



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Raumentwicklung ARE
Office fédéral du développement territorial ARE
Ufficio federale dello sviluppo territoriale ARE
Uffizi federal da svilup dal territori ARE

b a s e s

**Modelltechnische Möglichkeiten der
Weiterentwicklung des nationalen
Personenverkehrsmodells**

Impressum

Herausgeber

Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Auftraggeber

Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)
Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Bundesamt für Verkehr (BAV)

Autoren

Christian Schiller
Peter de Haan

Projektbegleitung

Nicole Mathys (ARE)
Helmut Honermann (ARE)
Andreas Justen (ARE)
Matthias Kowald (ARE)

Produktion

Stabsstelle Information, ARE

Zitierweise

ARE (2015), Modelltechnische Möglichkeiten der Weiterentwicklung des nationalen Personenverkehrsmodells, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.

Bezugsquelle

www.are.admin.ch

Juni 2015

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Résumé.....	V
1. Ausgangslage und Auftrag.....	1
2. Grundlegendes Modelldesign	2
2.1. Grundlegende Anwendungsziele des ARE bzw. Vereinbarkeit mit den Anforderungen anderer Anwender.....	2
2.2. Grundlegende Modellansätze / Wahlentscheidungen	5
2.3. Vertiefung Abfahrtszeitwahl	5
2.4. Grundlegende Modellansätze / Aggregationsgrad	7
3. Räumliche Segmentierung	10
3.1. Räumliche Segmentierung der Schweiz.....	10
3.2. Räumliche Segmentierung des Auslandes	13
3.3. Segmentierung des Verkehrsangebots	14
3.3.1. MIV-Verkehrsnetzmodellierung	15
3.3.2. ÖV-Verkehrsnetzmodellierung	16
3.4. Segmentierung der Verkehrsnachfrage	17
4. Zeitliche Segmentierung	20
5. Kosten	21
5.1. Zielsetzung, Vorgehen und Analyseschritte	21
5.2. Bisheriges Modell.....	21
5.3. Anforderungen an die Prognosefähigkeit des künftigen NPVM betreffend Moduswahlkosten	22
5.4. Mögliche neue Modellansätze	22
5.4.1. Eckpunkte für die NPVM-Weiterentwicklung.....	22
5.4.2. Entscheidungen auf Ebene Haushalt und Ebene Individuum	23
5.5. Zu betrachtende Mobilitätswerkzeuge	24
5.5.1. Einteilung betreffend Autobesitz und -verfügbarkeit.....	24
5.5.2. Einteilung betreffend ÖV-Abonnemente-Besitz	25
5.6. Modellierung des Erwerbs von Mobilitätswerkzeugen	28
5.6.1. Gegenseitige Abhängigkeit von MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeugbesitz	28

5.6.2. Erwerb von Autos	30
5.6.3. Erwerb von ÖV-Abos.....	32
5.7. Modellierung der Distanzkosten im MIV, je Fahrzeuggruppe	32
5.8. Modellierung der Distanzkosten im ÖV, je Tarifgruppe	33
5.9. Fazit	34
6. Grundlegender Modellaufbau	35
6.1. Zusammenhang der Ortsveränderungen.....	35
6.2. Modellannahmen zur Nachbildung der Entscheidungsprozesse	36
6.3. Verknüpfung der Nachfrage mit den Strukturdaten.....	37
6.4. Aktivitätenwahl	38
6.5. Ziel- und Moduswahl.....	39
6.6. Routenwahl	42
6.7. Gleichgewichte	43
6.8. Nachgelagerte Zeitscheibenmodellierung	43
7. Ein- und Ausgangsdaten.....	45
7.1. Datengenauigkeit	45
7.2. Kalibrierung	46
8. Softwareempfehlung	48
9. Zielerreichung.....	49
9.1. Verkehrsangebotsmodell.....	49
9.2. Verkehrsnachfragemodell (Eingangsdaten)	50
9.3. Verkehrsnachfragemodell (Modelltheorie)	50
9.4. Verkehrsnachfragemodell (Modelltheorie)	50
9.5. Verkehrsnachfragemodell (Auswertungen).....	50

Zusammenfassung

Die Geschäftsstelle der Verkehrsmodellierung im UVEK (VM-UVEK) betreibt seit mehreren Jahren das Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM). Das aktuell gültige NPVM basiert ursprünglich auf dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) 2000. Mit Verfügbarkeit der Daten des MZMV 2005 sowie später des MZMV 2010 wurden Aktualisierungen des Modells vorgenommen. Bei beiden Aktualisierungen wurden weder die Zonen- und Netzstrukturen noch die Modellansätze erneuert.

Der MZMV und die Stated Preference (SP)-Befragung werden alle fünf Jahre durchgeführt und bilden eine wesentliche Grundlage für die Aktualisierung des NPVM. Folgende Gründe sprechen aktuell für eine über eine Aktualisierung hinaus gehende grundlegende Erneuerung des NPVM:

- Wesentliche Modellkomponenten (Zonen- und Netzstrukturen und Modellansätze) entsprechen nicht mehr den heutigen Anforderungen.
- Die gegenwärtige Modellstruktur kann mehrere Massnahmen nur bedingt abbilden (z. B. tatsächliche Reaktionen auf Veränderungen im Besitz von General- und Halbtaxabonnements).
- Die zeitlichen, räumlichen und nachfragetheoretischen Segmentierungen sind dem aktuellen internationalen Stand der Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung anzupassen.
- Das Modell benötigt durch gewachsene Strukturen sehr viele Ausgleichsrechnungen (z. B. Hochrechnung).
- Grundlegende Softwarekomponenten (z. B. VISEVA) stehen nicht mehr in der ursprünglichen Form zur Verfügung.

Um neben den aufgezeigten modelltechnischen Defiziten die Weiterentwicklung des NPVM zielführend durchführen zu können, wurde vom ARE bei den Bundesämtern des UVEK eine Bedürfnisanalyse zu den zukünftigen Anforderungen an das NPVM durchgeführt. Die Anforderungen stimmen mit den im Mandat des VM-UVEK formulierten Zielsetzungen überein. Es zeigt sich auch, dass aufgrund der zukünftigen Fragestellungen der räumliche Detaillierungsgrad des bestehenden NPVM nicht ausreichend ist und dass verkehrspolitische Fragestellungen wie die Abstimmung der Verkehrsträger, Engpassuntersuchungen auf der Strasse und der Schiene sowie Mobility Pricing zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Sowohl aus modelltechnischer Sicht wie auch aufgrund der zukünftigen Anforderungen ist eine grundlegende Erneuerung des bestehenden NPVM somit nötig. Es soll in den Jahren 2016 bis 2019 etabliert werden und unter anderem dann als Grundlage für die Erarbeitung der vierten Generation der Infrastrukturprogramme STEP Schiene (BAV) und STEP Strasse / PEB (ASTRA) dienen.

Der vorliegende Bericht analysiert modelltechnische Defizite des aktuellen Nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM) und beschreibt die Anforderungen an ein zukünftiges Modell. Aufgrund dieser Analyse werden Empfehlungen auf den Ebenen grundlegendes Modelldesign, grundlegende Segmentierung, Modellaufbau und -konsistenz, Kosten der Ziel-, Modus- und Routenwahl und Genauigkeit der Ein- und Ausgangsdaten getroffen.

Grundlegendes Modelldesign

Eine zentrale Empfehlung der Arbeiten ist, dass das NPVM als ein strategisches makroskopisches¹ Verkehrsmodell weiterzuentwickeln ist. Das NPVM funktioniert dabei weiterhin entlang der klassischen Modellschritte eines 4-Stufen Modells und umfasst: Aktivitätenwahl, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl. Es sollte wieder als ein Durchschnitts Werktagsverkehrs (DWV) Modell

¹ Bei makroskopischen Nachfragemodellen haben alle Personen eines Nachfragesegments gleiche Verhaltensparameter für das Mobilitätsverhalten. Mit diesen Parametern wird für jede Alternative eine mittlere Wahlwahrscheinlichkeit bestimmt.

aufgebaut werden, welches auf der schweizerischen Ebene Aussagen zur Verkehrsentwicklung zulässt und - soweit sinnvoll und möglich – räumlich und sachlich weitergehende Differenzierungen, z.B. zur Bewertung von Infrastrukturmassnahmen oder Preispolitiken, ermöglicht. Durch eine höhere Ausdifferenzierung des NPVM sowohl in Bezug auf die Zonenstruktur als auch die Segmentierung der Verkehrsnachfrage soll eine stärkere Verknüpfung zwischen der operativen und der strategischen Ebene möglich sein.

Es wird hinsichtlich der Beschaffungswahl für Fahrzeuge bzw. Zeitfahrkarten im öffentlichen Verkehr (Mobilitätswerkzeuge) sowie der Entwicklung von Strukturdaten (z.B. Wahl von Wohn- und Arbeitsorten) empfohlen, diese Aspekte als separate, vorgeschaltete Modellbausteine des NPVM zu betrachten. Die Modellierung der Abfahrtzeitwahl oder auch die Spitzenstundenmodellierung (Morgen- und Abendspitzen) sollten als „Abschätzwerkzeuge“ der Nachfrageberechnung des DWV nachgeschaltet werden.

Räumliche Segmentierung - Zonen und Verkehrsangebot

Das derzeitige NPVM besitzt eine Verkehrszone pro Gemeinde inkl. Ausdifferenzierungen in den 10 grössten Schweizer Städten (in Summe 2.944 Binnenverkehrszonen). Aus der grossen Varianz der Einwohnerinnen und Einwohner pro Verkehrszone (im Mittelwert 2'800 und im Maximum ca. 62'000 Einwohnerinnen und Einwohner) resultiert ein Ungleichgewicht der massgebenden Strukturgrössen zwischen den Verkehrszonen, was bei Gravitationsansätzen zu schwer handhabbaren Verzerrungsproblemen führen kann. Eine feinere Zonenstruktur sollte dieses Problem adressieren und versuchen, bezüglich der Verteilung der Strukturgrössen eine höhere räumliche Homogenität zu erreichen. Zudem können über eine Verfeinerung der Zonenstruktur der Zonenbinnenverkehr reduziert, eine realitätsnähere Anbindung der Zonen an das Netz realisiert und damit genauere Kenngrössenmatrizen erreicht werden. Daher wird empfohlen, die Zoneneinteilung, insbesondere in den Agglomerationen, zu verfeinern und zu homogenisieren. Es wird als sinnvoll erachtet, sich dabei an der Zoneneinteilung der kantonalen Modelle zu orientieren. Die Autoren empfehlen ebenfalls eine Ausdifferenzierung der Zonen für das Ausland, wobei die Nachfrageberechnung auf das Gebiet der Schweiz beschränkt bleibt.

Im Bereich des Verkehrsangebots wird vorgeschlagen, für die Verkehrsmittel Fuss (F), Velo (V), öffentlicher Verkehr (ÖV) und motorisierter Individualverkehr (MIV) separate Verkehrsnetze zu erstellen, wobei die Zonenstrukturen für alle Netze identisch sind.

- Beim MIV-Netz ist auf ein Navigationsnetz zurückzugreifen. Fehlende Attribute sind zu ergänzen und das untergeordnete Strassennetz in Abhängigkeit von der Zonenstruktur und dem Anbindungskonzept zu definieren.
- Die ÖV-Modellierung sollte, falls möglich, das Schienennetz des BAV nutzen. Es wird angestrebt, den strassengebundenen ÖV in Abhängigkeit von der Zonenstruktur und der Haltestellendatenbank auf einem MIV-Netzgraphen abzubilden. Wie bisher soll der HAFAS-Fahrplan / Systemfahrplan das Verkehrsangebot im ÖV abbilden. Dabei ist die Verwendung einer nachfragebeeinflussenden Auslastung einzelner ÖV-Verkehrssysteme in Betracht zu ziehen.
- Fuss und Velo sollen in einem kombinierten Netz abgebildet werden. Neben der Möglichkeit, dieses Netz aus dem MIV-Netz abzuleiten, sollte geprüft werden, ob besser geeignete Grundlagen zur Verfügung stehen (z.B. das topographische Landschaftsmodells (TLM) von swisstopo). Eine Umlegung der ermittelten Verkehrsnachfrage für die Verkehrsmittel zu Fuss und Velo ist nicht vorgesehen.

Segmentierung der Verkehrsnachfrage

Bei makroskopischen Modellen ist es üblich, die Verkehrsnachfrage differenziert nach verhaltenshomonogenen Personengruppen und Wegezwecken abzubilden. Folgende Anpassungen werden empfohlen:

- Unterteilung der Personengruppen Erwerbstätiger und des Wegezwecks Arbeiten in „einfach“ und „qualifiziert“.
- Unterteilung der Personengruppen Schüler in „Schüler“ und „Studierende“ und des Wegezwecks Bildung in „Schule“ und „Hochschule“.
- Unterteilung des Wegezwecks Einkaufen in „täglichen Bedarf“ und „Event-Shopping“ (z. B. Möbel, Mode, Elektronik, etc.).
- Unterteilung des Wegezwecks Freizeit in „nah“ und „fern bzw. Großattraktion“.
- Personengruppenfeine Einteilung nach Personenwagen (PW) und ÖV-Abonnementsbesitz, Generalabonnement (GA), Halbtaxabonnement (HTA), Verbund Abo (VBA).

Im Gegensatz zum bestehenden NPVM sollte im Rahmen der Erzeugung ein Ansatz zur Aktivitätenwahl verwendet werden. Entsprechende Regressionsansätze sollten Verhaltensunterschiede in Raumtypen (z. B. zwischen Gemeindetypen) berücksichtigen.

Abbildung von Kosten bei der Verkehrsmittelwahl

Aufgrund der zukünftigen Anforderungen an das NPVM soll die Abbildung der Kosten bei der Verkehrsmittelwahl gegenüber dem heutigen Modellansatz verfeinert werden. Es wird eine zweistufige Kostenmodellierung vorgeschlagen: der Erwerb von Mobilitätswerkzeugen im ersten Schritt und die Verkehrsmittelwahl auf der Basis von Distanzkosten (bei gegebenem Besitz an Mobilitätswerkzeugen) in einem zweiten Schritt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit einer getrennten Berücksichtigung der fixen Kosten bei der Anschaffung und der variablen Kosten bei der Verkehrsmittelwahl. In Erweiterung zum aktuellen NPVM sollen auch die Verkehrsverbünde bei der Modellierung des ÖV explizit berücksichtigt werden.

Der Erwerb eines Mobilitätswerkzeuges erfolgt in der Realität für MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeuge in gegenseitiger Abhängigkeit. Für die Umsetzung im NPVM wird aber empfohlen, den Erwerb eines PW und von ÖV-Mobilitätswerkzeugen sequentiell zu modellieren: Zuerst, in Abhängigkeit vom Haushaltstyp und der Einkommensklasse sowie der erwarteten Jahresmobilität, erfolgt die Modellierung des PW-Besitzes. Anschliessend – auch in Abhängigkeit von der Qualität des lokalen ÖV-Angebots – sind die ÖV-Mobilitätswerkzeuge zu bestimmen.

