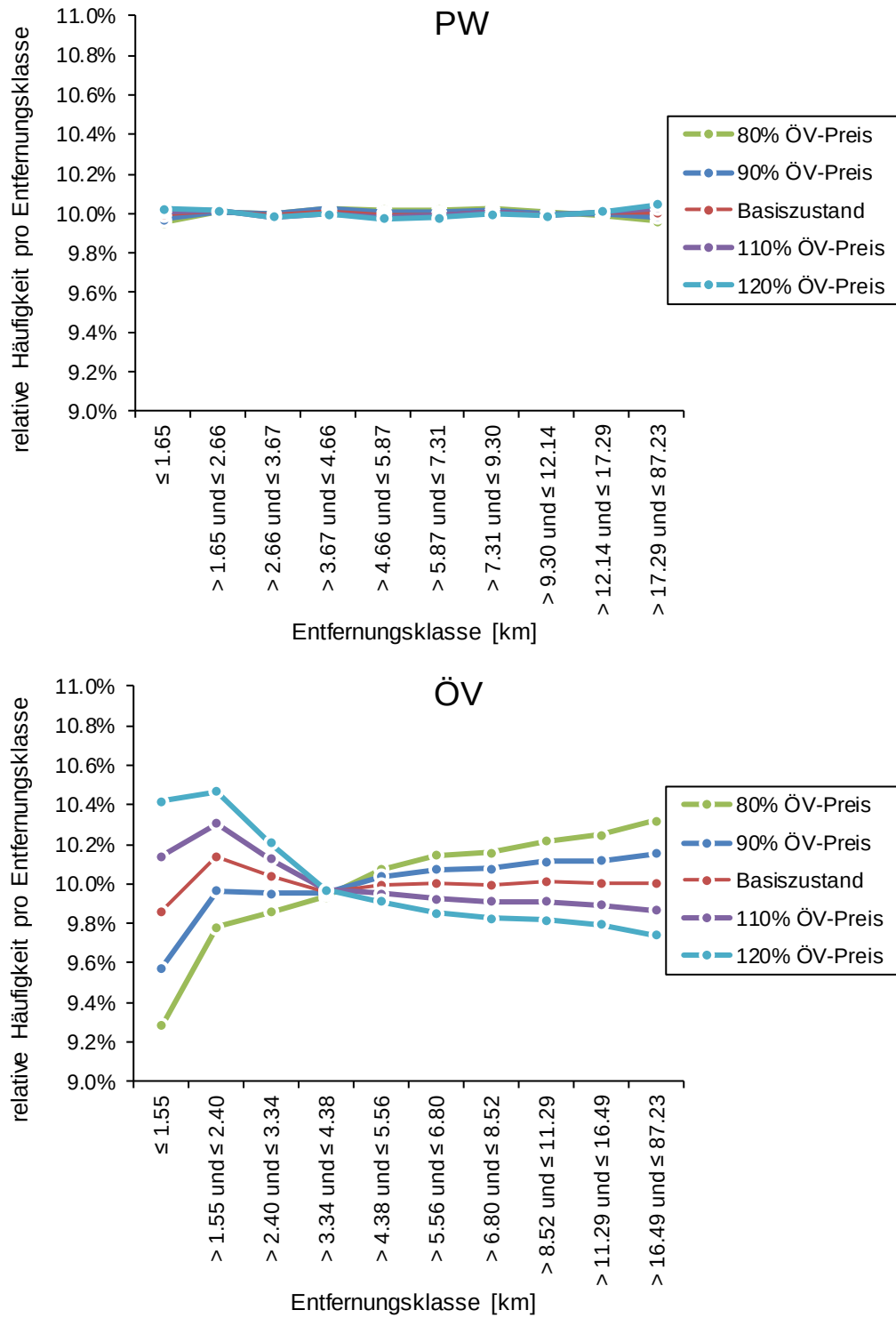


Abb. 135 Äquiquantile Reiseweitenverteilung für PW (oben) und ÖV (unten) beim Test «Veränderung der ÖV-Preise» - VM Region Stuttgart.

Fazit:

Für die Durchführung der Realitätstests kann ein ähnliches Fazit gezogen werden, wie für die Sensitivitätstests. Zentral ist auch hier die vorgängige Formulierung der Erwartungen. Die durchgeführten Realitätstests waren aussagekräftig und lieferten gute Einblicke in das Verhalten der Modelle. Prediction Success Tests konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden.

Da diese Tests insbesondere hinsichtlich der Massnahmensensitivität der Modelle sehr aufschlussreich waren, empfehlen wir auch die Realitätstests trotz des damit verbundenen Aufwands durchzuführen und die notwendigen Rechenzeiten bei der Zeitplanung entsprechend zu beachten.

8.7 Fazit der beispielhaften Anwendungen

Das Ziel der beispielhaften Anwendungen war die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Qualitätstests und Qualitätskenngrößen auf ihre Praxistauglichkeit zu testen. Dazu wurden drei bestehende Modelle einem virtuellen Review unterzogen. Für jeden Test wurden zunächst Erwartungen formuliert. Anschliessend wurden die Tests für die einzelnen Modelle durchgeführt. Das Ziel war Überprüfung der Aussagekraft der einzelnen Tests und des mit ihrer Durchführung verbundenen Aufwands.

Für die Überprüfung von Raumstrukturdaten bestand die grösste Schwierigkeit in der Verfügbarkeit von Vergleichsdaten. Falls keine Vergleichsdaten in der notwendigen Auflösung zur Verfügung stehen, können lediglich Plausibilisierungen unter Zuhilfenahme von Lokalkenntnissen durchgeführt werden. Mit STATPOP und STATENT stehen in der Schweiz jedoch zumindest für Einwohner und Arbeitsplätze entsprechende Datensätze für die Plausibilisierung zur Verfügung. Für einen quantitativen Vergleich mithilfe dieser Daten bedarf es jedoch aufgrund der unterschiedlichen Auflösungen einer entsprechenden Aufbereitung der Daten.

Für die Überprüfung des Verkehrsangebotes wurden Tests auf Ebene Netzwerkelemente und Kenngrößen ausgeführt. Die Tests waren bis auf eine Ausnahme gut durchführbar und hilfreich, um Hinweise darauf zu erhalten, welche Netzelemente genauer geprüft werden sollten. Die Ausnahme war der Vergleich der «mittleren Geschwindigkeit pro Strassenklasse». Zum einen sind für diesen Test keine Vergleichsdaten verfügbar und zum anderen ist die Aussagekraft des Tests stark abhängig davon, wie die Strassenklassen definiert worden sind.

Die Interpretation der flächendeckenden Darstellung der RIN-Kenngrößen war teilweise sehr anspruchsvoll, kann aber dabei helfen, Auffälligkeiten in der Modellierung des Verkehrsangebotes zu finden. Sehr hilfreich waren die RIN-Kenngrößen für die Analyse einzelner Zellen. Eine solche detaillierte Analyse ist in der Praxis jedoch aufwändig. Zu beachten ist zudem, dass die Verläufe der Kurven, die «zu gute» und «zu schlechte» Verbindungen anzeigen, ggf. auf das konkrete Untersuchungsgebiet angepasst werden müssen. In der Anwendung sollte sorgfältig geprüft werden, welche Aussagen erwartet werden können und mit welchem Aufwand diese verbunden sind.