Es wird vorgeschlagen, beim PW nur zwischen „kein Auto“ und „Auto vorhanden“ zu unterscheiden. Aufgrund der komplexeren Struktur beim ÖV werden vier Abstufungen für den Besitz von ÖV-Mobilitätswerkzeugen vorgeschlagen: „kein Abo/HTA“, „Tarifverbund Kern“, „Tarifverbund ganz“ und „GA“. Beim ÖV wird empfohlen, generell die HTA-Preise zu berücksichtigen, da in der Schweiz ein HTA-Abonnement weit verbreitet ist und praktisch die normale preisliche Ausgangssituation darstellt. Sowohl beim MIV wie auch beim ÖV wird vorgeschlagen, die Kilometerkosten distanzabhängig abzubilden.

Grundlegender Modellaufbau zur Ziel- und Moduswahl

Wahlentscheidungen von Verkehrsteilnehmenden zur Ziel- und Verkehrsmittelwahl sollten im NPVM, wie bisher, auf der Basis des Logit-Ansatzes modelliert werden. Bei nationalen Modellen empfiehlt es sich zudem Transformationen vorzunehmen, damit es bei weiten Reisedistanzen nicht zu unrealistischen Bewertungen aufgrund der konstanten Elastizität des Logit-Ansatzes kommt.

Bezüglich des Modelltyps analysiert der vorliegende Bericht wegebasierte² und kettenbasierte³ Modellansätze. Auf Basis einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile sowie einer Betrachtung der Erfahrungen mit grossen Modellanwendungen erfolgt die Empfehlung, auch für die nächste Modellgeneration des NPVM einen wegebasierten Ansatz zu wählen.

Zwischen Ziel- und Verkehrsmittelwahl besteht eine wechselseitige Abhängigkeit, so dass eine sequentielle Modellierung nicht sinnvoll ist. Daher sollte für das NPVM eine Modellstruktur mit simultaner Ziel- und Verkehrsmittelwahl gewählt werden. Des Weiteren wird empfohlen, einen Modellansatz anzuwenden, der quell- und zielseitig in der Lage ist, vorgegebene Randsummenbedingungen einzuhalten. Der Modellansatz sollte grundsätzlich offen und mit zusätzlichen Funktionalitäten erweiterbar sein. Mit Blick auf die empfohlene Segmentierung der Nachfrage sollte zudem das Potenzial genutzt werden, bei der Ziel- und Verkehrsmittelwahl personengruppen- und fahrtzweckspezifische Bewertungen einzuführen. Mit Hilfe unterschiedlicher Bewertungsfunktionen bzw. Parametersätzen soll gewährleistet sein, dass Verhaltensunterschiede in einzelnen Gebieten bzw. in Korridoren abbildbar sind. Somit kann neben den Eingangsdaten (z. B. Mobilitätsraten, Modal Split, Besetzungsgrad) auch das tatsächliche Verkehrsverhalten raumtypenfein (z. B. Verflechtungen zwischen Grossstädten) abgebildet werden.

Routenwahl

Routenwahlmodelle bilden den Verkehrsablauf bzw. Verkehrsbelastungen in einem Verkehrsnetz ab. Der MIV sollte mit einem stochastischen Gleichgewichtsverfahren umgelegt werden. Für den ÖV ist durch die Verwendung des HAFAS- oder Systemfahrplans die Verwendung eines fahrplanfeinen Umlegungsverfahrens gegeben. Beim ÖV wird die Problematik der Überlast beim Rollmaterial im Personenverkehr zukünftig an Bedeutung gewinnen, daher empfiehlt sich hier die Prüfung, inwiefern die ÖV-Auslastung im neuen NPVM abgebildet werden kann.

²Wegebasierte Verkehrsnachfragemodelle bestimmen die Ortsveränderungen zwischen zwei Verkehrszellen, ohne dabei den Kontext der einzelnen Ortsveränderung innerhalb der Wegeketten der betreffenden Personen zu berücksichtigen.

³ In kettenbasierten Verkehrsnachfragemodellen werden nicht einzelne Fahrten, sondern ganze Aktivitätenketten erzeugt, die eine Folge von Aktivitäten beschreiben (z. B.: W-A-E-W).

Résumé

Le Modèle national de transport de personnes (MNTP), géré depuis plusieurs années par un secrétariat ad hoc au sein du DETEC (VM-UVEK), a été établi sur la base du Microrecensement mobilité et transports (MRMT) de 2000. Les mises à jour 2005 et 2010 du MRMT ont permis d'actualiser le modèle MNTP. Mais à ce jour, ni le découpage des zones et du réseau ni les principes de base du modèle n'ont encore été modifiés.

Le microrecensement et le sondage sur les préférences déclarées (*stated preference*, SP) sont menés tous les cinq ans. Ils fournissent des informations essentielles pour la mise à jour du MNTP. Une profonde refonte du MNTP allant au-delà d'une simple mise à jour s'impose actuellement pour les raisons suivantes :

- Des composantes essentielles du modèle (découpage des zones et du réseau, principes de base du modèle) ne répondent plus aux exigences actuelles.
- La structure actuelle du modèle est limitée dans sa capacité à refléter certaines mesures (p. ex. réactions réelles à une variation du nombre de détenteurs d'abonnements généraux et d'abonnements demi-tarif).
- La segmentation du temps, de l'espace et de la demande théorique doit être adaptée à celle des modèles de l'offre et de la demande de transport utilisés à l'étranger.
- En raison de développements structurels survenus entre-temps, le modèle nécessite de très nombreux calculs de rééquilibrage (p. ex. extrapolations).
- Des éléments fondamentaux de la partie logicielle (p. ex. VISEVA) ne sont plus disponibles dans leur forme d'origine.

Pour remédier à ces problèmes de modélisation et poursuivre le bon développement du MNTP, l'ARE a mené une analyse des besoins auprès des offices fédéraux du DETEC pour déterminer les exigences auxquelles le futur MNTP devra répondre. Il en ressort que les exigences coïncident avec les objectifs formulés dans le mandat du VM-UVEK, que le degré de détail de l'actuel MNTP n'est pas suffisant pour répondre aux questions qui se poseront dans le futur et que certaines questions de politique des transports (coordination des modes de transport, enquêtes sur les goulets d'étranglement sur la route et le rail, tarification de la mobilité, p. ex.) gagneront en importance à l'avenir.

Une profonde refonte du MNTP s'impose donc aussi bien pour des raisons de technique de modélisation que pour répondre aux exigences futures. Le nouveau MNTP sera conçu de 2016 à 2019, pour servir ensuite notamment de base pour l'élaboration de la 4^e génération des programmes d'infrastructure STEP rail (OFT) et STEP route / PEB (OFROU).

Le présent rapport analyse les lacunes du modèle actuel et décrit les exigences que le modèle futur devra remplir. Les auteurs y formulent des recommandations sur la conception du modèle, la segmentation qu'il utilise, sa structure et sa cohérence, sur les coûts du choix de la destination, du mode de transport et de l'itinéraire et sur la précision des données d'input et d'output.

Conception du modèle

L'une des recommandations centrales issues des travaux est de développer le MNTP comme un modèle de transport macroscopique⁴ stratégique. Le MNTP continuera de suivre les étapes classiques d'un modèle à quatre niveaux, à savoir : le choix de l'activité, le choix de la destination, le choix du mode de transport et le choix de l'itinéraire. Il devrait à nouveau être construit pour représenter le trafic journalier ouvrable moyen (TJOM) et permettre ainsi, au niveau suisse, de tirer des conclusions sur l'évolution du trafic et, si possible et si nécessaire, d'établir des différenciations selon les espaces

⁴ Dans les modèles macroscopiques de la demande, toutes les personnes d'un segment se voient attribuer les mêmes paramètres de comportement en matière de mobilité. Une probabilité moyenne est ensuite déterminée à l'aide de ces paramètres pour chaque choix possible.

et les conditions techniques, par exemple pour évaluer des mesures d'infrastructure ou des politiques de prix. Grâce à un meilleur découpage des zones et à une segmentation plus fine de la demande de transport du MNTP, le niveau opérationnel et le niveau stratégique pourront être couplés plus fortement entre eux.

En ce qui concerne le choix des véhicules de transport à l'acquisition, le choix des abonnements TP (instruments de mobilité) et le développement des données structurelles (p. ex. choix des lieux de vie et de travail), il est recommandé de considérer ces aspects comme des modules séparés en amont du MNTP. Le choix de l'heure de départ ou les heures de pointe (pics du matin et du soir) devraient être considérés dans la modélisation comme des outils d'estimation de la demande du TJOM.

Segmentation territoriale, zones et offre de transport

L'actuel MNTP prévoit une zone de transport par commune, avec encore des différenciations plus poussées pour les dix plus grandes villes de Suisse (total de 2944 zones de transport intérieur). Du fait du nombre très variable d'habitants par zone de transport (moyenne de 2800 et maximum de 62 000), un déséquilibre des tailles déterminantes apparaît entre les zones de transport, ce qui peut entraîner des distorsions difficilement maîtrisables lors des approches gravitationnelles. Un zonage plus fin devrait résoudre ce problème et permettre d'atteindre une plus grande homogénéité spatiale dans la répartition des tailles des structures. En outre, il permet de travailler sur un trafic intrazonal réduit, de rattacher les zones au réseau d'une manière plus proche de la réalité et d'établir des matrices d'indicateurs plus précises. C'est pourquoi il est préconisé d'affiner et d'homogénéiser le découpage des zones, en particulier dans les agglomérations. Pour cela, il est certainement pertinent de se référer au découpage des modèles cantonaux. Une différenciation des zones pour l'étranger est également recommandée ; le calcul de la demande demeurera toutefois limité au territoire suisse.

Dans le domaine de l'offre de transport, il est proposé de constituer des réseaux de transport séparés pour les moyens de transport piéton (P), vélo (V), transports publics (TP) et trafic individuel motorisé (TIM). La structure des zones sera cependant identique pour tous les réseaux.

- Pour le réseau TIM, il convient de recourir à un réseau de navigation. Les attributs manquants seront complétés et le réseau routier subordonné sera défini en fonction de la structuration des zones et du concept de raccordement.
- La modélisation TP devrait, si possible, utiliser le réseau ferroviaire de l'OFT. Le but visé est de représenter le TP routier selon le découpage en zones et la base de données des arrêts TP sur un graphe de réseau TIM. Comme jusqu'à présent, c'est l'horaire HAFAS ou un horaire système qui reflétera l'offre de transport dans les TP. A cet égard, il faudrait peut-être envisager d'utiliser une occupation de certains systèmes de transport TP influant sur la demande.
- Le mode piéton et le vélo seront représentés dans un réseau combiné. Ce réseau pourrait découler du réseau TIM, mais il faudrait aussi vérifier s'il n'existe pas des bases plus appropriées (p. ex. modèle topographique du paysage [MTP] de swisstopo). Il n'est pas prévu de ventiler la demande de transport pour les modes de transport piéton et vélo.

Segmentation de la demande de transport

Dans les modèles macroscopiques, il est d'usage de différencier la demande de transport selon des catégories d'utilisateurs et des motifs de déplacement homogènes. Les adaptations suivantes sont recommandées :

- Subdivision des catégories d'utilisateurs Actifs occupés et du motif de déplacement Travail en «Simple» et «Qualifié»
- Subdivision des catégories d'utilisateurs Elèves en «élèves» et «étudiants» et du motif de déplacement Formation en «Ecole» et «Haute école»
- Subdivision du motif de déplacement Achats en «Besoins quotidiens» et «Achats occasionnels» (p. ex. mobilier, habillement, électronique, etc.)

- Subdivision du motif de déplacement Loisirs en «Courte distance», «Longue distance ou attraction spéciale»
- Subdivision à l'intérieur des catégories d'utilisateurs en voitures de tourisme (VT) et détention d'un abonnement TP, abonnement général (AG), abonnement demi-tarif (ADT) et abonnement d'une communauté tarifaire (ACT).

Contrairement à l'actuel MNTP, une distinction selon le choix de l'activité devrait être envisagée dans le cadre de l'élaboration du nouveau modèle. Des modèles de régression correspondants devraient tenir compte des différences de comportement selon les types d'espaces (p. ex. entre types de communes).

Influence des coûts sur le choix du mode de transport

En raison des exigences auxquelles devra répondre le MNTP, l'influence des coûts sur le choix du mode de transport devra être mieux représentée qu'aujourd'hui. Une modélisation des coûts à deux niveaux est proposée : l'acquisition d'instruments de mobilité dans une première étape et le choix du mode de transport sur la base des coûts kilométriques (en fonction de l'instrument de mobilité que la personne possède) dans une seconde étape. Cette approche permet une prise en compte séparée des coûts fixes au moment de l'acquisition et des coûts variables dans le choix du mode de transport. Par rapport à l'actuel MNTP, le nouveau modèle sera aussi élargi de manière à prendre explicitement en compte les communautés tarifaires dans la modélisation des TP.

Les instruments de mobilité TIM et TP s'acquiescent dans les faits selon une relation d'interdépendance. Pour la transposition dans le MNTP, il est recommandé de modéliser l'acquisition d'une VT et d'un instrument de mobilité TP de manière séquentielle, d'abord en fonction du type de ménage, de la catégorie de revenus et de la mobilité annuelle escomptée (pour la modélisation de l'acquisition d'une VT). Les instruments de mobilité TP seront ensuite modélisés, en fonction également de la qualité de l'offre TP locale.

Pour les voitures de tourisme, il est proposé d'opérer seulement une distinction entre deux catégories : «Pas de voiture» et «Voiture disponible». En raison de la structure plus complexe des TP, quatre catégories sont proposées : «Pas d'abo sauf ADT», «Communauté tarifaire centre», «Communauté tarifaire ensemble du réseau» et «AG». Pour les TP, il est conseillé de tenir compte d'une manière générale des prix ADT, parce que l'ADT est très répandu en Suisse et qu'il reflète le contexte initial normal en matière de prix. Tant pour le TIM que pour les TP, il est proposé de représenter les coûts kilométriques en fonction des distances parcourues.

Modélisation du choix de la destination et du mode de transport

Les décisions des usagers des transports concernant le choix de la destination et celui du mode de transport devrait continuer à être modélisées dans un modèle «logit». Pour les modèles nationaux en outre, des adaptations sont recommandées afin d'éviter, pour les longues distances, des évaluations irréalistes dues à l'élasticité constante du modèle.

En ce qui concerne le type de modélisation, le présent rapport analyse des modèles basés sur des trajets⁵ et des modèles basés sur des chaînes de déplacement⁶. Après comparaison des avantages et des inconvénients et analyse des expériences réalisées avec des applications à large échelle, un modèle basé sur des trajets, comme l'actuel, reste préconisé pour le prochain MNTP.

En raison de l'interdépendance qui existe entre le choix de la destination et le choix du mode de transport, une modélisation séquentielle ne s'avère pas pertinente. Par conséquent, il faudrait choisir

⁵ Les modèles de la demande de transport basées sur des trajets déterminent les variations de lieux entre deux cellules de transport sans tenir compte du contexte entourant la modification de lieu dans les chaînes de déplacement des personnes concernées.

⁶ Les modèles de la demande de transport basées sur des chaînes de déplacement génèrent non pas des trajets simples, mais des chaînes entières d'activités qui décrivent une succession d'activités (p. ex. D-T-A-D).

une structure de modèle prévoyant un choix simultané de la destination et du mode de transport. Il est également recommandé d'utiliser un modèle qui met en relation les départs et les arrivées et qui est en mesure de respecter les distributions marginales. Le modèle devrait être ouvert et pouvoir intégrer des fonctions supplémentaires. Du fait de la segmentation recommandée de la demande, il faudrait par ailleurs saisir l'occasion d'introduire, pour le choix de la destination et du mode de transport, des évaluations par catégories d'usagers et par motifs de déplacement. Différentes fonctions d'évaluation et différents groupes de paramètres permettront d'illustrer des différences de comportement dans des territoires donnés voire des corridors. Il sera ainsi possible de représenter non seulement les données de départ (p. ex. taux de mobilité, répartition modale, taux d'occupation), mais aussi le comportement effectif (p. ex. enchevêtrements entre grandes villes) à l'échelon des types d'espace.

Choix de l'itinéraire

Les modèles sur le choix de l'itinéraire représentent le déroulement du trafic ou les charges de trafic sur un réseau de transport. Le TIM devrait être modélisé selon une approche d'équilibre stochastique. Pour les TP, l'utilisation de HAFAS ou d'un horaire système entraîne l'utilisation d'un processus de ventilation à l'échelle de l'horaire. Dans le transport de voyageurs TP, le problème de la surcharge du matériel roulant s'accentuera. Par conséquent, il est recommandé d'examiner comment le nouveau MNTP pourrait représenter l'occupation des TP.

1. Ausgangslage und Auftrag

Die Geschäftsstelle der Verkehrsmodellierung im UVEK (VM-UVEK) betreibt seit mehreren Jahren das Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM). Das aktuell gültige NPVM basiert ursprünglich auf dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) 2000. Mit Verfügbarkeit der Daten des MZMV 2005 sowie später des MZMV 2010 wurden Aktualisierungen des Modells vorgenommen. Bei beiden Aktualisierungen wurden weder die Zonen- und Netzstrukturen noch die Modellansätze erneuert.

Der MZMV und die Stated Preference (SP)-Befragung werden alle fünf Jahre durchgeführt und bilden eine wesentliche Grundlage für die Aktualisierung des NPVM. Folgende Gründe sprechen aktuell für eine über eine Aktualisierung hinaus gehende grundlegende Erneuerung des NPVM:

- Wesentliche Modellkomponenten (Zonen- und Netzstrukturen und Modellansätze) entsprechen nicht mehr den heutigen Anforderungen.
- Die gegenwärtige Modellstruktur kann mehrere Massnahmen nur bedingt abbilden (z. B. tatsächliche Reaktionen auf Veränderungen im Besitz von General- und Halbtaxabonnements).
- Die zeitlichen, räumlichen und nachfragetheoretischen Segmentierungen sind dem aktuellen internationalen Stand der Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung anzupassen.
- Das Modell benötigt durch gewachsene Strukturen sehr viele Ausgleichsrechnungen (z. B. Hochrechnung).
- Grundlegende Softwarekomponenten (z. B. VISEVA) stehen nicht mehr in der ursprünglichen Form zur Verfügung.

Um neben den aufgezeigten modelltechnischen Defiziten die Weiterentwicklung des NPVM zielführend durchführen zu können, wurde vom ARE bei den Bundesämtern des UVEK eine Bedürfnisanalyse zu den zukünftigen Anforderungen an das NPVM durchgeführt. Die Anforderungen stimmen mit den im Mandat des VM-UVEK formulierten Zielsetzungen überein. Es zeigt sich auch, dass aufgrund der zukünftigen Fragestellungen der räumliche Detaillierungsgrad des bestehenden NPVM nicht ausreichend ist und dass verkehrspolitische Fragestellungen wie die Abstimmung der Verkehrsträger, Engpassuntersuchungen auf der Strasse und der Schiene sowie Mobility Pricing zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Sowohl aus modelltechnischer Sicht wie auch aufgrund der zukünftigen Anforderungen ist eine grundlegende Erneuerung des bestehenden NPVM somit nötig. Das neue Modell soll in den Jahren 2016 bis 2019 etabliert werden und unter anderem als Grundlage für die Erarbeitung der vierten Generation der Infrastrukturprogramme STEP Schiene (BAV) und STEP Strasse / PEB (ASTRA) dienen.

Der vorliegende Bericht soll sowohl auf die modelltechnischen Defizite wie auch auf die zukünftigen Herausforderungen bei der praktischen Nutzung des NPVM eingehen. Innerhalb des Projektes wurde ein geschichteter Entscheidungsablauf in Form von vergleichenden Dokumenten, Informationen, Erklärungen und Empfehlungen erarbeitet. Diese Empfehlungen haben Auswirkungen auf die nächsttiefer gelegenen Merkmalsvergleiche der möglichen Modelle. Dadurch wird erreicht, dass in fachlich sinnvoller Reihenfolge (von der generellen Aufgabenstellung bzw. Erwartungshaltung bis hinunter zu feingliedrigen Modellierungsdetails) fachlich richtige Entscheidungen getroffen werden können. Ausserdem ist der dadurch entstehende Entscheidungsbaum transparent und lässt auch eventuell später auftretende notwendige Rücksprünge zu. Dazu werden Empfehlungen auf den Ebenen grundlegendes Modelldesign, grundlegende Segmentierung, Modellaufbau und -konsistenz, Kosten der Ziel-, Modus- und Routenwahl⁷ und Genauigkeit der Ein- und Ausgangsdaten getroffen.

⁷ Obwohl der Punkt „Kosten der Ziel-, Modus- und Routenwahl“ in allen vier anderen Punkten (grundlegendes Modelldesign, grundlegende Segmentierung, Modellaufbau und -konsistenz und Genauigkeit der Ein- und Ausgangsdaten) aufgeht, soll er aufgrund seiner Wichtigkeit hier explizit betrachtet werden.

2. Grundlegendes Modelldesign

Verkehrsnachfragemodelle haben die Aufgabe, bestehende Zustände zu untersuchen und die Wirkungen von geplanten Massnahmen, aber auch von externen Entwicklungen (z. B. Bevölkerungsentwicklung, Kostenentwicklung etc.), zu ermitteln. Zur Lösung dieser Aufgabe stehen grundsätzlich die empirische Erhebung und die modellbasierte Berechnung zur Verfügung. In Zusammenhang mit diesen Daten werden Modelle entwickelt, die eine realitätsnahe, logische Abbildung der Abläufe und Wirkungszusammenhänge ermöglichen. Verkehrsmodelle stellen somit, wie alle Modelle, eine zweckbezogene Abstraktion der realen Welt dar. [Quelle: Friedrich M., Schiller C., 2015]

Für Verkehrsplanungen sind Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodelle, welche der Annahme einer Kausalkette Bedürfnis - Aktivitätenbedarf - Aktivitätennachfrage - Ortsveränderung obliegen, entscheidende Kernpunkte. Für den Personenverkehr bilden die Modelle diese Kausalkette dadurch ab, dass sie wesentliche Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden in einzelnen Teilmodellen modellieren.

Um das NPVM weiter zu entwickeln, ist es zunächst notwendig, die unterschiedlichen grundlegenden Modelleigenschaften und -verwendungen zu betrachten. Daraus folgend werden für die Weiterentwicklung die generell notwendigen Modellstrukturen vorgestellt. Speziell dazu werden die drei folgenden Punkte untersucht:

- grundlegende Anwendungsziele des ARE und anderer Anwender (in Vergangenheit und Zukunft);
- grundlegende Modellansätze (Wahlentscheidungen, Aggregationsgrad sowie Theorien und Massnahmensensitivität);
- grundlegende Hard- und Softwareanforderungen.

2.1. Grundlegende Anwendungsziele des ARE bzw. Vereinbarkeit mit den Anforderungen anderer Anwender

Die Geschäftsstelle der Verkehrsmodellierung im UVEK (VM-UVEK) betreibt das hier betrachtete Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM). Dieses Modell wird für die Erarbeitung der Schweizerischen Verkehrsperspektiven genutzt, die wiederum eine wesentliche Grundlage für die Infrastrukturprogramme Schiene und Strasse und die Energieperspektiven sind. Darüber hinaus werden die Modellergebnisse für Untersuchungen zu Lärm- und Luftschadstoffemissionen auf der Strasse benötigt und es werden strategische Modellberechnungen für Varianten der räumlichen Verteilung von Arbeitsplätzen und Bevölkerung und unterschiedliche Verkehrsangebote im MIV und ÖV durchgeführt (siehe Tabelle 1). Ebenso werden für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und den öffentlichen Verkehr (ÖV) alle Modellzustände des durchschnittlichen Werktagverkehrs (DWV), des durchschnittlichen Tagesverkehrs (DTV), der Spitzenstunden am Abend (ASP) und am Morgen (MSP) vorgehalten.

Die Kantone verwenden das NPVM zur Abbildung des Aussenverkehrs in den kantonalen Verkehrsmodellen. Ein weiterer wichtiger Anwenderkreis betrifft private Planungsbüros, die regelmässig auf Modellzustände des NPVM zugreifen. Die nachstehende Tabelle 1 fasst die Anwendungsschwerpunkte bzw. Nutzer zusammen.

Anwendungsschwerpunkte / Nutzer	DWV	ASP/ MSP	DTV	PV / GV	MIV, OV, LV	Eckwerte / Strecken
Verkehrsperspektiven, ARE	x		x	PV / GV	MIV, ÖV	Nat. Eckwerte
Strategische Modellberechnungen, ARE	x			PV	MIV, ÖV	Strecken
Raumkonzept, ARE	x			PV	MIV, ÖV	Strecken
Belastungskarten, ARE			x	PV, GV	MIV, ÖV	Strecken
PEB, ASTRA	x	x		PV / GV	MIV	Strecken
Ausbauprojekte, ASTRA	x	x		PV / GV	MIV	Strecken
Lärmsanierung, ASTRA			x	PV / GV	MIV	Strecken
MinVV (Def. Hauptstrassen), ASTRA	x		x	PV/GV	MIV	Strecken
STEP, BAV	x	x		PV	ÖV	Strecken
Energieperspektiven, BFE			x	PV, GV	MIV, ÖV	Nat. Eckwerte
Lärm- Luft, BAFU			x	PV, GV	MIV	Strecken
Kantone	x	x	x	PV, GV	MIV, ÖV	Teilnetze

Tabelle 1: Bisherige Anwendungsschwerpunkte des NPVM**[Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2104]**

Mit Blick auf die Anwendungsschwerpunkte des NPVM wird deutlich, dass ein Bedarf nach einem langfristig arbeitenden, strategischen Verkehrsanalyse- und Verkehrsprognosemodell besteht. Dieses Modell muss es mindestens ermöglichen, auf der schweizerischen Ebene fundierte Aussagen zur Verkehrsentwicklung zu treffen und gleichzeitig Ergebnisse bzw. Eingangsdaten für andere Modelle bereitzustellen. Somit ist das NPVM ein klassischer Anwendungsfall eines strategischen Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodells. Es wird eingesetzt, um vorhandene Zustände in einem Verkehrsnetz zu rekonstruieren und die Wirkungen zukünftiger Entwicklungen (z. B. Bevölkerungszunahme, Preisveränderungen etc.) und geplanter verkehrlicher Massnahmen (z. B.: Mobility Pricing) abzuschätzen.

Der Planungshorizont kann sich dabei auf unterschiedliche Zeitpunkte beziehen. So können bei der Planung grosser Infrastrukturmassnahmen die Prognosehorizonte der mittleren Wirkungen bei mehreren Jahren, eventuell Jahrzehnten liegen. Bei operativen Modellen (z. B. Verkehrssteuerung) interessiert im Gegensatz dazu kein mittlerer Zustand. Hier sollen – im Gegensatz zum NPVM – verschiedene Abweichungen vom Mittelwert modelliert und prognostiziert werden, deren Zeitpunkt oft nur wenige Stunden oder Minuten entfernt liegt.

Von Seiten des ARE als auch von Seiten der oben genannten Anwender sind Bedarfe an ein weiterentwickeltes NPVM formuliert worden. Diese sind nach strategischer (= langfristig) und operativer Planung (= kurz- bis mittelfristig) in Tabelle 2 unterteilt worden.

Strategische Planung	Operative Planung
Verkehrsangebotsmodell	
verfeinerte Zonen- und Netzstrukturen	VISSIM-Import
Beachtung von ÖV-Auslastungsgraden	Leistungsbetrachtungen an Autobahnknoten
Verwendung der Datenmodelle „Schienennetz“ und „Haltstellen“	Optimierung des Verkehrsflusses auf Nationalstrassen und deren Anschlussbereichen
Untergliederung des Langsamverkehrs (LV) in Velo und zu Fuss	genauere Informationen zu Stauzeiten
Möglichkeit der Abstimmung der Massnahmen Strasse und Schiene	
Verkehrsnachfragemodell (Eingangsdaten)	
Strukturdaten für kantonale Modelle und das NPVM standardisieren	
Abbildung des Aussenverkehrs für kantonale Modelle	
Abbildung der Mobilitätswerkzeuge (auch mit regionalen ÖV-Abonnements)	
Prognosemodell für die Zusammensetzung des Personenwagens (PW)-Bestands	
Verkehrsnachfragemodell (Modelltheorie)	
detailliertere Modellierung der Zusammenhänge zwischen Siedlung und Verkehr	
Verkehrsbelastungen insbesondere in den Städten und Agglomerationen	
Abbildung der Wirkung von unterschiedlichen Preisen und Preisstrukturen	
Modellierung von Massnahmen zum Brechen von Verkehrsspitzen	
Modellierung von Mobility Pricing-Varianten	
Verkehrsnachfragemodell (Auswertungen)	
mit den Kantonen abgestimmte Validierungsgrundlagen	
detailliertere Verkehrsanalysen (Erreichbarkeiten, Verkehrsleistungen, Wechselwirkungen zwischen Kernstädten, Agglomerationen und ländlichem Raum)	
detailliertere Verkehrsanalysen für einzelne Korridore, Teilräume, Agglomerationen	
Vergleich Regionalverkehr / Fernverkehr für STEP	

Tabelle 2: Anforderungen der Anwender an ein neues NPVM differenziert nach strategischer und operativer Planung [Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2104]

Bei der Auswertung der Tabelle ist sehr gut zu erkennen, dass auch die Bedarfe, bis auf wenige Ausnahmen, in die Richtung eines strategischen Verkehrsnachfragemodells gehen. Durch eine höhere räumliche Detaillierung des NPVM soll jedoch auch eine stärkere Verknüpfung zwischen der operativen und der strategischen Ebene möglich sein.

Empfehlung für die grundlegenden Anwendungsziele: Das NPVM sollte ein strategisches Verkehrsmodell bleiben, welches auf der schweizerischen Ebene differenzierte und soweit sinnvoll feingliedrige Aussagen zur Verkehrsentwicklung zulässt. Es liefert ausserdem Ergebnisse bzw. Eingangsdaten für andere Modelle. Es zielt nicht auf einen Einsatz in der operativen Modellierung.

2.2. Grundlegende Modellansätze / Wahlentscheidungen

Menschen treffen eine Vielzahl von lang- bis kurzfristigen Entscheidungen, die ihr Mobilitätsverhalten und damit den Verkehr im Verkehrsnetz beeinflussen. Langfristige Entscheidungen betreffen beispielsweise die Wahl des Wohnorts, die Wahl des Arbeitsplatzes oder die Entscheidung, ein Fahrzeug anzuschaffen. Entscheidungen über die Aktivitätenfolge und die Aktivitätenorte eines Tages, über die Wahl der Abfahrtszeit und der Fahrtroute werden dagegen mittel- bis kurzfristig getroffen. In noch kürzeren Zeitabständen wird über die Wahl der Fahrtgeschwindigkeit, die Wahl des Fahrstreifens auf der Autobahn und die Wahl des Abstands zum Vorderfahrzeug entschieden. Es ist offensichtlich, dass die Entscheidungen voneinander abhängig sein können und daher nicht immer sequentiell getroffen werden.