Die Tests zur Überprüfung der Modellergebnisse waren effizient durchführbar und erwiesen sich als gute Indikatoren für Besonderheiten eines Modells. Für diese Tests sind gute Vergleichsdaten jedoch essenziell. So ist bei der Überprüfung der Reiseweitenverteilungen zu beachten, dass Reisezeiten im MZMV (Vergleichsdaten) stark gerundet sind.

Wesentlich für die Durchführung der Sensitivitäts- und Realitätstests ist die vorgängige Formulierung der Erwartungen. Nur so kann anschliessend im Rahmen des Tests festgestellt werden, ob sich das Modell erwartungsgemäss verhält. Die hier durchgeführten Tests

waren aussagekräftig und lieferten gute Einblicke in das Verhalten der Modelle. Zu beachten ist, dass diese Tests – je nach Modell – sehr lange Rechenzeiten verursachen können, da ganze Modelldurchläufe durchgeführt werden. Da diese Tests insbesondere hinsichtlich der Massnahmensensitivität der Modelle sehr aufschlussreich waren, wird dennoch empfohlen, sie durchzuführen und die notwendigen Rechenzeiten bei der Zeitplanung entsprechend zu beachten.

Insgesamt konnte ihm Rahmen dieses Arbeitsschrittes die Praxistauglichkeit eines umfangreichen Satzes an Tests aufgezeigt werden. Diese Tests stellen eine gute Grundlage für die Überprüfung der Qualität von Verkehrsnachfragemodellen dar. Sie können und sollen vom Anwender entsprechend der Spezifikation des zu überprüfenden Modells und den verfügbaren Vergleichsdaten angepasst werden.

9 Fazit

Die vorliegende Forschungsarbeit hat drei wesentliche Ziele verfolgt. Das erste Ziel war die Erfassung des Stands der Forschung und der Anwendung zur Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen. Das zweite Ziel war es, Bestellern von Verkehrsnachfragemodellen eine Hilfestellung für das Aufsetzen einer Modellspezifikation an die Hand zu geben. Das dritte Ziel war die Entwicklung eines breit abgestützten Systems von Kenngrößen und Methoden zur Validierung von Verkehrsnachfragemodellen und der damit erstellten Modellberechnungen.

Die Erhebungen zum Stand der Anwendung zeigen, dass viele der in den folgenden Kapiteln gemachten Empfehlungen bei der Erstellung und Validierung von Modellen in der Schweiz bereits heute berücksichtigt werden. Das Ziel der Empfehlungen für diese Aspekte ist daher primär eine Vereinheitlichung und die Etablierung eines gemeinsamen Standards. Hinsichtlich einzelner Empfehlungen besteht jedoch noch grösserer Verbesserungs- und vor allem ein Informationsbedarf. Namentlich gilt dies insbesondere für die Modellierung von kapazitäts- und steuerungsabhängigen Knotenwiderständen, für die Überprüfung von Fahrtzeiten im Netz und für weiter entwickelte Gütemasse für die Validierung von Verteilungen und Einzelwerten.

Zudem besteht Verbesserungsbedarf bei der Modelldokumentation, insbesondere hinsichtlich Hinweisen zur Bedienung des Modells wie Aussagen zu den Einsatzgrenzen oder zur Granularität der abzubildenden Massnahmen. Aber auch die Modellparameter werden nicht immer vollständig dokumentiert. Anhand der in diesem Projekt erarbeiteten Checkliste für die Modelldokumentation kann überprüft werden ob alle wesentlichen Aspekte eines Modells ausreichend dokumentiert sind. Zudem sollte die Praxis der Modellübergabe an spätere Anwender überdacht werden, so dass die Modelldokumentation standardmässig mit übergeben wird.

Für die Erarbeitung einer Modellspezifikation wurde zur Unterstützung der Besteller von Verkehrsnachfragemodellen eine Checkliste erstellt. Ausgehend von den geplanten Einsatzbereichen des Modells werden Empfehlungen zu geeigneten Modelltypen, der Abbildung von Wahlentscheidungen, der Definition des Planungs- und Untersuchungsraums, der Abbildung von Raum- und Siedlungsstruktur, der Abbildung des Verkehrsangebots, der Abbildung der Verkehrsnachfrage, des Einbezugs von externem Verkehr und Wirtschaftsverkehr, der Prognose und zu verfügbaren und erforderlichen Daten gemacht. Diese Checkliste kann von nun an als Leitfaden für den Prozess zur Erstellung einer umfassenden Modellspezifikation verwendet werden.

Für die Validierung eines Verkehrsnachfragemodells und seiner Ergebnisse wurde ein generelles Vorgehen entwickelt und es wurden geeignete Gütemasse für die Validierung von Einzelwerten, Mengen von Einzelwerten und Verteilungen vorgeschlagen. Darauf aufbauend wurden konkrete Tests zur Überprüfung der Eingangsdaten, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens vorgeschlagen und deren Praxistauglichkeit im Rahmen eines «virtuellen Reviews» von drei Beispielmодellen aufgezeigt. Diese Tests stellen eine gute Grundlage für die Überprüfung der Qualität von Verkehrsnachfragemodellen dar.

Mit den Gütemassen werden in diesem Bericht auch Wertebereiche dazu gegeben, was als eine «sehr gute», «gute» oder «akzeptable» Qualität gewertet werden kann. Diese Wertebereiche sind vorerst als Orientierungswerte zu verstehen, dem Besteller eines Verkehrsnachfragemodells steht es jedoch 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. Wünschenswert wäre darüber hinaus eine internationale Abstimmung der Richtlinien – zumindest im deutschsprachigen Raum.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem bei zwei Forschungsthemen, die in diesem Forschungsprojekt nicht ausreichend behandelt werden konnten. Dies ist einerseits der Einfluss der Modellabstraktion auf die Modellergebnisse und andererseits die Ableitung von Anforderungen an Haushaltsbefragungen (wie z.B. der MZMV) oder andere Erhebungen (wie z.B. die Pendlermatrix) aus den Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle.

Anhänge

I	Checkliste für die Modelldokumentation	263
II	Variablenbezeichner	265

I

Checkliste für die Modelldokumentation

Tab. 64 Checkliste für die Modelldokumentation.