Grundlegend werden in der gesamten Breite der Verkehrsnachfragemodellierung folgende Wahlentscheidungen modelliert:

- Standortwahl;
- Beschaffungswahl für Fahrzeuge bzw. ÖV-Zeitfahrkarten;
- Aktivitätenwahl, Zielwahl, Moduswahl, Routenwahl (Verkehrsmittelwahl);
- Abfahrtszeitwahl;
- Geschwindigkeitswahl;
- Fahrstreifenwahl;
- Fahrzeugfolgeabstandswahl.

Die Punkte Beschaffungswahl für Fahrzeuge bzw. ÖV-Zeitfahrkarten (sowie ggf. Standortwahl) sind als separate, vorgeschaltete Modellbausteine des NPVM zu betrachten. Sie liefern äusserst wichtige Eingangsdaten für die Verkehrsmodellierung, werden aber als ökonomisch-perspektivische Entscheidungen ausserhalb der klassischen Verkehrsnachfragemodellierung behandelt. Unter der Prämisse, dass das neue NPVM als strategisches Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell aufgestellt werden soll, sind die Punkte Geschwindigkeitswahl, Fahrstreifenwahl und Fahrzeugfolgeabstandswahl ebenfalls nicht in die Modellierung einzubeziehen.

2.3. Vertiefung Abfahrtszeitwahl

Weniger eindeutig ist der Umgang mit der Abfahrtszeitwahl. Hier ist die Frage zu stellen, inwieweit eine Integration dieser Entscheidung in die Modellierung der Verkehrsnachfrage sinnvoll ist. Alternativ zur Integration steht die Möglichkeit, diesen Entscheidungsprozess den eigentlichen Kernentscheidungen der Verkehrsnachfragemodellierung nachzuschalten.

Der Nutzen für das Wechseln der Abfahrtszeit besteht in der Zeitersparnis. Gleichzeitig gibt es einen Nutzen für das Beibehalten der Abfahrtszeit, der oft durch sehr starke soziale, gesellschaftliche und berufliche Zwänge genährt wird. Es gilt die Annahme, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen der grösste Nutzen bei der Wahl der üblichen Abfahrtszeit erzielt wird. Eine Veränderung der Abfahrtszeit würde somit den Nutzen verringern, welcher nur durch Reisezeitgewinn wieder kompensiert werden könnte. Um diese Problematik abzubilden, braucht es daher ein Modell, welches den o.g. Kontext bei der Abfahrtszeitwahl abbildet und gleichzeitig vollständig und konsistent sehr feine Zeitscheiben modelliert. Diesbezüglich wird dieser Punkt hier vertieft behandelt.

Die Beeinflussung der Abfahrtszeitwahl (z. B. durch Mobility Pricing) geht von der Annahme aus, dass bei gegebener Flexibilität die zu erwartende Kostenersparnis (oder Reisezeitersparnis) einen signifikanten Einfluss auf die Abfahrtszeitwahl hat. Diese Annahme stützt sich auf Beobachtungen geänderter Verkehrsnachfrage bei verkehrlichen Situationen. Neben den zu erwartenden Ersparnissen sind die persönlichen Präferenzen und Routinen, zum Beispiel in Bezug auf das morgendliche Aufstehen, ein massgebender Faktor für die Wahl der Abfahrtszeit.

Das bedeutet auch, je kleiner die zeitliche Verschiebung der Abfahrtszeit ausfällt, umso grösser ist die Bereitschaft, die Verschiebung zu akzeptieren. Gleichzeitig ist erkennbar, dass auch die Richtung der zeitlichen Verschiebung eine Rolle spielt. Es ist weiterhin zu beachten, dass Verkehrsteilnehmer es eher akzeptieren, etwas später als früher loszufahren. Bei späterer Abfahrtszeit und einer damit verbundenen Zeiteinsparung kommt der Verkehrsteilnehmer in etwa zur gleichen Zeit am Ziel an. Liegt die Abfahrtszeit früher und kommt dazu noch eine Zeiteinsparung, so entfernt er sich immer weiter vom ursprünglichen Eintreffenszeitpunkt am Ziel. Ebenfalls hat die Zuverlässigkeit der avisierten Zeiteinsparung Auswirkungen auf die Bereitschaft, die Abfahrtszeit zu wechseln. Mit zunehmender Sicherheit, dass die avisierte Zeiteinsparung mit dem Verschieben der Abfahrtszeit auch tatsächlich realisiert werden kann, steigt auch die Bereitschaft, die Abfahrtszeit zu verschieben. Dies wird zum Beispiel im Forschungsprojekt wiki (Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen) deutlich [Quelle: Deutsches Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011].

Diese Punkte beachtend müsste das Wahlmodell folgende Attribute der Entscheidung zur Änderungen der Abfahrtszeit abbilden können und gleichzeitig über die dazu notwendigen Daten als entsprechende Eingangsgrössen verfügen:

- Zeit, um welche die Abfahrtszeit verschoben werden soll;
- damit verbundene Einsparung an Reisezeit (allein um diesen Punkt zu modellieren, müsste zeitscheibenfein die Fahrzeit für die kommenden Zeitscheiben ermittelt werden können, was langwierige iterative Rückkopplungen nach sich ziehen würde, wenn dies überhaupt gelänge);
- Zuverlässigkeit, mit der diese Reisezeitverringerung erreicht wird;
- übliche Dauer des Weges des Probanden;
- habitualisierte Abfahrtszeit.

Da die beschriebenen Zusammenhänge und Wegeketten der privaten und beruflichen terminlichen Verpflichtungen, welche einen massgeblichen Einfluss auf die zeitliche Flexibilität haben, individuell äusserst unterschiedlich über den Tag verteilt sind, gibt es dazu bis dato keine verwendbaren Untersuchungen. Weder zum Daten- noch zum Modell- oder Parameterkomplex.

So bräuchte es ein Modell, welches den o.g. Kontext bei der Abfahrtszeitwahl abbildet und gleichzeitig vollständig und konsistent sehr feine Zeitscheiben modelliert. Diese Zeitscheibenmodellierung würde innerhalb der Angebotsmodellierung notwendig werden. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass z.B. ein Mobility Pricing zeitscheibenfein eingeführt werden könnte und sich somit auch die Aufwände (auch ohne Verkehrsbelastung) ändern. Zusätzlich müssten zeitlich beschränkte Geschwindigkeitsbegrenzungen, zeitliche Restriktionen bezogen auf einzelne verhaltenshomogene Gruppen etc. aufgenommen werden. Diese Punkte führen zu multiplen Angebotsmodellen, die mit hohen zeitlichen und finanziellen Anforderungen einhergehen. Werden diese multiplen Angebotsmodelle erstellt, müsste auch die Nachfrageseite entsprechend angepasst werden. Grundsätzlich dürfte nicht nur die Abfahrtszeitwahlberechnung zeitscheibenfein und unterteilt in verhaltenshomogene Gruppen erfolgen, sondern auch grundlegend die Aktivitäten-, Ziel-, Modus- und Routenwahl.

Bereits in der Aktivitätenwahl müssten die Anteilswerte der entsprechenden Tagesganglinien der verhaltenshomogenen Gruppen der tagesbezogenen Verkehrs- und Verhaltensdaten ermittelt werden. Dabei ist auch zu beachten, dass einige Gruppen zweiseitige Tagesganglinien (z. B. Schichtarbeiter) verlangen. Des Weiteren könnte das Zeitscheibenmass aus der Abfahrtszeitwahl nicht eins zu eins

übernommen werden. Hier würde die zeitliche Ausdehnung einer Zeitscheibe so bestimmt werden müssen, dass in ihr mindestens ein fest zu definierender Teil aller Fahrten beginnt und endet. Dies betrachtet noch nicht die Problematik der sehr unterschiedlichen Reisezeiten in einem nationalen Verkehrsmodell oder die zeitlich überhängender Fahrten, bei der die Datenverfügbarkeit in vielen Punkten zu bezweifeln ist.

Ebenso müssten zeitscheibenfeine Ziel-, Modus- und Routenwahleffekte modelliert werden, denn die zeitlichen Verdrängungen beeinflussen die genannten Wahlen teilweise oder gänzlich. Allein für die Ziel- und Moduswahl würde eine nur theoretisch zu beherrschende Problematik bzgl. der notwendigen Randsummenbedingungen und Matrixbilanzierungen entstehen. So müssten z. B. Pflichtziele beibehalten werden, substituierbare Ziele nicht, Modi dürften geändert werden, insofern dies zum familiären, beruflichen und habitualisierten Kontext passt etc. Zusätzlich müssten alle Parameterschätzungen in Verbindung mit der zeitscheibenfeinen Problematik der Abfahrtszeitwahl durchgeführt werden.

Letztlich müsste zur Berücksichtigung zeitabhängiger Streckenaufwände der verwendete Wegesuchalgorithmus modifiziert werden. Da Streckenaufwände in jedem Zeitintervall unterschiedlich sein können, muss der Algorithmus sicherstellen, dass ein später abfahrendes Fahrzeug nicht vor einem früher abgefahrenen Fahrzeug am Ziel ankommt, bedingt durch die eingesparte Reisezeit (FIFO-Bedingung, first in, first out). Um die FIFO-Bedingung nicht zu verletzen, ist eine permanente Prognose aller Zeitscheiben erforderlich, obwohl diese gerade erst berechnet werden sollen.

Das Genannte lässt die Schlussfolgerung zu, von einer integrierten Modellierung der Abfahrtszeitwahl im NPVM abzusehen. Der Komplexitätsgrad der Modellierung steigt signifikant, die Handhabbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Modells sinkt, zudem ist nicht zu belegen, dass der zusätzliche Aufwand in einem vertretbaren Verhältnis zum entstehenden Nutzen steht. Alternativ besteht die Möglichkeit die Abfahrtszeitwahl vereinfacht der Nachfrageberechnung nachzuschalten. Weitere Ausführungen zu dieser Möglichkeit finden sich in Kapitel 6.8.

Empfehlung für die zu modellierenden Wahlentscheidungen: Das NPVM sollte die Schritte Aktivitätenwahl, Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl modellieren. Darüber hinaus sind Modelle der Standort- sowie der Beschaffungswahl für Fahrzeuge und ÖV-Zeitfahrkarten dem NPVM vorzuschalten. Weiterhin sollte es die Schritte Abfahrtszeitwahl und Spitzenstundenmodellierung als „Abschätzungswerkzeuge“ nachschalten.

2.4. Grundlegende Modellansätze / Aggregationsgrad

Bei der Betrachtung des Aggregationsgrades eines Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodells wird sehr oft das Begriffspaar makroskopisch und mikroskopisch genutzt. Makroskopische Modelle verwenden aggregierte Objekte, die Objekte der „realen Welt“ zusammenfassen und vereinheitlichen. Mikroskopische Modelle versuchen die Objekte der „realen Welt“ direkt abzubilden.

Generell können alle Ebenen der zu modellierenden Wahlentscheidungen, also Aktivitäten-, Ziel-, Modus-, Routen-, Standort- sowie der Beschaffungswahl für Fahrzeuge bzw. ÖV-Zeitfahrkarten, mikroskopisch als auch makroskopisch modelliert bzw. simuliert werden. Die nachfolgende Auflistung zeigt die Unterschiede einer makroskopischen und einer mikroskopischen Betrachtungsweise.

Mikroskopische Nachfragemodelle (z. B. TRANSIMS, MATSim-T, TAPAS, STARCHILD etc.) modellieren die Entscheidungsprozesse einzelner Individuen (sog. Agenten). Dabei kann beispielsweise der Haushaltskontext (wer nutzt das Auto des Haushalts) berücksichtigt werden. Die Agenten besitzen ein Gedächtnis und können im Laufe der Simulation aus ihren Erfahrungen lernen. Alternativen für z. B. Kombinationen aus Zielen und Verkehrsmitteln werden von den Personen entsprechend ihrer zufällig gezogenen Wahlwahrscheinlichkeit akzeptiert oder abgelehnt. Ortsveränderungen werden

immer von Personen durchgeführt und können an beliebigen Punkten im Netz (Gebäudeadresse) beginnen und enden. Ergebnis eines mikroskopischen Nachfragemodells sind Zeit-Weg-Trajektorien einzelner Personen, d.h. sie liefern den Standort jeder Person zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten, ist eine Vielzahl von Simulationsläufen erforderlich. Bei makroskopischen Nachfragemodellen hingegen haben alle Personen eines Nachfragesegments gleiche Verhaltensparameter für das Mobilitätsverhalten. Mit diesen Parametern wird für jede Alternative eine mittlere Wahlwahrscheinlichkeit bestimmt. Ortsveränderungen können deshalb auch von nicht ganzzahligen Personenmengen durchgeführt werden, welche in Verkehrszellen beginnen und enden. Das Ergebnis sind Verkehrsströme im Netz. Die nachstehende Tabelle 4 gibt einen Überblick über Vor- und Nachteile makro- und mikroskopischer Modellierungen.

Objekte der realen Welt	Makroskopische Betrachtungsweise	Mikroskopische Betrachtungsweise
Standorte von Nutzungen	Verkehrszelle	Gebäude
Verkehrsteilnehmer	Personengruppen	Haushalte mit Einzelpersonen
Fahrzeuge	Fahrzeugklassen	Einzelfahrzeuge
Kreuzung	Knoten mit Abbiegewiderständen	Fahrstreifen, Lichtsignalanlagen mit Signalprogrammen
Strecke	Kante mit zulässiger Geschwindigkeit und Kapazität	Kante mit zulässigen Geschwindigkeiten, Fahrstreifen, Überholverbieten
Haltestelle	Ein Objekt für alle Fahrtrichtungen, das mitten auf der Kreuzung oder Strecke liegt	Haltestelle mit allen Haltepunkten und Bahnsteigen
Darstellung von Verkehrszuständen	Geschwindigkeiten und Dichten pro Fahrzeugklasse auf einer Strecke oder einem Streckenabschnitt	Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Einzelfahrzeuges

Tabelle 3: Makroskopische und mikroskopische Betrachtungsweise

	mikroskopische Simulation	makroskopische Modellierung
Stärken	– sekundengenaue Betrachtung der Einzelobjekte mit subjektiven Merkmalen – synthetische Erstellung einer Bevölkerung (Personen mit Haushaltskontext) anhand statistischer Daten und ihre Erweiterung um zusätzliche Attribute (Pkw-Besitz, Zeitkartenbesitz, Mobilitätsbudget etc.) – Tageszusammenhang der Ortsveränderungen über alle Wahlentscheidungen (inkl. z. B. der Abstimmung im Haushalt) – Feine Abbildung von Aufwänden – Möglichkeit einer kantenbezogenen, fahrzeugfeinen Betrachtung (z. B. für Emissionsberechnungen) – Abbildung von Massnahmen im kleinräumigen Kontext	– Datenverfügbarkeit auf Mittelwertbasis weitreichend gegeben – erprobte und fundierte Modelltheorien für strategische Modelle inkl. der Kalibrationsprozeduren – können strategisch wichtige Sachverhalte modellieren und prognostizieren (raumstrukturelle Zwänge, Modal-Split-Verschiebungen etc.) – Gleichgewichtszustand ist definiert und wird i.d.R. erreicht – „verwischt“ durch mittlere Werte oft kleinere Fehler

	mikroskopische Simulation	makroskopische Modellierung
Schwächen	– stellen hinsichtlich ihres Detaillierungsgrades teilweise extrem hohe Anforderungen an die Datenverfügbarkeit (z. B: Zeitwahl, Personeneigenschaften, Abhängigkeiten im Haushalt etc.) – Untersuchung ländlicher Gebiete mit geringer Dichte schwierig, da ungenügende Datenverfügbarkeit (grosse Zellen, ungenaue Verortungen, hoher Aufwand bei der Bereitstellung detaillierter Angebotsinformationen) – bis auf sehr wenige Ausnahmen besitzen alle Modelle grosse Schwächen bei der Zielwahl (z. B. bei der Berücksichtigung raumstruktureller Zwänge und Randsummenbedingungen) und Moduswahl (Modal-Split-Kalibrierung über Anpassung empirischer Verhaltensparameter) – grösstenteils nicht prognosefähig – sehr viele Rechendurchläufe sind notwendig bis zum Erreichen eines statistisch stabilen Zustandes – bis dato noch nie vollständig landesweit in Europa auf strategischer Ebene eingesetzt	– keine differenzierte zeitliche Betrachtung der Einzelobjekte mit subjektiven Merkmalen → alle Personen eines Nachfragesegments besitzen gleiche Verhaltensparameter – Einschränkungen bei der Bestimmung der Aufwände – Abbildung von komplexen Entscheidungen begrenzt, im Besonderen die familiäre Interaktion – Tageszusammenhang der Ortsveränderungen nur über Wegekettenmodelle, jedoch wiss. ungenauer – keine fahrzeugfeinen Betrachtungen möglich – keine Abbildung von Massnahmen im kleinräumigen Kontext

Tabelle 4: Vor- und Nachteile makroskopischer und mikroskopischer Betrachtungsweisen

Empfehlung für die Aggregationsgrade: Bei Abwägen der o.g. Vor- und Nachteile sollte das NPVM, welches die Schritte Aktivitätenwahl, Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl modelliert, einen makroskopischen Ansatz wählen. Ebenso sollten die vorgeschalteten Modelle der Standort- sowie der Beschaffungswahl für Fahrzeuge bzw. ÖV-Zeitfahrkarten auf makroskopischer Basis stattfinden bzw. einen Aggregationscode bereitstellen.

Eventuell ist zu prüfen, ob ergänzend die Ermittlung der Aufwände und die Umlegung auf mesoskopischer oder mikroskopischer Basis bessere Ergebnisse liefern. Die eventuell genauer abgebildeten Kenngrössenmatrizen und das differenziertere Belastungsbild nach der Umlegung können von Vorteil sein. Dabei ist jedoch das Kosten-Nutzen-Verhältnis bzw. die Praktikabilität dringend zu beachten.

3. Räumliche Segmentierung

Die räumliche Segmentierung legt die Grösse der Quell- und Zielorte von Ortsveränderungen und somit nachfolgend auch den Detailierungsgrad des Verkehrsnetzes fest. Diese Quell- und Zielorte werden als Verkehrszellen, d.h. als flächige Objekte, abgebildet, welche die Lage von Orten, Teilorten und Nutzungen beschreiben. Die Zahl und die Grösse der Verkehrszellen hängen dabei von der Grösse und der Heterogenität des Untersuchungsgebietes ab.

3.1. Räumliche Segmentierung der Schweiz

Typische Verkehrsmodelle besitzen ca. 500 bis 2.000 Verkehrszellen, grosse Verkehrsmodelle über 10.000 Zellen. Bei nationalen Modellen sind i.d.R. Gemeinden oder Zusammenschlüsse von Gemeinden übliche Einheiten für Verkehrszellen. Im Fall von z. B. Deutschland repräsentiert eine Verkehrszelle dann 10.000 bis 100.000 Einwohner. Bei regionalen und städtischen Modellen sind Verkehrszellen auf der Ebene von Teilgemeinden, Stadtbezirken oder Baublöcken üblich, so dass auf eine Verkehrszelle 500 bis 5.000 Einwohnerinnen und Einwohner entfallen. Bei ca. 8,1 Mio. Einwohnerinnen und Einwohner der Schweiz kommen bei ca. 2.950 Binnenzellen auf jede Zelle durchschnittlich 2.800 Einwohnerinnen und Einwohner. Das NPVM liegt damit im Durchschnitt noch unter dem Wert des sehr grossen und komplexen Modells der Deutschen Bahn AG (DB AG: 9.500 Binnenzellen mit ca. 8.500 Einwohnern pro Binnenzelle.).

Neben der Quantität und Qualität der berücksichtigten Strukturgrössen pro Zelle ist zu beachten, dass bei strategischen makroskopischen Modellen eine Verkehrszelle auf einen Zellenschwerpunkt reduziert wird, über den die Fahrten einer Verkehrsstrommatrix in das Verkehrsnetz eingespeist werden. Somit werden auch alle Strukturgrössen auf diesen Zellenschwerpunkt konzentriert. Da die Zellenschwerpunkte über Anbindungen an den Netzgraphen angebunden sind, beeinflusst die gewählte Zellengrösse nicht nur die Aussagegenauigkeit relationsbezogener Grössen (z. B. Verkehrsstrom, Reisezeit), sondern auch alle weiteren damit in Zusammenhang stehenden Raum- und Netzelemente.

Das derzeitige NPVM enthält grundsätzlich eine Zelle pro Gemeinde. Diese aus rein statistischem Blickpunkt festgelegte Einteilung ist historisch gewachsen, führt aber im Modelldetail zu Problemen. Das Maximum liegt derzeit bei 62.445 Einwohnerinnen und Einwohner pro Zelle (siehe Abbildung 1). Dem gegenüber steht der Mittelwert von ca. 2.800 EW pro Zelle. Somit entspricht der höchste Wert ca. 2.300% des Mittelwertes. Darüber hinaus liegen ca. 280 Zellen über der 250%-Marke des Mittelwertes (die Einhaltung einer Abweichung von maximal 250% des Mittelwertes der massgebenden Strukturgrösse gelten als allgemeiner Anhaltswert bei der Zelleneinteilung, wobei hier keine Abstufung zwischen Planungsgebiet und Umland vorgenommen wurde.) Dieses Ungleichgewicht der Absolutzahl der massgebenden Strukturgrösse innerhalb der Zellen, führt bei Gravitationsansätzen erfahrungsgemäss zu grossen und schwer handhabbaren Verzerrungsproblemen.

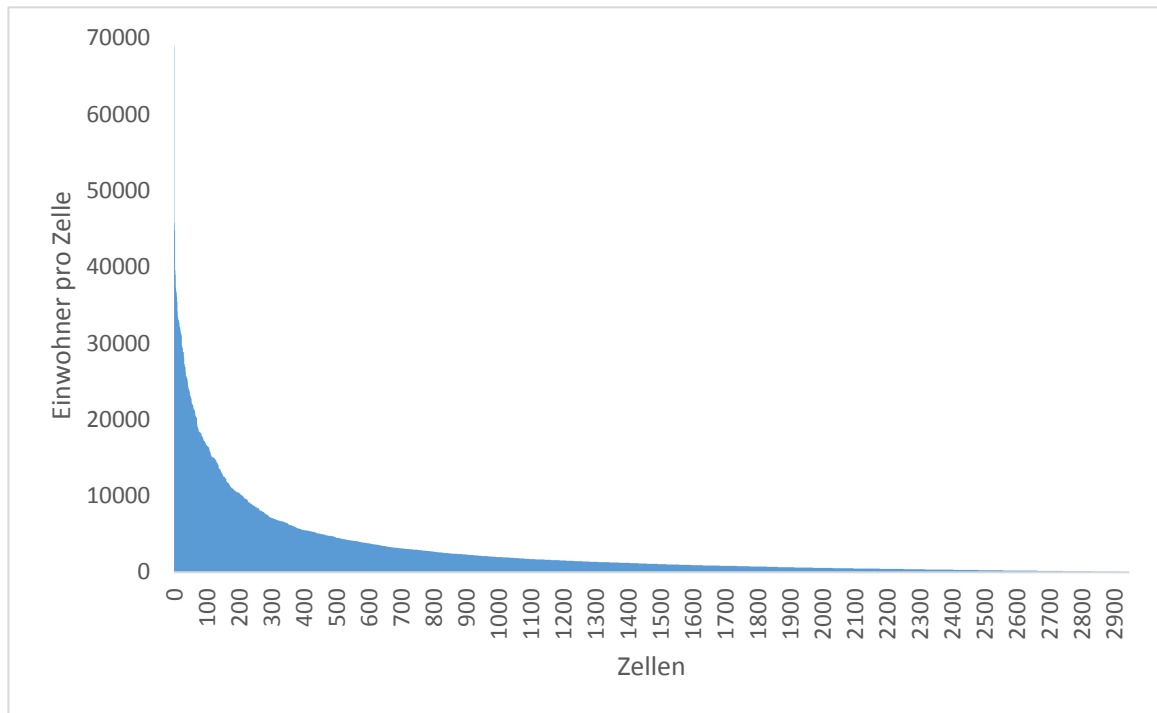


Abbildung 1: Anzahl der Einwohner pro Zelle im NPVM 2010

Damit einhergehend stellt der Zellenbinnenverkehr auf der Hauptdiagonale einen nicht unerheblichen Teil der derzeitigen Matrix dar, was auch die Abbildung des ÖV in Agglomerationen und die Abbildung von Siedlungsverdichtungen erschwert. Darüber hinaus entstehen mit ca. 2 Anbindungen pro Zelle zwangsläufig Unschärfen bei den Kenngrößen für die Nachfrageberechnung und den damit ermittelten Modellbelastungen. Die Verkehrsbelastungen werden dadurch in den „starken“ Zellen nur auf dem übergeordneten Strassennetz abgebildet.

Um eine sachlogische und rechenbare Zellenanzahl zu ermitteln, kann die vorhandene Zelleneinteilung der kantonalen Modelle herangezogen werden. Die dort vorliegende Feinheit, ist ein guter Anfangswert zur Bestimmung der Zellauflösung für das nationale Modell (z. B. Bern ca. 1050 Binnenzellen, Solothurn ca. 1250 Binnenzellen, Tessin ca. 850 Binnenzellen, Zürich ca. 1350 Binnenzellen). Werden die Zellenumfänge der kantonalen Modelle extrapoliert, werden für das neue NPVM ca. 9.000 - 10.000 Binnenzellen in der Modellierung auftreten [Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2012].

Die Verwendung der kantonalen Zellen bietet Vorteile. Die wichtigsten Punkte sind:

- Eine Abstimmung der Strukturdaten zwischen kantonalen Modellen und NPVM wird möglich;
- Es bietet sich die Möglichkeit, die Zonierung auf die kantonalen Modelle abzustimmen und einen Aggregationsschlüssel zu genießen. Dieser Schlüssel kann auch bei der weiteren Verfeinerung der kantonalen Modelle fortgeschrieben werden, so dass auch dann noch eine einfache und schnelle Umrechnung erfolgen kann. Natürlich könnten auch Zellenveränderungen in den kantonalen Modellen sowie deren Aktualisierung parallel zum NPVM erfolgen;
- Die Kantone können den Aussenverkehr für ihre Modelle umrechnungsfrei aus dem nationalen Verkehrsmodell übernehmen. So würde dies die generelle Interaktion mit den Kantonen als auch die Kooperationen mit BAV, ASTRA und BAFU fördern;

- Das Wegfallen vieler Mehrfachanbindungen, welche die punktuelle Verkehrsüberlastung in der Nähe der Anbindungsknoten unterbinden sollen, reduziert die Datenmenge im Angebotsmodell erheblich;
- Der Binnenverkehrsanteil auf der Hauptdiagonale wird stark vermindert, was zu besseren Umlegungsergebnissen samt nachfolgenden Auswertungen führt.

Die Verfeinerung sollte primär in den o.g. Zellen mit überdurchschnittlich grosser Abweichung vom Mittelwert der massgebenden Strukturgrösse stattfinden⁸. (Dies sind i.d.R. Agglomerationen sowie grössere Städte und Gemeinden.) Bei ca. 10.000 Binnenzellen und ca. 8 Mio. Einwohnern der Schweiz ergeben sich durchschnittlich 800 Einwohner pro Zelle. Bei 250% des Mittelwertes der massgebenden Strukturgrösse würden im heutigen Modell ca. 910 Zellen diesen Wert übertreffen. Hier wäre ein erster Ansatz zur Verfeinerung zu sehen, welcher Synergien nutzt und wenig aufwändig ist. Trotzdem ist noch einmal explizit zu erwähnen, dass eine Verkehrszelleneinteilung nicht nur nach statistischen Verfügbarkeiten vorgenommen werden darf. Ein wesentlicher Faktor für die Zoneneinteilung ist auch die Abbildung des Verkehrsangebotes im ÖV mit den Anbindungen zu den Haltestellen. Wie bei den kantonalen Modellen ist vorgesehen, den vollständigen HAFAS-Fahrplan abzubilden. Es ist stets zu beachten, dass die Notwendigkeit einer räumlichen Gliederung von den Nutzungsformen, Struktur- und Verkehrsverhaltensdaten durch die räumliche Differenzierung der Aktivitäten-, Ziel-, Modus- und Routenwahl erforderlich ist. Somit sind für die Zelleneinteilung unbedingt folgende Grundsätze zu beachten [Quelle: Lohse D., 1997]:

- generelle Zäsuren innerhalb des Untersuchungsgebietes beachten;
- einheitliche Flächennutzungsstruktur innerhalb einer Verkehrszelle anstreben;
- generelle Grösse der Verkehrszellen ist nur vom Planungsgegenstand/ Planungsziel abhängig und nicht von mathematisch-statistischen Gesichtspunkten;
- wichtige trennende Strassenzüge und ÖV-Linien sollten Verkehrszellengrenzen sein;
- wichtige Strassenknotenpunkte und ÖV-Linien-Knoten sollten Schnittpunkte von Verkehrszellengrenzen sein;
- eine möglichst eindeutige Zuordnung zu den massgebenden Füllknoten/ Füllstrecken aller Verkehrsnetze des Untersuchungsgebietes sollte angestrebt werden.

Für diese Zelleneinteilung sind dann alle massgebenden Raumstrukturgrössen (z. B. geographische/geologische, meteorologische, ökologische Informationen etc.) und alle massgebenden Siedlungsstrukturgrössen (demographische, soziale, wirtschaftliche, kulturelle Informationen etc.), welche auf das Verkehrsgeschehen einwirken, zu erheben. Erst wenn dies aus statistischen Gründen nicht möglich ist, sind Anpassungen der Zelleneinteilung im Sinne der Statistik vorzunehmen.

Empfehlung zur räumlichen Segmentierung der Schweiz: Das NPVM sollte auf der Schweizerischen Ebene auf dem durchschnittlichen Aggregationsniveau der kantonalen Modelle aufgebaut werden. Dabei würde ein Modell mit 9.000 bis 10.000 Binnenzellen entstehen. Die Verbesserung der Modellierungsergebnisse würde hierbei auf Synergieeffekte durch die schnellere Austauschbarkeit und Übertragbarkeit von Modelldaten treffen. Bei der Verwendung von kantonalen Zellen unterschiedlicher Modelle ist jedoch zu beachten, dass es dadurch nicht zu Inhomogenitäten bei der Zonenstruktur des NPVM kommt.