Einleitung
Hintergrund und Entstehungsgeschichte
Vorgängermodelle
Anlass zur Modellerstellung
Anforderungen an das Modell
Prognosefähigkeit
Massnahmensensitivität auf Änderungen im Angebot oder den Strukturdaten
Berücksichtigte Modi, Abbildung von Multimodalität
Vorgesehene Anwendungszwecke
Grenzen des Modells
Vorgesehene Auswertungsmöglichkeiten
Granularität abzubildender Massnahmen
Modellbildung
Modellperimeter
Räumliche Segmentierung
Zeitliche Segmentierung
Segmentierung der Nachfrage
Modelltyp
Modellierung weiterer Verkehre
Datengrundlagen
Verkehrszellen oder Aktivitätenorte
Netze
Strukturdaten
Modellparameter
Aussenverkehr
Güterverkehr
Zählraten
Weitere Daten zur Plausibilisierung
Aufbereitung Angebot
Modellierung der Zonen / Aktivitätenorte
Modellierung Verkehrsnetze
Modellierung von Anbindungen
Modellierung der Verkehrsnachfrage
Erzeugungsraten
Nutzenfunktionen Ziel- und Verkehrsmoduswahl
Funktionen zur Erstellung von Tagesplänen
Parameter für die Umlegung / Verkehrsflusssimulation
Kenngrossenmatrizen
Berechnungsvorschriften für Kenngrossenmatrizen

Bedeutung der Kenngrößenmatrizen
Technische Umsetzung der Modellierung
Verwendete Software
Erläuterung der Verfahrensablauf
Erläuterung verwendeter Skripte
Erläuterung weiterer Tools
Hinweise zur Benennung
Beschreibung von benutzerdefinierten Attributen
Ordnerstruktur
Validierung und Kalibrierung
Verwendete Kennwerte
Zielgrößen / Zielgenauigkeit
Methodisches Vorgehen
Ergebnisse

II Variablenbezeichner

In diesem Forschungsbericht werden, sofern nicht anders vermerkt, die in Tab. 65 aufgeführten Bezeichner für Mengen, Indexe, Variablen, Matrizen und Parameter verwendet. Dabei gelten folgende Regeln:

- Menge: grosse Buchstaben.
- Index: kleine Buchstaben, tiefgestellt.
- Variable: kleine Buchstaben, optionale Beschreibung der Variable hochgestellt, Index tiefgestellt.
- Matrix: grosse Buchstaben, optionale Beschreibung der Matrix hochgestellt, Index tiefgestellt.
- Parameter: kleine griechische Buchstaben, optionale Beschreibung des Parameters hochgestellt, Index tiefgestellt.

Beispiele für Parameter und Variablen

Tab. 65 Parameter und Variablen eines einfachen Verkehrsnachfragemodells.

Mengen und Indexe

$g \in G$	Menge G der Nachfragegruppen g (Personengruppen, Wegezwecke)
$l \in L$	Menge L der Linien l
$m \in M$	Menge M der Modi m
$n \in N$	Menge N der Knoten n (nodes)
$z, o, d \in Z$	Menge Z der Zellen z , Quellzellen o (origin) und Zielzellen d (destination)
$r \in R$	Menge R der Routen oder Verbindungen r
$s \in S$	Menge S der Netzelemente s (supply)
$t \in T$	Menge T der Zeitintervalle t

Variablenbezeichner	
b	bewerteter Nutzen
d	Ortsveränderungen (demand)
d_{god}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Zellen o und d
d_{go}^p	von der Nachfragegruppe g in Zelle o produzierten Ortsveränderungen d
d_{gd}^a	von der Nachfragegruppe g in Zelle d angezogene Ortsveränderungen d
p	Wahrscheinlichkeit
q	Verkehrsstärke
$q^{\max}$	Kapazität
x_k	k . Kenngrösse des Verkehrsangebots zwischen. x beschreibt unterschiedliche Arten von Kenngrössen (u.a. Zeiten, Kosten, Längen, Häufigkeiten).
x_{kod}	k . Kenngrösse des Verkehrsangebots zwischen Zelle o und Zelle d .
t	Zeitaufwand (time), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners x verwendet, wenn es um eine zeitliche Kenngrösse geht
c	Zeitaufwand (time), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners x verwendet, wenn es um eine monetäre Kenngrösse geht
l	Länge (length), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners x verwendet, wenn es um eine entfernungsbezogene Kenngrösse geht
n	Anzahl (number), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners x verwendet, wenn es um eine Kenngrösse geht, die eine Anzahl beschreibt (Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit)
t_s^{free}, t_s oder $t_s(q)$	Fahrzeit auf Netzelement s im unbelasteten und im Zustand bei Verkehrsstärke q
v	deterministischer Nutzen oder Geschwindigkeit
z_{zk}	k . Strukturgrösse in der Verkehrszelle z
$x_s = \frac{q_s}{q_s^{\max}}$	Auslastung eines Netzelements
Matrizen	
D	Nachfragematrix
X	Kenngrössenmatrix
Parameter	
β	allgemeiner Parameter
$\beta_{gk}^p, \beta_{gk}^a$	Produktions- bzw. Anziehungsrate der Nachfragegruppe g für die k . Strukturgrösse
$\beta_g^d, \beta_g^m, \beta_g^r$	Parameter Aufwandsempfindlichkeit der Gruppe g bei der Ziel-, Verkehrsmodus- und der Routenwahl
$\beta_1^s, \beta_2^s, \beta_k^s$	Parameter einer Capacity Restraint Funktion für eine Strecke s