⁸ Da grundlegende Strukturdaten (z. B. Einwohner, Arbeitsplätze etc.) hektarfein vorliegen, sollte die Aufbereitung der Strukturdaten für kleinere Zellen unproblematisch sein.

3.2. Räumliche Segmentierung des Auslandes

Die Zelleneinteilung der die Schweiz umgebenden Gebiete ist von den Ansprüchen der Modellierung abhängig. Sollte eine komplette Nachfragemodellierung in allen Schritten durchgeführt werden, müssten auch alle relevanten Daten (Strukturdaten, Verhaltensdaten etc.) für die umliegenden Regionen erhoben werden. Dies wird aus Zeit- und Kostengründen für nicht machbar eingestuft. Ausgangspunkt für die weiteren Ausführungen ist die entsprechende Schlussfolgerung, dass für die ausländischen Zellen keine vollständige Nachfrageberechnung durchgeführt wird.

In den Konzeptstudien zur Zonen- und Netzverfeinerung und zu Zellen- und Netzstrukturen des Nationalen Personenverkehrsmodells [Quellen: Bundesamt für Raumentwicklung, 2010 und Bundesamt für Raumentwicklung, 2012] wird darauf verwiesen, dass der Dateneinbezug dreier kantonalen Verkehrsmodelle⁹, welche zusammengekommen etwa drei Viertel des werktäglichen grenzquerenden Verkehrs abbilden, befürwortet wird. Diese Modelle sollen die Erhebung des Alpen- und grenzquerenden Personenverkehrs substanziell ergänzen und die Datenlage verbessern.

Richtig ist, dass die Zonierung des Auslands der kantonalen Modelle entsprechend der im vorherigen Abschnitt gemachten Empfehlung zu übernehmen ist¹⁰. Um diese Zellen mit den relevanten Verkehrsdaten zu versorgen, sollten die Erhebung „Alpen- und grenzquerender Personenverkehr“, lokale Erhebungen der kantonalen Modelle, Grenzgängerstatistiken (BESTA) und Grenzgängerbewilligungen (ZEMIS) verwendet, verschnitten und verdichtet werden.

Um der Notwendigkeit einer generell feingliedrigeren Zonierung im grenznahen Ausland zu genügen, wird der Vorschlag der Untersuchung zu Zonen- und Netzstrukturen des Nationalen Personenverkehrsmodells befürwortet [Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2010]. Dieser sieht eine Erweiterung der räumlich feingliedrigen Zonierung auf den Perimeter: Frankfurt-Bayern-Tirol-Mailand-Turin-Lyon-Paris-Luxemburg vor. Damit bleiben die beiden wichtigen konkurrierenden Alpenübergänge (Brenner, Fréjus) enthalten, wodurch auch grossräumige Routenwahlveränderungen analysiert werden können. Zonen ausserhalb des farbigen Perimeters in Abbildung 2 sollen nicht weiter berücksichtigt werden.

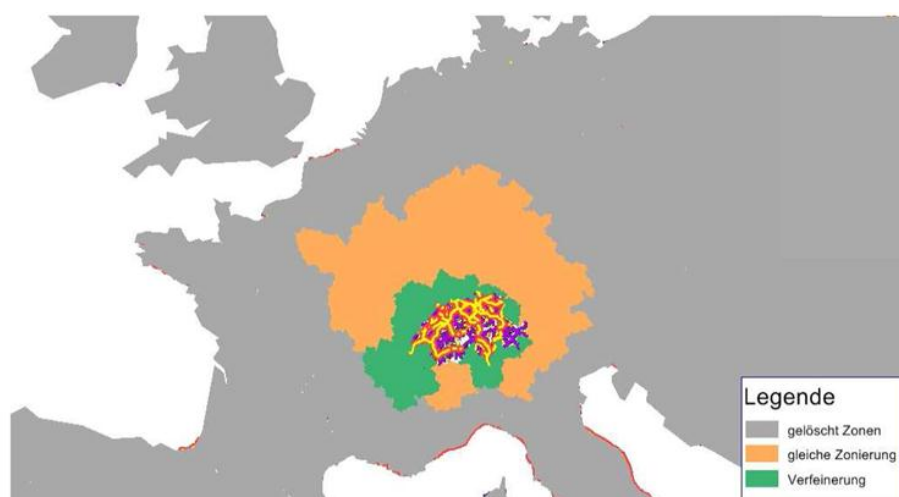


Abbildung 2: Veränderung der Zellenstruktur [Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2010]

⁹ Dies betrifft die Modelle der Kantone Basel-Stadt, Genf und Tessin.

¹⁰ Die Zelleneinteilung sollte von den entsprechenden Kantonen vorgenommen werden. Sie orientiert sich dann auch an den kantonalen Anforderungen.

Durch diese Neueinteilung würden folgende Zellen im Umland entstehen:

- Randzonen (grüne Einfärbung): 100
- Lichtenstein: 11
- Österreich: 7
- Luxembourg: 1
- Deutschland: 134
- Italien: 79
- Frankreich: 96

Empfehlung zur räumlichen Segmentierung des Auslandes: Die räumliche Segmentierung des Auslandes sollte um ca. 430 ausländische Zellen erweitert werden [Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2010]. Für ausländische Zellen wird keine direkte Nachfrageberechnung in Bezug auf die Erzeugung und die Ziel- und Moduswahl durchgeführt. Mit der Erhebung „Alpen- und grenzquerender Personenverkehr“, lokalen Erhebungen der kantonalen Modelle, Grenzgängerstatistiken, Grenzgängerbewilligungen und EU-Verkehrstrommatrizen sollten eigene Quell-, Ziel- und Ausverkehrsstrommatrizen erstellt und verwendet werden.

3.3. Segmentierung des Verkehrsangebots

Verkehrsangebotsmodelle bilden die Verkehrsnetze der Verkehrsarten mit ihren spezifischen Eigenschaften ab. Elementarer Bestandteil eines Verkehrsangebotsmodells ist das Netzmodell. Es bildet die räumliche und zeitliche Struktur des Verkehrsangebots für den Untersuchungsraum ab, womit seiner Darstellung (in Form von Netzmodellen für die einzelnen Verkehrsmittel) besondere Bedeutung zukommt. Für grossräumige Modelle war es bis dato üblich, nur das Hauptstrassennetz und den Schienenverkehr zu modellieren. Dies wird schrittweise geändert um das komplette Angebot abzubilden.

Die Segmentierung des Verkehrsangebots bestimmt die Zahl der Alternativen bei der Verkehrsmittelwahl. Für viele Fragestellungen genügt es zu wissen, ob die Ortsveränderungen mit dem Personenwagen (PW) oder dem ÖV durchgeführt werden. In westeuropäischen Personenverkehrsmodellen ist es üblich, die vier Verkehrsmittel Fuss, Rad, ÖV und PW zu differenzieren, wie es auch in der Weiterentwicklung des NPVM der Fall sein sollte. Dabei kann das Verkehrsmittel PW in PW-Selbstfahrer und PW-Mitfahrer aufgeteilt werden. Komplexere Modelle berücksichtigen auch Verkehrsmittelkombinationen (Park & Ride, Rail & Fly). Ausserdem kann es notwendig sein, länderspezifische Verkehrsangebote (z. B. Heavy Occupancy Vehicles HOV in den USA oder Three-wheelers in Asien) zu berücksichtigen.

Das Angebotsmodell des NPVM umfasst ein MIV- und ein ÖV-Netz mit 3114 Zellen für den aktuellen Modellzustand 2010. Auf Grund der langen Nutzung (und somit der Erstellung vor 15 Jahren) und der damaligen Möglichkeiten ergeben sich einige schwerwiegende Nachteile des Modells:

- Fuss und Rad wurden zu einem Modus LV zusammengefasst. Für diesen Modus wurde aus der MIV-Reiseweitenmatrix eine LV-Reisezeitenmatrix generiert;
- Es fehlen im MIV untergeordnete Verbindungsstrassen;
- Das Modell erzeugt einen sehr hohen Anteil an Zellenbinnenverkehr;
- Es entstehen überhöhte Verkehrsbelastungen im Bereich von Anbindungen;
- In den 10 grössten Städten fehlt das städtische Strassennetz. (Verkehr wird zwischen den innerstädtischen Zellen nur teilweise umgelegt und muss vor der Umlegung händisch reduziert werden; andernfalls würden aufgrund zu hoher Belastungen Verzerrungen auf dem städtischen Netz, den Umfahrungsstrassen und den Autobahnringen im Bereich der grossen Agglomerationen entstehen.)

- Im ÖV werden nur das Schienennetz und die Busverkehre im Überlandverkehr abgebildet. (Bei mehreren Haltstellen in einer Zelle (Gemeinde) ist die Aufteilung der Fahrtanteile schwierig zu modellieren.)
- Stark vereinfachte Netzstrukturen führen in den Agglomerationen zu Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Kenngrößen wie Reisezeiten, Zugangszeiten und Umsteigevorgänge. (Besonders davon betroffen ist der Regionalverkehr im näheren Umkreis der grösseren Agglomerationen.)

Um diese Fehler auszuschliessen, muss im unmittelbaren Zusammenhang mit der räumlichen Segmentierung ein grundlegend neuer Netzgraph verwendet werden.

3.3.1. MIV-Verkehrsnetzmodellierung

Für die MIV-Verkehrsnetzmodellierung auf nationaler Ebene werden grösstenteils die Navigationsnetze der Firmen TomTom (TomTom-Netz, ehemals TeleAtlas-Netz) und Nokia (NavTeq-Netz) verwendet. Beide Netze besitzen einen hohen Detailierungsgrad von ähnlicher Qualität und können entsprechend aufbereitet werden. Da das Bundesamt für Strassen (ASTRA) über das TomTom-Netz für die Schweiz und die Nachbarländer verfügt, könnte dieses auch vom ARE verwendet und entsprechend angepasst werden:

- komplette Übernahme der Detailtiefe des Tom-Tom-Netzgraphen;
- Streichung der überflüssigen Informationen des Netzgraphen (Knoten mit zwei Armen, Streckentypen 6 (teilweise), 7 und 8¹¹) sowie Erstellung eines ausgedünnten Netzes für das Ausland¹²;
- Einfügen neuer Netzgraphen (z. B. Fehlerbehebung, neue Netzelemente, Parkplätze etc.);
- Definition der grundlegenden Verkehrsmodi (Fuss, Rad, MIV, ÖV), Verkehrssysteme und Nachfragesegmente, ggf. Definition von Sondermodi (z. B. e-Bike, P+R, wichtig für die weitere Modellstruktur z. B. PR-Funktionen);
- Erstellung der Netzmerkmale freier Strecken (Länge, freie bzw. zulässige Geschwindigkeit, zulässige Verkehrssysteme, Kapazität (aus Spurenanzahl, Streckentyp etc.), Streckentyp und zugehörige CR-Funktion);
- Erstellung der Netzmerkmale Knotenstrecken (Länge, Geschwindigkeit, Kapazität, Verkehrssysteme, Aufwände für Vorfahrtsregelung an den massgebenden Knoten);
- Erstellung der Verkehrszellen inkl. der Zellenschwerpunkte gemäss räumlicher Segmentierung;
- Erstellung der Anbindungen der Verkehrszellen;
- Zuspätspielen von POI und anderen Daten (z. B. MISTRA-Attribute, OSM-Daten, spezielle Fuss- und Radwege etc.¹³);
- Definition von Aufwänden (Zeiten, Kosten, Energie etc.).

Die o.g. Punkte können „relativ“ einfach bei den kommerziell verfügbaren Netzen vorgenommen werden. Damit (und im Zusammenhang mit der räumlichen Segmentierung) können im MIV auch alle o. g. genannten Kritikpunkte weitestgehend vermieden werden [Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2010].

Einzig die systematisierte Erstellung von Anbindungen ist kompliziert, da es keinen allgemeingültigen Ansatz gibt. Grundsätzlich ist zu sagen, dass jede Verkehrszelle eine Anbindung zu mindestens einem IV-Knoten (und/oder jeder bedienten ÖV-Haltestelle) besitzen muss. Der Anbindungsaufwand beschreibt den im Mittel zu erwartenden Aufwand eines Verkehrsteilnehmers einer Verkehrszelle zum Verkehrsmodus (z. B. Parksuchzeiten, ÖV-Wartezeiten etc.). Die Anbindungen sollten dabei

¹¹ Streckentyp 6: Lokalstrassen; Streckentyp 7: untergeordnete Lokalstrasse; Streckentyp 8: andere Strassen

¹² Damit wird das Netz bei ca. 650.00 bis 750.000 Streckenelementen liegen.

¹³ Stattdessen evtl. Verwendung des TLM-Netzes von Swisstopo.

möglichst den realen Zugangs- bzw. Abgangsaufwänden entsprechen. Jedoch ist die Ermittlung repräsentativer Anbindungszeiten aus folgenden Gründen schwierig:

- Verkehrszellen können je nach räumlicher Ausdehnung des Modells sehr gross und unterschiedlich sein;
- die räumliche Verteilung der Nutzungen innerhalb einer Verkehrszelle wird oft nicht richtig dargestellt;
- die Lage der Zellenkoordinate liegt manchmal nicht im Zellenschwerpunkt.

Oft werden automatisierte geometrische Verfahren genutzt. Im Fall des MIV der Schweiz wird z. B. als Schwerpunkt der mit den hektarfeinen Einwohner- und Arbeitsplatzdaten gewichtete Mittelpunkt der Zelle genutzt. Dieser Schwerpunkt wird gewichteten Teilzellen gegenübergestellt, womit die gewichteten Anbindungen zwischen Zellenschwerpunkt und Teilzellen automatisch generiert werden können. Ähnlich arbeiten auch die Verfahren der PTV [Quelle: PTV AG (2015): Handbuch VISUM 14]. Hier kann kein Verfahren heraus gestellt werden.

3.3.2. ÖV-Verkehrsnetzmodellierung

Generell gilt für die ÖV-Verkehrsnetzmodellierung, dass ein digitalisiertes und attribuiertes Netz mit Streckenlängen vorliegen muss, welches routingfähig ist. Darüber hinaus sollten HAFAS-Nummern existieren und das Durchbindungsproblem gelöst werden können. Weiter können für die ÖV-Verkehrsmodellierung auf nationaler Ebene keine allgemeingültigen Vergleiche gezogen werden. Dazu ist die Wichtigkeit und Differenzierung des ÖV zu unterschiedlich. (So wird in vielen nationalen Modellen diskutiert, ob nur Fahrzeitprofile genutzt werden und keine Fahrpläne. Speziell für die Prognose ist das ein nicht zu unterschätzender Aspekt. Dies ist jedoch durch die Verwendung eines integralen Taktfahrplanes der Schweiz mit überdurchschnittlich gut ausgeprägten Umsteigerelationen obsolet.) Darum wird der Vorschlag der Untersuchung zu den Zonen- und Netzstrukturen des Nationalen Personenverkehrsmodells weitestgehend befürwortet [Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung, 2010].

Diese empfehlen das BAV-Schienennetz zu verwenden, da es weitgehend diesen Anforderungen entspricht¹⁴. Die Fahrplandaten sollten neben dem HAFAS National-Datensatz (wie bisher) auch den Tür-zu-Tür-Fahrplan verschiedener Verkehrsbetriebe umfassen. Die Haltestellenkoordinaten sollten vom BAV übernommen werden. Ebenso sollte ein ausgedünnter Fahrplan im Ausland existieren, dessen Linien in bzw. aus der Schweiz laut HAFAS manuell zu verlängern sind.

Ebenso sind auf der Strasse die Fahrplandaten aus dem HAFAS National-Datensatz als auch aus den Daten der Verkehrsverbünde bzw. -betriebe zu verwenden. Diese sind mit den Haltestellenkoordinaten des BAV und der zu verwendenden Detailtiefe des MIV-Netzgraphen zu synchronisieren. Genau wie die systematisierte Erstellung von Anbindungen des MIV stellen die Anbindungen des ÖV eine nicht unerhebliche Schwierigkeit dar. Auch hier kann kein Verfahren heraus gestellt werden (z. B. Verfahren nach Fröhlich, Friedrich, Müller, Richter etc.)

Neben den aus klassischen Angebotsmodellen und HAFAS ableitbaren komplexen ÖV-Aufwänden, den ÖV-Kosten, sollte aufgrund der sehr hohen ÖV-Auslastung in Spitzenstunden in der Schweiz die Betrachtung der Auslastung des Rollmaterials bzw. des Netzes einzelner ÖV-Verkehrssysteme in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich stellt die Vernachlässigung von Kapazitäten eine Vereinfachung dar, die in hoch ausgelasteten ÖV-Systemen unzureichend die Realität widerspiegelt.

¹⁴ Für das neue Modell ist entsprechend auf die Netz- und Haltestellentypologie zu achten.

Kapazitätsbeschränkungen wirken in der Praxis auf verschiedene Weise [Quelle: PTV, 2015]:

- Ein Fahrzeug kann nur so viele Fahrgäste aufnehmen, wie Kapazität vorhanden ist.
- Fahrgäste empfinden es als unangenehm, in einem stark ausgelasteten Fahrzeug zu reisen.
- Fahrgäste empfinden es als unangenehm, an stark frequentierten Haltestellen umzusteigen.

Die Kapazitätsbeschränkung in der fahrplanfeinen Umlegung zielt darauf ab, Unannehmlichkeiten für die Fahrgäste im Fahrzeug abzubilden. Die Tatsache, dass beim Übersteigen der Fahrzeugkapazität ein Teil der Fahrgäste auf andere Verbindungen ausweichen muss, wird dabei annäherungsweise erfasst. Das Überschreiten der Fahrzeugkapazität wird jedoch nicht per se verhindert. Kapazitätsbeschränkende Effekte an Haltestellen bleiben unberücksichtigt. Verfahren, die eine Auslastung des Rollmaterials berücksichtigen, arbeiten grundsätzlich in folgenden Schritten:

- „normale“ Verbindungssuche und Umlegung;
- zweite Verbindungssuche und Verbindungswahl im belasteten Netz unter Berücksichtigung der errechneten Belastungen (sie gehen additiv in den Suchwiderstand ein);
- Berechnung aller auslastungsunabhängigen Widerstände;
- Berechnung aller auslastungsabhängigen Widerstände (Iteration);
- Belastungen der Verbindungen mittels Aufteilungsmodell;
- Gleichgewichtsberechnung.

Grundlegend arbeitet das System nach dem Prinzip Belastung / Kapazität, wobei sich die Kapazität aus den über alle Fahrplanfahrabschnitte summierten Kapazitätswerten der Fahrplanfahrtelemente ergibt. Die Belastung eines Fahrplanfahrtelementes ergibt sich aus der Summe aller Verbindungen die es verwenden.

Empfehlung zur Segmentierung des Verkehrsangebots:

Das NPVM sollte auf Basis von vier Verkehrsmodi (Fuss, Rad, ÖV und PW) aufgebaut werden. Dazu sollte das vollständige TOM-TPM-IV-Netz verwendet und entsprechend der o.g. Punkte angepasst werden. Die ÖV-Modellierung sollte das BAV-Netz in Verbindung mit HAFAS-Daten verwenden. Der strassengebundene ÖV nutzt vorrangig den HAFAS National-Datensatz sowie die Haltestellenkoordinaten des BAV und verknüpft diese Daten mit dem MIV-Netzgraphen. Ebenso ist die Verwendung einer nachfragebeeinflussenden Auslastung einzelner ÖV-Verkehrssysteme in Betracht zu ziehen. Zusätzlich sind spezielle Sonderverkehrsmodi (z. B. e-Bike, P+R) zur Offenhaltung des Modells für zukünftige Fragestellungen einzuführen, wenn auch nur als Proxy.

3.4. Segmentierung der Verkehrsnachfrage

Die Attribute einer Ortsveränderung (z. B. Ziel, Verkehrsmittel, Route) werden im Personenverkehr massgeblich von der Person und deren Wegezweck bestimmt. Bei makroskopischen Modellen ist es deshalb üblich, die Verkehrsnachfrage differenziert nach verhaltenshomogenen Personengruppen und Wegezwecken abzubilden. Derartige Modelle werden deshalb auch als disaggregierte Modelle oder als Individualverhaltensmodelle bezeichnet. Diese Modelle haben folgende Eigenschaften:

- Jede Personengruppe und/oder jeder Wegezweck bildet in der Aktivitätenwahl ein eigenes Nachfragesegment mit spezifischen Mobilitätsraten;
- Für die Zielwahl können für jedes Nachfragesegment geeignete Zielorte bzw. Anziehungspotentiale ausgewählt und spezifische Parameter für die Aufwandsempfindlichkeit gesetzt werden. So lässt sich zum Beispiel abbilden, dass Erwerbstätige für die Fahrt zur Arbeit einen grösseren Aufwand, d.h. eine längere Reisezeit, in Kauf nehmen als für die Fahrt zum Einkauf;
- Die Verkehrsmoduswahl kann für jedes Nachfragesegment die Kosten und Verfügbarkeit der Verkehrsmittel berücksichtigen;

- Bei der Wahl einer Fahrtroute können die Parameter, mit denen die Empfindlichkeit gegenüber Kosten (Strassenbenutzungsgebühren, Fahrpreise) oder Umsteigen modelliert wird, pro Nachfragesegment angegeben werden;

Einfache disaggregierte Modelle unterscheiden dabei zwei wohnortgebundene Wegezwecke: Arbeiten (HBW home-based work) und Sonstiges (HBO home-based other) sowie einen nicht wohnortgebundenen Wegezweck Sonstiges (NHBO non home-based other). Diese Modellansätze werden oft im anglo-amerikanischen Raum verwendet. Westeuropäische Modelle zeigen oft eine feinere Differenzierung in Personengruppen und Wegezwecke.

Personengruppe	Wegezweck
Einwohner nach Altersklassen	Wohnen
Erwerbstätiger	Arbeiten
Freizeitbesucher	Ausbildung
	Nutzfahrt
	Einkaufen
	Freizeit
	sonstige Ortsveränderung

Tabelle 5: Personengruppen und Wegezwecke im NPVM 2010

Personengruppe	Wegezweck
Einwohner nach Altersklassen	Arbeit qualifiziert
Erwerbstätiger qualifiziert	Arbeit einfach
Erwerbstätiger einfach	Arbeit selbständig
Selbständige und freiberuflich Tätigkeit	Arbeit Teilzeit
Teilzeitbeschäftigte	Ausbildung Grundschule
Arbeitslose	Ausbildung weiterführende Schule
Hausmann/-frau	Ausbildung Berufsschule
Grundschüler	Ausbildung Hochschule
Schüler	Einkaufen täglicher Bedarf
Auszubildender	Einkaufen sonstige Waren
Studenten	Einkaufen Einkaufsbummel
Rentner ≤ 75	private Erledigung (Arzt, Bank, Post)
Rentner > 75	Freizeit (Besuche)
	Freizeit (Restaurant, Kultur)
	Freizeit (Sport, Grünanlagen)
	Bringen/Holen

Tabelle 6: Personengruppen und Wegezwecke im aktuellen Verkehrsmodell der Stadt München

Demgegenüber werden in vielen Modellen ausserhalb Westeuropas Einkommensklassen bei der Personengruppe explizit berücksichtigt. Für eine Neuaufstellung der Nachfragesegmentierung ist die Betrachtung von Tabelle 5 und Tabelle 6 richtungsweisend. Durch die 15-jährige Laufzeit des NPVM ist die Einteilung der Quelle-Ziel-Gruppen, Personengruppen und der Wegezwecke nicht mehr zeitgemäss.

Gleichwohl ist die Einteilung der Personengruppen und Wegezwecke einer Stadt nicht vollständig für ein nationales Modell verwendbar. Um eine Erweiterung der Personengruppen und Wegezwecke für das neue NPVM festzulegen, sind folgende Punkte zu beachten:

- Historisch gewachsene Erfahrungen im alten NPVM
- Strukturdaten müssen vorhanden sein
- SP-Schätzungen müssen möglich sein; die Stichprobengrösse des MZMV muss berücksichtigt werden
- tatsächlicher Verhaltensunterschied zwischen den Gruppen
- zukünftige Anforderungen an das NPVM
- Handhabbarkeit

Mit Beachtung der o.g. Punkte, werden folgende Anpassungen empfohlen:

- Unterteilung der Personengruppen Erwerbstätiger und des Wegezwecks Arbeiten in „einfach“ und „qualifiziert“;
- Unterteilung der Personengruppen Schüler in Schüler und Studierende und des Wegezwecks Bildung in „Schule“ und „Hochschule“;
- Unterteilung des Wegezwecks Einkaufen in „täglichen Bedarf“ und „Event-Shopping“ (z. B. Möbel, Mode, Elektronik etc.);
- Unterteilung des Wegezwecks Freizeit in „nah“ und „fern bzw. Grossattraktion“
- personengruppenfeine Einteilung nach PW- und ÖV-Abonnementsbesitz (GA, HTA, Verbundabos).

Empfehlung zur Nachfragesegmentierung: Werden die o.g. Punkte zusammengefasst, ergibt sich folgende empfohlene Einteilung:

Personengruppe (nach PW-, GA-, Verbundabos und HTA-Besitz¹⁵)	Wegezweck
Einwohner nach Altersklassen	Wohnen
Erwerbstätiger einfach	Arbeiten einfach
Erwerbstätiger qualifiziert	Arbeiten qualifiziert
Schüler	Ausbildung Schule
Hochschüler	Ausbildung Hochschule
Freizeitbesucher	Nutzfahrt
	Einkaufen täglich
	Einkaufen Event
	Freizeit nah
	Freizeit fern
	sonstige Ortsveränderung

Tabelle 7: Empfehlung zur Nachfragesegmentierung

¹⁵ Diese Einteilung ist unmittelbar mit den Modellen in Kapitel 5 verknüpft.

4. Zeitliche Segmentierung

Im Hinblick auf die Modellierung der Zeit lassen sich a) statische Modelle ohne Zeitachse, b) dynamische Modelle mit wiederkehrendem Systemzustand und c) dynamische Modelle mit veränderlichem Systemzustand unterscheiden. [Quelle: Friedrich M., Schiller C., 2015]

- a) Modelle ohne Zeitachse werden als statische Modelle bezeichnet und betrachten genau einen Zeitraum, z. B. einen Tag oder eine Stunde und nehmen für diesen Zeitraum ein konstantes Verhalten an. Dabei geht man davon aus, dass sich der Systemzustand im Verkehrsnetz während des betrachteten Zeitraums nicht ändert und sich regelmässig über einen längeren Zeitraum wiederholt, so dass die Verkehrsteilnehmer ihre Zielwahl-, Verkehrsmittelwahl- und Routenwahlentscheidung unter gleichbleibenden Bedingungen treffen und sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage einstellt. Ziel der Modellierung ist es, einen Zustand zu ermitteln, der dem im langfristigen Mittel zu erwartenden Nachfrage- und Netzzustand entspricht. Ein derartiges statisches Modell eignet sich für die planerische Bewertung von langfristig geplanten Infrastrukturmassnahmen und daraus resultierenden Nachfrageänderungen.

Dynamische Modelle besitzen im Gegensatz dazu eine Zeitachse und können somit Aussagen über zeitliche Änderungen machen. Dabei lassen sich für die langfristige Planung zwei Varianten von dynamischen Modellen unterscheiden:

- b) Dynamische Modelle mit wiederkehrendem Systemzustand: Hier wird angenommen, dass sich der Systemzustand im Verkehrsnetz zwar innerhalb des Untersuchungszeitraums verändert, sich aber regelmässig wiederholt (z. B. jeden Werktag oder jede Woche), so dass sich wie im statischen Fall ein Gleichgewichtszustand zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage einstellt. Die Verkehrsteilnehmer können in diesem Fall ihre Wahlentscheidungen einschliesslich der Wahl des Abfahrtszeitpunktes unter zeitabhängig wiederkehrenden Bedingungen treffen. Ein derartiges dynamisches Modell eignet sich ebenfalls für die planerische Bewertung von Infrastrukturmassnahmen und Nachfrageänderungen. Im Gegensatz zu statischen Ansätzen ermöglicht es zusätzlich eine Analyse der Verkehrssituationen differenziert nach Tageszeiten.
- c) Dynamische Modelle mit veränderlichem Systemzustand: In diesem Fall wird von einem dynamischen Prozess ausgegangen, bei dem sich die Verkehrsnachfrage und das Verkehrsangebot im Laufe der Zeit ändern und dabei auch gegenseitig beeinflussen, so dass sich kein Gleichgewichtszustand einstellt. Die Verkehrsteilnehmer reagieren dabei in einem dynamischen Lernprozess immer wieder neu auf die in der Vergangenheit gemachten Erfahrungen. Mit solchen Modellen ist es z. B. möglich, den Alterungsprozess der Bevölkerung über einen längeren Zeitraum nachzubilden.

Empfehlung zur zeitlichen Segmentierung: Das NPVM sollte aufgrund der genannten Probleme innerhalb der direkten Zeitscheibenmodellierung als Modell ohne Zeitachse, also als ein DWV-Modell, aufgebaut und für die Bewertung von langfristigen Infrastrukturmassnahmen und daraus resultierenden Nachfrageänderungen genutzt werden. Darauf aufsetzend sollten die Ergebnisse im Sinne eines Modells mit wiederkehrendem Systemzustand dynamisiert werden. Diese Dynamisierung wird zusammen mit der Abbildung von Zeitscheiben und Möglichkeiten zur Abbildung von Spitzenstunden im Komplex „Modellaufbau und -konsistenz“ beschrieben.

5. Kosten

Obwohl der Punkt Kosten der Ziel-, Modus- und Routenwahl in vielen Punkten der Modellbetrachtung (grundlegendes Modelldesign, grundlegende Segmentierung, Modellaufbau und -konsistenz und Genauigkeit der Ein- und Ausgangsdaten) eingeht, soll er aufgrund seiner Wichtigkeit hier explizit betrachtet werden.

5.1. Zielsetzung, Vorgehen und Analyseschritte

Für die Weiterentwicklung des NPVM soll auch die Abbildung der Kosten bei der Moduswahl gegenüber dem heutigen Modellansatz verbessert werden. Dazu bedarf es einer Auslegeordnung, welche Modellansätze zur Verfügung stehen, welchen Datenbedarf diese hätten, inwieweit diese Daten in der Schweiz belastbar und verlässlich zur Verfügung stehen und welche Rückwirkungen auf das Gesamtmodell zu erwarten sind.