Glossar

Begriff	Bedeutung															
Analysefall (Analysezustand, Ist-Zustand)	~ beschreibt den Zustand für den Zeitpunkt, für den das Verkehrsnachfragemodell mit erhobenen Daten kalibriert und validiert wurde. Dieser Zustand liegt in der Vergangenheit.															
Aussenraum	~ umfasst den Raum ausserhalb des Planungsraumes und besitzt keine oder nur eine geringe verkehrliche Wechselwirkung mit dem Planungsraum. Der ~ symbolisiert den «Rest der Welt» [75].															
Bezugsfall (Referenzfall, Planungsnullfall, Szenario 0, Ohne-Fall, BAU-Zustand (business as usual))	~ beschreibt den Zustand für einen Zeitpunkt in der Zukunft. Dieser Prognosezeitpunkt liegt bezogen auf den Analysefall meist zwischen 10 und 20 Jahren in der Zukunft. Der Bezugsfall enthält Annahmen über eine Menge von (wahrscheinlichen) Entwicklungen und Massnahmen, die bis zu diesem Zeitpunkt eingetreten sein werden.															
Choice Set	Menge der alternativen Handlungsoptionen, aus denen ein Entscheider auswählen kann															
CR	Coincidence Ratio. Untersucht, wie gut sich zwei Verteilungen überdecken. Der CR-Wert hat einen Wertebereich von 0 bis 1, wobei 1 eine vollkommene Übereinstimmung und 0 keinerlei Übereinstimmung anzeigt.															
Cutlines	~ erstrecken sich entlang eines Korridors. Sie werden verwendet, um den Verkehr entlang einer Achse zu erfassen [18].															
GEH	Gütemass für die Quantifizierung von Abweichungen zwischen Modellwert und Realität. Benannt nach Geoffrey E. Havers															
HBS	Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen															
Integrierte Modellstufen (Simultane oder gekoppelte Modellstufen)	~ werden im Gegensatz zu sequenziellen berechneten Modellstufen nicht einzeln und nacheinander berechnet, sondern in einem gemeinsamen Rechenschritt oder in einem gekoppelten Schritt. Für gekoppelte Modelle kommen sog. Logsums zum Einsatz, die den logarithmierten Nutzen der Moduswahl als Aufwandsgrösse für die Zielwahl nutzen. Simultane Modelle lösen ein trilineares Gleichungssystem, das die drei Wahlergebnisse Quelle/Ziel/Modus abbildet. Hierfür werden spezielle Lösungsverfahren wie MULTI oder FURNESS verwendet.															
IV	Individualverkehr															
Klassenbesetzung	~ beschreibt die Anzahl der Elemente in einer diskreten Klasseneinteilung.															
Klassenbreite	~ beschreibt den Kenngrössenwertebereich bei einer diskreten Klasseneinteilung.															
Kordonpunkt (Kordonzelle)	~ bildet den Aussenraum im Modell ab.															
LAU (Local Administrative Unit)	~ beschreibt staatliche, administrative Hierarchieebenen, die auf kommunaler Ebene anzusiedeln sind [64; 65]. <table><tr><th>Bezeichnung</th><th>Beschreibung allgemein</th><th>Entsprechung in der Schweiz</th><th>Entsprechung in Deutschland</th><th>Entsprech Österreich</th></tr><tr><td>LAU 1</td><td>lokale Verwaltungseinheiten</td><td>166 Bezirke</td><td>Verwaltungsgemeinschaften</td><td>-</td></tr><tr><td>LAU 2</td><td>teils Gemeindegliederungen</td><td>2'721 Gemeinden</td><td>Gemeinde und gemeindefreie Gebiete</td><td>100 Gemeindegemeinden</td></tr></table>	Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Deutschland	Entsprech Österreich	LAU 1	lokale Verwaltungseinheiten	166 Bezirke	Verwaltungsgemeinschaften	-	LAU 2	teils Gemeindegliederungen	2'721 Gemeinden	Gemeinde und gemeindefreie Gebiete	100 Gemeindegemeinden
Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Deutschland	Entsprech Österreich												
LAU 1	lokale Verwaltungseinheiten	166 Bezirke	Verwaltungsgemeinschaften	-												
LAU 2	teils Gemeindegliederungen	2'721 Gemeinden	Gemeinde und gemeindefreie Gebiete	100 Gemeindegemeinden												
LW	Lastkraftwagen															
MIV	Motorisierter Individualverkehr															
Mobilitätsverhalten	~ beschreibt die Ortsveränderungen einer Person. Wesentliche Eigenschaften des Mobilitätsverhaltens werden durch folgende Kenngrössen quantifiziert: Zahl der Ortsveränderungen (Wegezähl), Reisezeit und Reiseweite, differenziert nach Verkehrsmittel oder Verkehrsmodus. Beobachtetes und damit tatsächlich realisiertes Mobilitätsverhalten ist ein erforderlicher Input für die Schätzung von Modellparametern. Realisiertes Verhalten muss von Verhaltenspräferenzen unterschieden werden. Realisiertes Verhalten berücksichtigt Randbedingungen (z.B. verfügbare Verkehrsmittel, Preise), die die Personen vorfinden und bei ihrer Entscheidung berücksichtigen müssen. Verhalten verändert sich bei einer Veränderung der Randbedingungen relativ schnell, Präferenzen ändern sich aufgrund von Erfahrungen, Bildung oder kulturellen Änderungen relativ langsam.															

	Bei der Schätzung vom Modellparametern wird versucht alle bekannten Randbedingungen der Verhaltensentscheidungen zu berücksichtigen, so dass die Parameter nicht Verhalten sondern Präferenzen beschreiben.																									
Mobilitätswerkzeug	~ bezeichnet ein Verkehrsmittel, das von einer Person für Ortveränderungen genutzt werden kann, da die Person das Verkehrsmittel entweder besitzt (PW oder Velo) oder über eine Nutzungsberechtigung (ÖV-Abo) verfügt.																									
Modal Split	~ beschreibt die Verteilung der Anteile der Verkehrsmittel am Gesamtverkehrsaufkommen, z.B. bezogen auf die Anzahl durchgeführter Ortsveränderungen oder zurückgelegter Personenkilometer [68].																									
Modellanwender	Personen, die ein validiertes Verkehrsnachfragemodell für Fragestellungen in der Praxis oder in der Forschung für Modellrechnungen anwenden. Sie lassen die Modellarchitektur und die Modellparameter unverändert.																									
Modellbesteller	Person oder Institution, die ein Verkehrsnachfragemodell in Auftrag gibt.																									
Modellersteller	Personen, die das Verkehrsnachfragemodell entwickeln. Sie erstellen das Modell so, dass es den vom Modellanwender oder dem Modelnutzer gewünschten Anforderungen entspricht. Sie kalibrieren, validieren und testen das Verkehrsnachfragemodell.																									
Modellnutzer	Personen, die die Modellergebnisse nutzen, das Modell aber nicht notwendigerweise selber bedienen.																									
MZMV	Mikrozensus Mobilität und Verkehr der Schweiz																									
NOGA	(Nomenclature générale des activités économique) ~ ist eine Klassifizierung von Unternehmen bzw. Arbeitsstätten nach deren wirtschaftlicher Tätigkeit																									
NUTS (Nomenclature of territorial units for statistics)	~ beschreibt ein hierarchisches System zur Identifizierung und Klassifizierung der räumlichen Bezugseinheiten in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union [81; 65; 44]. <table><tr><th>Bezeichnung</th><th>Beschreibung allgemein</th><th>Entsprechung in der Schweiz</th><th>Entsprechung in Deutschland</th><th>Entsprechung in Österreich</th></tr><tr><td>NUTS 0</td><td>Nationalstaaten</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>NUTS 1</td><td>sozioökonomische Grossregionen</td><td>Schweiz insgesamt</td><td>16 Bundesländer</td><td>3 Gruppen von Bundesländern (Ost-, Süd- und Westösterreich)</td></tr><tr><td>NUTS 2</td><td>Grundregionen für regionalpolitische Massnahmen</td><td>7 Grossregionen, zu denen die 26 Kantone zusammengefasst wurden</td><td>39 Regionen (19 Regierungsbezirke, 10 ehemalige Regierungsbezirke, 9 Länder)</td><td>9 Bundesländer</td></tr><tr><td>NUTS 3</td><td>kleine Regionen für spezifische Diagnosen</td><td>26 Kantone</td><td>401 Regionen, entspricht der Kreisebene (Landkreise / Kreise und kreisfreie Städte)</td><td>35 Gruppen von Bezirken</td></tr></table>	Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Deutschland	Entsprechung in Österreich	NUTS 0	Nationalstaaten	-	-	-	NUTS 1	sozioökonomische Grossregionen	Schweiz insgesamt	16 Bundesländer	3 Gruppen von Bundesländern (Ost-, Süd- und Westösterreich)	NUTS 2	Grundregionen für regionalpolitische Massnahmen	7 Grossregionen, zu denen die 26 Kantone zusammengefasst wurden	39 Regionen (19 Regierungsbezirke, 10 ehemalige Regierungsbezirke, 9 Länder)	9 Bundesländer	NUTS 3	kleine Regionen für spezifische Diagnosen	26 Kantone	401 Regionen, entspricht der Kreisebene (Landkreise / Kreise und kreisfreie Städte)	35 Gruppen von Bezirken
Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Deutschland	Entsprechung in Österreich																						
NUTS 0	Nationalstaaten	-	-	-																						
NUTS 1	sozioökonomische Grossregionen	Schweiz insgesamt	16 Bundesländer	3 Gruppen von Bundesländern (Ost-, Süd- und Westösterreich)																						
NUTS 2	Grundregionen für regionalpolitische Massnahmen	7 Grossregionen, zu denen die 26 Kantone zusammengefasst wurden	39 Regionen (19 Regierungsbezirke, 10 ehemalige Regierungsbezirke, 9 Länder)	9 Bundesländer																						
NUTS 3	kleine Regionen für spezifische Diagnosen	26 Kantone	401 Regionen, entspricht der Kreisebene (Landkreise / Kreise und kreisfreie Städte)	35 Gruppen von Bezirken																						
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell der Schweiz																									
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr																									
ÖV	Öffentlicher Verkehr																									
Parameter (Modellparameter)	~ sind die Stellschrauben des Modells. Beispiele für Parameter sind die Parameter der Nutzenfunktion für die Verkehrszielwahl und die Verkehrsmoduswahl, die Parameter der Widerstandsfunktion bei der Routenwahl oder die Parameter der CR-Funktion, Ebenso können Eigenschaften des Netzmodells (z.B. die Zellengrösse, die Zahl und Lage von Anbindungen oder die Streckenkapazitäten) und Eigenschaften des Nachfragemodells (z.B. die Zahl von personengruppen und Wegezwecken) als Parameter betrachtet werden.																									
Planfall (Szenario x, Mit-Fall)	~ beschreibt den Zustand zum Prognosezeitpunkt, geht dabei aber von zusätzlichen Massnahmen oder anderen Entwicklungen aus.																									
Planungsraum (Planungsperimeter, Bearbeitungsperimeter)	~ umfasst den räumlichen Bereich, in dem die planungsauslösenden Defizite liegen und mögliche Massnahmen ihre Wirkungen ausüben. [76]																									
PW	Personenkraftwagen																									
Reiseweite (Wegeweite)	~ beschreibt die zurückgelegte Entfernung eines Weges einer Einzelperson.																									

Reisezeit (Wegezeit, Wegedauer)	~ beschreibt die benötigte Zeit einer Einzelperson zum Zurücklegen eines Weges.
RMSE	Root-mean-squared error, Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat
Screenline	Eine ~ umfasst eine Menge von Strecken, die durch eine Polygonlinie definiert werden. Häufig werden Screenlines verwendet, um den Verkehr an physischen Grenzen (z.B. Flüssen oder Eisenbahnstrecken) zu erfassen. Alle Strecken, die durch die Polygonlinie geschnitten werden, gehören zur ~. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer ~ werden zu einer Screenline-Verkehrsstärke aufsummiert [18].
SPNV	Schienengebundener (öffentlicher) Personennahverkehr
Strassenfunktionsklasse (Functional Road Class (FRC))	~ beschreibt die Strassenklassifikation, die auf der Bedeutung der Funktion beruht, die der Strasse im Strassenverkehrsnetz zukommt.
SQV	Scalable Quality Value. Neu entwickeltes Gütemass, das einige der Nachteile bestehender Gütemasse behebt und auf verschiedene Wertebereiche skalierbar ist.
Untersuchungsraum (Untersuchungsperimeter, Betrachtungsperimeter, Untersuchungsgebiet, erweitertes Umland)	~ umfasst den Planungsraum und dessen (verkehrlichen) Einflussbereich [28].
Variablen (Modellvariablen)	~ beschreiben zeitlich veränderbare Größen (z.B. die Bevölkerungsstruktur oder die Energiepreise) oder Größen, die durch planerische Entscheidungen bestimmt werden (z.B. die Zahl der Arbeitsplätze pro Verkehrszelle, die Anzahl von Fahrstreifen auf einer Strecke, die Lage von Haltepunkten oder die Preise für Parken oder Fahrkarten).
Verkehrsstärke	~ ist eine Einheit für die Anzahl der Verkehrseinheiten pro Zeiteinheit an einem bestimmten Streckenquerschnitt, z.B. Fahrzeuge / Stunde [76].
Verkehrszelle (Zelle, Zone, Bezirk)	~ beschreibt eine Raumeinheit, die den Raum gliedert.
VRS	Verband Region Stuttgart
Zellenschwerpunkt	Im ~ werden – analoge der Massepunkte in der Physik – alle Raum- und Siedlungsstrukturorte (Aktivitätenorte) der jeweiligen Verkehrszelle gebündelt. ~ sind damit Start und Ziel jeder Ortsveränderung im Modell.

Literaturverzeichnis

- [1] *Andres, P.; Spiwoks, M.*: Prognosegütemasse. State of the Art der statistischen Ex-post-Beurteilung von Prognosen. Sofia-Studien zur Institutionenanalyse. Nr. 00-1. ISBN: 9783933795229. Sofia, Darmstadt 2000.
- [2] *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.
- [3] *Axhausen, K. W.; Gärling, T.*: Activity-based approaches to travel analysis: conceptual frameworks, models, and research problems: *Transport Reviews*. Volume 12, Issue 4 1992, S. 323–341.
- [4] *Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.*: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 13., überarbeitete Auflage. ISBN: 978-3642164903. Springer, Berlin, Dordrecht, London, New York 2011
- [5] *Balmer, M.; Meister, K.; Rieser, M.; Axhausen, K. W.*: Agent-based simulation of travel demand: Structure and computational performance of MATSim-T. In: 2nd TRB Conference on Innovations in Travel Modeling, Portland 2008.
- [6] *Bates, J.*: History of Demand Modelling. In: *Hensher, D. A.; Button, K. J.* (Hrsg.): *Handbook of Transport Modelling*. Handbooks in transport. Volume 1. 2. ed. ISBN: 978-0-08-045376-7. Elsevier, Amsterdam 2010, S. 11–34
- [7] *Bawidamann, J.*: Methoden zur automatisierten Überprüfung der Modellgüte von Verkehrsnachfragemodellen, Masterarbeit, Stuttgart 2017
- [8] *Benbow, N.; Wilkinson, I.; Mian, R.; Strankalis, E.; Carter, D.*: Transport for South Hampshire Evidence Base. Road Traffic Model Calibration and Validation, Summary Report 4. Hrsg.: Transport for South Hampshire 2011.
- [9] *Bliemel, F.*: Theil's Forecast Accuracy Coefficient. A Clarification. *Journal of Marketing Research* Vol. X (1973), S. 444–446.
- [10] *Bosserhoff, D.*: Integration von Verkehrsplanung und räumlicher Planung. Teil 1: Grundsätze und Umsetzung. Schriftenreihe der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung. 42. 2. Aufl., Wiesbaden 2000.
- [11] *Boyce, D.; Nie, Y. (M.); Bar-Gera, H.; Liu, Y.; Hu, Y.*: Field Test of a Method for Finding Consistent Route Flows and Multiple-Class Link Flows in Road Traffic Assignments, Final Report. Hrsg.: Federal Highway Administration, Washington, DC 2010.
- [12] *Boyce, D.; O'Neill, C. R.; Scherr, W.*: Solving the Sequential Travel Forecasting Procedure with Feedback. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2008) Nr. 2077, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., S. 129–135
- [13] *Boyce, D.; Ralevic-Dekic, B.; Bar-Gera, H.*: Convergence of Traffic Assignments. How Much is Enough? *Journal of Transportation Engineering* 130 (2004) Nr. 1, S. 49–55.
- [14] *Boyce, D. E.; Williams, H. C. W. L.*: *Forecasting Urban Travel. Past, Present and Future*. Paperback edition. ISBN: 978 1 84844 960 2. Edward Elgar Publishing, Cheltenham 2015
- [15] *Bundesamt für Statistik* (Hrsg.): *Mobilität in der Schweiz. Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten*. Statistik der Schweiz. Fachbereich 11, Verkehr und Nachrichtenwesen. 840-0500. ISBN: 978-3-303-11247-2. Office fédéral de la statistique, Neuchâtel 2007.
- [16] *Bundesamt für Statistik* (Hrsg.): *Mobilität in der Schweiz. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010*. Statistik der Schweiz. Fachbereich 11, Mobilität und Verkehr. 840-1000. ISBN: 978-3-303-11254-0. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel 2012.
- [17] *Bundesamt für Statistik* (Hrsg.): *Verkehrsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*. Statistik der Schweiz. Fachbereich 11, Mobilität und Verkehr. 840-1500. ISBN: 978-3-303-11262-5. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel 2017.
- [18] *Cambridge Systematics Inc.*: *Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual*. Second Edition. 2nd ed. Hrsg.: Federal Highway Administration, Cambridge, Massachusetts 2014.

- [19] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M2. Variable Demand Modelling. Transport analysis guidance: WebTAG. M2 2014.
- [20] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M3.1. Highway Assignment Modelling. Transport analysis guidance: WebTAG. M3.1 2014.
- [21] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M3.2. Public Transport Assignment. Transport analysis guidance: WebTAG. M3.2 2014.
- [22] Développement du modèle de transport: version de référence, Schlussbericht. Hrsg.: Département du développement territorial et de l'environnement des Kantons Neuchâtel 2016
- [23] *Dios Ortúzar, J. d.; Willumsen, L. G.*: Modelling transport. 3. ed. ISBN: 0471861103. Wiley, Chichester 2004
- [24] *Dugge, B.*: Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell (EVA-U), Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. Heft 9, Dresden 2006.
- [25] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen. EVNM, Entwurf des AK 1.2.6
- [26] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Grundlagen und Anwendungen. FGSV. 388. ISBN: 3939715115. FGSV Verlag, Köln 2006
- [27] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung. RIN. FGSV R1 - Regelwerke. 121. ISBN: 3939715794. FGSV Verlag, Köln 2008
- [28] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Empfehlungen für Verkehrserhebungen. EVE. FGSV. 125. ISBN: 9783941790995. FGSV Verlag, Köln 2012
- [29] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. HBS. FGSV. 299. Ausg. 2015. ISBN: 9783864461033. FGSV Verlag, Köln 2015
- [30] *Friedrich, M.*: Qualitätsmanagement für Verkehrsnachfragemodelle. In: *Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft* (Hrsg.): Qualitätsanforderungen an Verkehrsnachfragemodelle. DVWG Symposium, 25./26. März 2010, Berlin. Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft Reihe B, Seminare. 335. ISBN: 9783937877983. Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft, Berlin 2010.
- [31] *Friedrich, M.*: Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen? In: Heureka '11. Optimierung in Verkehr und Transport, 16./17. März 2011 Stuttgart. Heureka, 16.-17.03.2011, Stuttgart. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). ISBN: 9783941790728. FGSV Verlag, Köln 2011.
- [32] *Friedrich, M.*: Verkehrsplanung und Verkehrsmodelle. Skript - WS 2017/2018. Hrsg.: Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik 2017
- [33] *Friedrich, M.; Hartl, M.*: MEGAFON – Modellergebnisse geteilter autonomer 10 Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Schlussbericht, gefördert von: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V., Stuttgarter Straßenbahnen AG, Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH. Hrsg.: Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik 2016.
- [34] *Friedrich, M.; Haupt, T.; Nökel, K.*: Freight Modelling: Data Issues, Survey Methods, Demand and Network Models: 10th International Conference on Travel Behaviour Research. Moving through Nets: the Physical and Social Dimension of Travel, Lucerne 2003.
- [35] *Friedrich, M.; Leurent, F.; Jackiva, I.; Fini, V.; Raveau, S.*: From Transit Systems to Models: Purpose of Modelling. In: *Gentile, G.; Nökel, K.* (Hrsg.): Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems. COST Action TU1004 (TransITS). Springer Tracts on Transportation and Traffic. 1st ed. 2016. ISBN: 978-3-319-25082-3. Springer, s.l. 2016, S. 131–234
- [36] *Friedrich, M.; Pestel, E.; Schiller, C.; Simon, R.*: Quantifying the quality of a travel demand model. Manuscript Draft (eingereicht für TRB 2019)
- [37] *Friedrich, M.; Ritz, C.*: Was bringt wie viel? Alte und neue Verkehrs- und Mobilitätskonzepte für Städte? In: Heureka '14. Optimierung in Verkehr und Transport. Heureka, Stuttgart. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). FGSV Verlag, Köln 2014.

- [38] *Friedrich, M.; Schiller, C.; Pestel, E.; Simon, R.; Schimpf, M.*: Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr. Influencing factors on the quality of macroscopic travel demand models, DFG-Projekt 2015-2019.
- [39] FSUTMS-Cube Framework Phase I. Default Model Parameters, final report. Hrsg.: Cambridge Systematics Inc., Tallahassee, Florida 2006.
- [40] FSUTMS-Cube Framework Phase II. Model Calibration and Validation Standards, final report. Hrsg.: Cambridge Systematics Inc., Tallahassee, Florida 2008.
- [41] *Galster, M.*: Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen, Dissertation, Stuttgart 2008.
- [42] *Gasser, P.; Zhang, C.; Mortreux, C.; Nguyen, M. H.; Cabrera Delgado, J.; Sàarl, M.; Flamm, M.*: Modélisation macroscopique de la circulation cycliste et piétonne – bases. Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs, SVI-Forschungsauftrag Nr. 2014/001, Genève 2017
- [43] Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich. Modellaktualisierung 2013, Schlussbericht. Hrsg.: Amt für Verkehr des Kantons Zürich 2015.
- [44] *Haase, D.*: Gemeinsame Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS). Hrsg.: Europäisches Parlament. 2016.
- [45] *Herkt, S.; Leerkamp, B.; Althoff, T.; Goebel, D.; Janßen, T.; Meißner, A.*: QUALI-MOD. Qualitätsanforderungen und -standards für Verkehrsmodellrechnungen 2008
- [46] *Hollander, Y.*: Transport modelling for a complete beginner. 1. Aufl. ISBN: 9780995662407. CTthink!, London 2016
- [47] *Huelsensbeck, J. P.; Crandall, K. A.*: Phylogeny Estimation and Hypothesis Testing Using Maximum Likelihood. Annual Review of Ecology and Systematics 28 (1997), S. 437–466.
- [48] *infas; Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt*: Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht, Bonn und Berlin 2010.
www.mobilitaet-in-deutschland.de, abgerufen am 27.07.2016
- [49] JASPERS Appraisal Guidance (Transport). The Use of Transport Models in Transport Planning and Project Appraisal. Hrsg.: Jaspers 2014.
- [50] *Jermann, J.*: Vergleich verschiedener Ansätze der GIS-gestützten Potenzialberechnung. 2002.
- [51] *Jermann, J.*: GIS-basiertes Konzept zur Modellierung von Einzugsbereichen auf Bahn-Haltestellen, Dissertation, Zürich 2004.
- [52] *Köhler, U.; Zöllner, R.; Wermuth, M.; Emig, J.* (Hrsg.): Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 804. ISBN: 3934458378. Bundesdr. Zweigniederlassung Bonn, Bonn 2001
- [53] Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Zeitkosten im Güterverkehr, SN 641823. Hrsg.: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) 2007
- [54] Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Zeitkosten im Personenverkehr, SN 641822a. Hrsg.: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) 2009
- [55] Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit. Freie Strecke auf Autobahnen, SN 640018a. Hrsg.: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) 2006
- [56] Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit. Hauptverkehrs- und Verbindungsstrassen, SN 640020a. Hrsg.: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) 2010
- [57] Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit. Knoten mit Lichtsignalanlage, SN 640023a. Hrsg.: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) 2008
- [58] Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit. Knoten ohne Lichtsignalanlage, SN 640022. Hrsg.: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) 1999
- [59] *Lohse, D.; Teichert, H.; Dugge, B.; Bachner, G.*: Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung). Abschlußbericht zum DFG-Forschungsthema. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. Heft 5, Dresden 1997.

- [60] Lohse, D.; Uhlig, J.: Verkehrsplanerische Modellierung des Wirtschaftsverkehrs für Städte und Regionen. Schriftenreihe A des Instituts für Land- und Seeverkehr, Technische Universität Berlin. 44. ISBN: 978-3-7983-2060, Berlin 2007
- [61] Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H.: Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. ISBN: 978-3-662-45854-9. Springer, Berlin Heidelberg 2015.
- [62] Mobilität und Verkehr in der Region Stuttgart 2009/2010. Regionale Haushaltsbefragung zum Verkehrsverhalten, Begleituntersuchungen zur Fortschreibung des Regionalverkehrsplans – Band 1. Schriftenreihe Verband Region Stuttgart. Hrsg.: Verband Region Stuttgart, Stuttgart
- [63] Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK. Aktualisierung auf den Basiszustand 2010, Endbericht. Hrsg.: Bundesamt für Raumentwicklung (ARE); Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) 2014.
- [64] NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics. Local Administrative Units (LAU). Hrsg.: Eurostat.
- [65] NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics. National Structures (non-EU). Hrsg.: Eurostat.
- [66] Pedersen, N. J.; Samdahl, D. R.: Highway traffic data for urbanized area project planning and design. NCHRP Report 255. NCHRP Report. 255. ISBN: 0-309-03450-7. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1982.
- [67] Pestel, E.; Friedrich, M.; Heidl, U.; Pillat, J.; Schiller, C.; Schimpf, M.: Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen. Straßenverkehrstechnik 60 (2016) Nr. 10, S. 658–670
- [68] Pillat, J.: Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen, Dissertation. Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart. 49. ISBN: 9783981057386, Stuttgart 2014
- [69] PTV Visum 16 – Handbuch. Hrsg.: PTV AG 2016
- [70] Raney, B.; Nagel, K.: An improved framework for large-scale multi-agent simulations of travel behavior. In: Rietveld, P.; Jourquin, B.; Westin, K. (Hrsg.): Towards better performing European Transportation Systems. Routledge, London 2006
- [71] Sammer, G.; Röschel, G.; Gruber, C.: Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen. Quality Management and Model Validation for Application of Transport Demand Modelling and Forecast. Straßenforschung. Heft 604. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, Wien 2012
- [72] Scherr, W.; Bützberger, P.: Calibration of the Swiss Rail Model Using Longitudinal Demand Observation, Conference paper STRC 2016. 16th Swiss Transport Research Conference, Monte Verità / Ascona 2016.
- [73] Schiffer, R. G.; Rossi, T. F.: New Calibration and Validation Standards for Travel Demand Modeling. 12th TRB Transportation Planning Applications Conference. Hrsg.: Cambridge Systematics Inc., Houston, TX 2009.
- [74] Schlaich, J.: Verkehrsmodellierung für die Region Stuttgart. Analyseverkehr 2009/2010, Schlussbericht Modellierung. Hrsg.: PTV AG, Karlsruhe 2012
- [75] Schnabel, W.; Lohse, D.: Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2. 3., vollst. überarb. Aufl. ISBN: 9783781218161. Beuth; Kirschbaum, Berlin 2011
- [76] Steierwald, G.; Kühne, H. D.; Vogt, W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. 2., neu bearb. und erw. Aufl. ISBN: 3-540-40588-7. Springer, Berlin 2005
- [77] The Highways Agency; The Scottish Office Development Department; The Welsh Office Y Swyddfa Gymreig; The Department Of The Environment For Northern Ireland; The Department Of Transport (Hrsg.): Traffic Appraisal in Urban Areas. Design Manual for Roads and Bridges. Volume 12. ISBN: 0115534849 1996.
- [78] Travel Demand Modeling Policies and Procedures. 2nd. Hrsg.: Cambridge Systematics Inc. 2014.
- [79] Trommer, S.; Kolarova, V.; Fraedrich, E.; Kröger, L.; Kickhöfer, B.; Kuhnimhof, T.; Lenz, B.; Phleps, P.: Autonomous Driving. The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour, gefördert durch: Instituts für Mobilitätsforschung (ifmo) 2016.

- [80] Verkehrserschließung und Verkehrsangebot im ÖPNV. Hrsg.: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) 2001
- [81] Verordnung (EG) Nr. 105/2007 der Kommission vom 1. Februar 2007 zur Änderung der Anhänge der Verordnung (EG) Nr. 1059/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Schaffung einer gemeinsamen Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS) (EG Nr. 105/2007) (2007).
- [82] *Vortisch, P.*: Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen, Dissertation. Schriftenreihe, Universität Karlsruhe (TH). 64. ISBN: 3-9804741-9-4, Karlsruhe 2006
- [83] *Vrtic, M.; Schüssler, N.; Erath, A.; Axhausen, K. W.*: Mobility Pricing: Zahlungsbereitschaft und Verhaltensreaktionen. In: Heureka '11. Optimierung in Verkehr und Transport, 16./17. März 2011 Stuttgart. Heureka, 16.-17.03.2011, Stuttgart. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). ISBN: 9783941790728. FGSV Verlag, Köln 2011, S. 90–108
- [84] *Vrtic, M.; Schüssler, N.; Erath, A.; Bürgle, M.; Axhausen, K. W.; Frejinger, E.; Stojanovic, J.; Bierlaire, M.; Rudel, R.; Scagnolari, S.; Maggi, R.*: Einbezug von Reisekosten bei der Modellierung des Mobilitätsverhaltens, SVI-Forschungsauftrag Nr. 2005/004, Bern 2007.
- [85] *Wardrop, J. G.*: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Inst. of Civil Engineering London (1952), S. 325–378.
- [86] *Wermuth, M.*: Modellvorstellungen zur Prognose. In: *Steierwald, G.; Kühne, H. D.; Vogt, W.* (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. 2., neu bearb. und erw. Aufl. ISBN: 3-540-40588-7. Springer, Berlin 2005

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 14.05.2018

Grunddaten

Projekt-Nr.: SVI 2015/001

Projekttitel: Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen

Enddatum: 30.04.2018

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Bis anhin fehlen in der Schweiz – wie in den meisten europäischen Ländern – allgemein gültige Richtlinien zur Sicherstellung der Qualität von Verkehrsnachfragemodellen. In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde daher ein breit abgestütztes System von Kenngrössen und Methoden zur Validierung von Verkehrsnachfragemodellen und der damit erstellten Modellberechnungen zusammengestellt. Im Zentrum der Forschungsarbeit steht die Qualitätssicherung makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle für multimodale Mittel- und Langfristprognosen (5-30 Jahre).

Im ersten Schritt wurde ein Überblick über den Stand der Forschung und der Anwendung mittels einer Literaturdurchsicht, der Durchführung einer internationalen Expertenbefragung und der Sichtung von Ausschreibungsunterlagen und Modellberichten geschaffen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden die Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle, die Methoden zur Prüfung der Qualität und die Anforderungen an die Dokumentation zusammengestellt. Zum Abschluss der Arbeiten wurden die entwickelten Methoden auf drei bestehende Modelle angewandt, um zu überprüfen, ob die entwickelten Richtlinien und Kenngrössen aussagekräftig und praxistauglich sind.

Das Ergebnis wurde in drei Checklisten zusammengefasst:

1. Hinweise zur Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells
2. Hinweise zur Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen
3. Checkliste für die Modelldokumentation



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die zu Beginn gesteckten Projektziele konnten erreicht werden. Die erarbeiteten Hinweisblätter helfen den Bestellern von Verkehrsmodellen bereits eine Modellspezifikation zu erstellen, die sowohl die geplanten Anwendungsbereiche als auch die damit verbundenen Qualitätsanforderungen widerspiegelt. Modellersteller werden Methoden und Kenngrößen an die Hand gegeben, mit denen sie die Qualität ihres Modells überprüfen und darlegen können. Nicht zuletzt wurde dem zunehmenden Bedürfnis nach mehr Transparenz mit einer Checkliste für die Modelldokumentation Rechnung getragen.

Folgerungen und Empfehlungen

Mit den Gütemassen wurden in dieser Forschungsarbeit auch Wertebereiche für eine „sehr gute“, „gute“ oder „akzeptable“ Qualität angegeben. Diese Wertebereiche sind als Orientierungswerte zu sehen. Für eine allgemeine Festlegung von Grenzwerten ist derzeit noch zu wenig bekannt, welche Modellwerte in der Realität tatsächlich erreicht werden können. Hierzu sollten daher in den nächsten Jahren Erfahrungswerte gesammelt werden, welche dann bei der Formulierung verbindlicher Richtlinien verwendet werden können. Wünschenswert wäre darüber hinaus eine internationale Abstimmung der Richtlinien – mindestens im deutschsprachigen Raum.

Publikationen:

Rieser, N., Tasnády, B., de Vries, N., Rothenfluh, M., Fischer, R., Friedrich, M., Pestel E. (2018): Qualitätssicherung von Verkehrsmcmodellberechnungen, Schlussbericht Forschungsprojekt SVI 2015/001.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Rieser

Vorname: Nadine

Amt, Firma, Institut: EBP Schweiz AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Nadine Rieser

[illegible]

N. Prieser



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Mit dem Forschungsprojekt konnte die Thematik der Qualitätssicherung für Verkehrsmodelle umfassend beleuchtet werden. Aufgrund der Forschungsarbeit wurden Erfolgsfaktoren für die Bestellung und den Aufbau von Verkehrsmodellen in allen relevanten Phasen identifiziert und entsprechende Empfehlungen formuliert.

Die formulierten Gütemasse stellen eine wertvolle Hilfe dar, um die Qualität verschiedener Elemente eines Verkehrsmodells beurteilen zu können. Ob sich das neu entwickelte Gütemass in der Praxis bewährt, wird sich nach einigen Jahren Erfahrung weisen. Der Ansatz ist aus Sicht der BK jedenfalls vielversprechend.

Umsetzung:

Die Hinweise in den beiden Merkblättern können nach Veröffentlichung durch Modellbesteller, -bauer und -anwender sofort umgesetzt werden. Insbesondere wird Modellbestellern empfohlen, die Hinweise bei der Erstellung des Pflichtenheftes im Rahmen der Ausschreibung zu beachten und verbindliche Anforderungen an Umfang und Qualität des Modells zu definieren.

weitergehender Forschungsbedarf:

Noch offen sind verbindliche Schwellenwerte für die verschiedenen Gütemasse. Diese könnten in einigen Jahren in einer anschliessenden Forschung vertieft untersucht werden. Jedenfalls ist für eine breite Abstützung eine internationale Zusammenarbeit (mindestens D-A-CH-Raum) sinnvoll.

Einfluss auf Normenwerk:

Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine Normierung der Ergebnisse nicht zweckmässig. Die beiden Merkblätter mit den Hinweisen reichen für den Transfer in die Praxis aus. Wenn genügend Erfahrungswerte mit den Gütemassen vorliegen, könnte eine Normierung oder ggf. ein Leitfaden helfen, eine gewisse Mindestqualität in der Verkehrsmodellierung zu verankern.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Erne

Vorname: Stephan

Amt, Firma, Institut: ewp AG Effretikon

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Stephan Erne

Digital unterschrieben von Stephan Erne
DN: cn=Stephan Erne, o=ewp, ou, email=stephan.erne@ewp.ch, c=CH
Datum: 2018.05.14 07:36:16 +02'00'

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare) heruntergeladen werden.

SVI Publikationsliste

Die Liste kann bei der [SVI](#) bezogen werden.