Zentral für die Auslegeordnung sind drei Aspekte:

- Welche Politikmassnahmen im Bereich der Kosten für die Benutzung einzelner Verkehrsträger (z.B. Mobility Pricing) sollen durch das weiterzuentwickelnde NPVM abgebildet werden können?;
- Einordnung in das Gesamtmodell, wo grundlegende Eckpunkte bereits festgelegt sind;
- Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit und Einhaltung übriger Randbedingungen (z.B. Anforderungen an die Rechenkapazität, Anzahl Zellen, usw.).

Das Vorgehen erfolgt in sechs Schritten:

- Was soll das weiterzuentwickelnde NPVM abbilden können (hinsichtlich der Abbildung der Moduswahl-Kosten), welche Prognosefähigkeiten sind erwünscht (Kapitel 5.3)?;
- Wie sieht das Gesamtmodell aus, welche Rückschlüsse ergeben sich daraus (Kapitel 5.4)?;
- Welche Modellansätze stehen prinzipiell zur Auswahl („Entscheidungsbaum“) (Kapitel 5.5)?;
- Welche Mobilitätswerkzeuge sollten unterschieden (einzeln abgebildet) werden (Kapitel 5.6)?;
- Wie ist die Verkehrsmittelwahl, d.h. Erwerb bzw. Einsatz der Mobilitätswerkzeuge, zu modellieren (Kapitel 5.7 bis 5.10)?;
- Formulieren von Empfehlungen und der noch offenen Fragestellungen (Kapitel 5.11).

5.2. Bisheriges Modell

Das heutige NPVM weist die folgenden hier relevanten Merkmale auf:

- Einstufige Moduswahlkosten (keine Unterscheidung fixe zu variable Kosten); bei der Moduswahl wird nicht berücksichtigt, ob man bestimmte Mobilitätswerkzeuge schon besitzt oder diese erst noch anschaffen muss; es werden nicht die variablen (marginalen) Kosten berücksichtigt, sondern die auf den Kilometer umgelegten Vollkosten.
- Das NPVM unterscheidet zwar verschiedene Personengruppen, nicht jedoch für die Moduswahlkosten: Diese sind für alle gleich.
- Die Kosten pro Kilometer sind linear, es gibt keine Abflachung der Kostenkurve; die Sätze betragen 18 Rp/km ÖV, 22 Rp/km MIV.
- Es gibt keine Transaktionskosten (d.h. der erste Kilometer kostet so viel wie alle weiteren).
- Der Besitz von Mobilitätswerkzeugen (GA und HTA) liegt zellenscharf vor, die Daten gehen in das Modell aber nur mit geringem Gewicht in die Wahlmodellierung ein.
- Der Besitz von Personenwagen liegt zellenscharf vor.

5.3. Anforderungen an die Prognosefähigkeit des künftigen NPVM betreffend Moduswahlkosten

Das künftige NPVM sollte folgende für die Modellierung der Kosten der Moduswahl relevanten Politikmassnahmen analysieren können:

- Änderung des Verhältnisses der fixen zu den variablen Kosten (z.B. neu fahrleistungsabhängige Motorfahrzeugsteuer, Haftpflicht- und Kaskoversicherung).
- Änderungen im Marktanteil von GA und HTA (Senkung oder Anhebung der Abonnementspreise).
- Änderungen Mineralölsteuer, kantonale Motorfahrzeugsteuer, Autobahnvignette.
- Änderungen im Personenwagen-Besitz (höhere Besteuerung; Fördermassnahmen für Car-Sharing).

Aus Bundesamt für Raumentwicklung (2014) lassen sich weitere, für die Kosten der Moduswahl relevante Anforderungen identifizieren:

- Massnahmen zu Mobility Pricing (zeit- und streckenbezogen);
- Mögliche zukünftige Massnahmen, wie die Einführung von anderen Preisstrukturen wie Pay as you drive oder die Abschaffung von GA und HTA;
- Berücksichtigung regionaler ÖV-Abonnemente;
- Entsprechend ist die Entwicklung eines Prognosetools Mobilitätswerkzeuge anzustreben, zusammen mit den Kantonen¹⁶;
- Die Abbildung der Preisstrukturen (inklusive Mobility Pricing) sollte für alle Modellstufen gesamthaft überprüft und realitätsgenauer abgebildet werden;
- Die Betrachtung der Spitzenstunde gewinnt an Bedeutung, ebenfalls die mögliche Einführung von Mobility Pricing mit tageszeitabhängigen Tarifen;
- Als Massnahme sollte auch Mobility Pricing in Abhängigkeit von Fahrzeugparametern (z.B. Elektroantrieb) abgebildet werden können;
- Die Berücksichtigung von „Sonderverkehrsmitteln“ (E-Bikes, P+R) ist zu prüfen.

Die Auslegeordnung zur künftigen Abbildung der Moduswahl-Kosten erfolgt unter Annahme der Etablierung eines makroskopischen Verkehrsmodells. Letztlich sind die betrachteten Ansätze zu den Moduswahl-Kosten aber nicht nur kompatibel zu makroskopischen Ansätzen, sondern können auch als Zwischenschritte auf einem längerfristigen Weg hin zu stärker disaggregierten Modellen betrachtet werden.

5.4. Mögliche neue Modellansätze

5.4.1. Eckpunkte für die NPVM-Weiterentwicklung

Für die Weiterentwicklung des NPVM lassen sich folgende Anforderungen und Bedarfe zusammenfassen:

- Getrennte Berücksichtigung der fixen und der variablen Moduswahlkosten; dies impliziert, dass bei der Moduswahl berücksichtigt wird, dass man bestimmte Mobilitätswerkzeuge im Vorfeld erworben hat (oder eben nicht); entsprechend werden bei den Distanzkosten nur die variablen (marginalen) Kosten berücksichtigt, nicht die auf den Kilometer umgelegten Vollkosten.

¹⁶ Wo immer möglich sollten Synergien mit den Kantonen gesucht werden. Aus Effizienzgründen kann ausserdem die Zusammenarbeit mit der SBB mit Blick auf regionale Abos und GA/HTA sinnvoll sein.

- Das weiter zu entwickelnde NPVM würde entsprechend neu nach Mobilitätswerkzeug-Untergruppen („besitzt Auto; besitzt GA“, usw.) unterscheiden, welche eine zusätzliche Dimension bilden zu den bereits heute unterschiedenen Personengruppen; für die Mobilitätswerkzeuguntergruppen wären die variablen Moduswahldistanzkosten jeweils unterschiedlich.
- Nichtlinearer Verlauf der Distanzkosten pro Kilometer, d.h. die heutigen Ansätze würden erstens um die fixen Kosten reduziert und zweitens mit zunehmender Distanz leicht abnehmen.
- Das künftige NPVM könnte neu Transaktionskosten, d.h. höhere Kosten für den ersten Kilometer unterlegen.
- Es ist zu klären, wie verfügbare Datensätze eingesetzt und untereinander kombiniert werden können, um für das künftige NPVM den zellscharfen Besitz von Mobilitätswerkzeugen, d.h. die Anteile der jeweiligen Untergruppen, neu abzuschätzen.
- Auch hinsichtlich des Besitzes von Personenwagen ist zu klären, wie eine zellscharfe Besitzverteilung unter Verwendung der verfügbaren Datensätze möglich ist.

Die getrennte Berücksichtigung von fixen und variablen Kosten führt zu einer teilweisen Trennung der Routen- und Moduswahl; diese Schritte werden oft zusammen modelliert (QuelleVrtic 2008). Der grundlegende Übergang von der ein- zur zweistufigen Modellierung der Moduswahlkosten lässt sich auch wie folgt darstellen:

- 1. Anschaffung von Mobilitätswerkzeugen auf Basis der voraussichtlichen Jahresfahrleistung und des Hauptfahrzwecks, je Zelle und Personengruppe; dies führt zu einer Unterteilung der Individuen in einer Zelle in „Mobilitätswerkzeugbesitz-Untergruppen“. Entsprechende Modelle können aufgrund der MZMV-Rohdaten geschätzt werden;
- 2. Restliches Verkehrswahlverhalten. Dies erfolgt über – je Mobilitätswerkzeug-Untergruppe unterschiedliche –, distanzabhängige Kostenkurven für ÖV- und MIV-Mobilitätswerkzeuge.

5.4.2. Entscheidungen auf Ebene Haushalt und Ebene Individuum

Aus Sicht des Mobilitätsverhaltens sind sowohl die Ebene des Individuums als auch jene des Haushalts wichtig. Auf beiden Ebenen werden wichtige Entscheide gefällt. Der Autokauf wird in aller Regel als eine auf Haushaltsebene gefällte Entscheidung betrachtet. Meistens geben die Mobilitätsbedürfnisse einer Person dann den Ausschlag für die Autonutzung; wenn eine Person ein Auto als Hauptverkehrsmittel verwendet, steht es auch den übrigen Haushaltangehörigen für Freizeitfahrten zur Verfügung. Während ein Auto 4, 5 oder mehr Personen transportieren kann, sind beim ÖV die Abonnementstypen, welche den Transport von mehr als einer Person erlauben, weniger ausgeprägt. Zum Beispiel kann der Kauf eines GA den anderen Haushaltsangehörigen erlauben, zu reduzierten Kosten ein Partner- oder Familien-GA zu erwerben.

Die Entscheidung, ob die Ebene des Haushalts oder des Individuums im Vordergrund stehen soll, hat weitreichende Konsequenzen auf die nachgelagerten Entscheidungsmodelle. Wird die Haushaltsebene gewählt, ist der Mobilitätswerkzeug-Erwerb für den Haushalt zu modellieren, anschliessend ist der Haushalt nach Einzelpersonen für die NPVM-Personengruppen aufzuteilen. Folgende Grundsätze sind zu beachten:

- a) Die Ebenen Individuum und Haushalt sollten klar unterschieden werden. Wichtig ist, haushaltsbezogene Daten nicht ohne entsprechende Transformation mit Daten bezogen auf das Individuum zu verknüpfen.
- b) Ob man den Erwerb von Mobilitätswerkzeugen auf Haushalts- oder Individualebene modelliert, sollte nicht primär theoretisch begründet werden, sondern abhängig gemacht werden von der Belastbarkeit der konkret zu verwendenden Datensätze.
- c) Die Verwendung einer synthetischen Population für weitere Zwecke kann ein wichtiger Grund darstellen, eine haushaltsbasierte Population auch für die NPVM-Weiterentwicklung

anzustreben; namentlich das Wohnen ist eine klar der Haushaltsebene zuzuordnende Entscheidung.

- d) Im Bereich Mobilität liegen keine eigentlichen Haushaltsdatensätze vor. Namentlich ist bei Personenwagen keine Zuordnung des Echtbestandes der Motorfahrzeughalter zu Haushalten möglich, weil bei den kantonalen Strassenverkehrsämtern nur Halteradressen, aber keine weiter gehenden Personendaten erfasst werden. Auch der MZMV ist im Kern eine personenbezogene Erhebung. Der MZMV bietet aber Angaben zu allen Personenwagen des Haushalts (aber nicht zu allen ÖV-Abonnements des Haushalts) und zur Gesamtfahrleistung dieser Personenwagen im Vorjahr.

Sodann sind durchgehend der gleiche Begriff und die gleiche Definition zu verwenden, sowohl beim Zuteilungsmodell als auch bei den Distanzkosten. Dies betrifft Parameter wie das verfügbare Einkommen, sowie die korrekte Berechnung von GA-Kaufpreisen. Bei der Modellschätzung sind konsistente empirische Ausgangsdaten zu verwenden (wenn man den Autobesitz eines Individuums verfolgt, ergibt sich eine höhere Markentreue, als wenn man die Zeitreihe zum Autobesitz eines Haushaltes verwendet).

Wie erwähnt, ist die Haushaltsebene für andere Bereiche wie z.B. Wohnen unverzichtbar. Wenn man sich auf Anwendungen für die Verkehrsmittelwahl beschränkt, wird für die NPVM-Weiterentwicklung empfohlen, die Ebene „Individuum“ zu verwenden, weil der NPVM-Modellansatz im Ganzen die individuelle (und nicht die Haushalts-)Mobilität abbildet, und die wichtigsten Datensätze personenbezogen vorliegen (im Gegensatz zu Konsum [HABE-Datensatz] und Wohngebäude [GWR-Daten]). Da aber die Haushaltsebene beim Autokauf – sowie in geringerem Mass beim GA-Kauf – eine Rolle spielt, sollten namentlich Autokauf-Modelle auch Haushaltsattribute als unabhängige Parameter berücksichtigen, d.h. Autokaufmodelle sollten für verschiedene Haushaltstypen separat geschätzt werden. Entsprechende belastbare Daten sind nur über die MZMV-Rohdaten erhältlich; eine haushaltsbezogene Modellierung des Erwerbs von ÖV-Mobilitätswerkzeugen müsste auf GA- und Halbtaxabonnements-Kundendaten der SBB zurückgreifen.

Sollte aus übergeordneten Gründen die Verwendung der Haushaltsebene bevorzugt werden, ist es möglich, (a) eine synthetische Population zu erstellen, (b) den MZMV zu nutzen zur Modellschätzung für den Mobilitätswerkzeugerwerb auf Haushaltsebene; (c) aus den Haushalten dann die Personengruppen des NPVM abzuleiten.

5.5. Zu betrachtende Mobilitätswerkzeuge

5.5.1. Einteilung betreffend Autobesitz und -verfügbarkeit

Der Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) von BFS und ARE wird für die Weiterentwicklung des NPVM in seiner Version von 2015 zur Anwendung kommen. Bei einer vermehrten Verwendung (d.h. Parametrisierung von Zusammenhängen auf Basis der Rohdaten) des MZMV ist vorgängig zu prüfen, ob Subsamples weiterhin repräsentativ sind. Die ca. 57'000 Einzeldatensätze des MZMV stellen die beste zur Verfügung stehende Datenbasis für die Schätzung eines PW-Wahlmodells dar, sei dies für die Entscheidungsebene Individuum oder Haushalt.

Es wird empfohlen, nicht zwischen den Begriffen Autobesitz, Automitbesitz und ständiger Autoverfügbarkeit zu unterscheiden. Wir verwenden im Weiteren nur den Begriff „Auto vorhanden“.

Wie in Kap. 4.2 diskutiert, stehen keine Echtdaten zur Verfügung betreffend Zuordnung von Autos zu Haushalten. Wird deshalb als Betrachtungsebene jene des Individuums gewählt, so entfällt auch die Frage einer allfälligen Differenzierung zwischen Einauto- und Mehrauto-Haushalten. Zwar ist es denkbar, auf Basis der MZMV-Rohdaten ein Autobesitz-Haushaltsmodell zu schätzen und auf die ganze Schweiz anzuwenden, dies wäre aber wie bei jeder Modellschätzung mit Ungenauigkeiten verbunden und erschwert die nachfolgende Autokaufmodellierung, die dann ebenfalls Einauto- und

Mehrauto-Haushalte abbilden müsste. Dies wäre zwar möglich und solche Modelle werden für die Schweiz wohl auch zur Verfügung stehen (im Rahmen laufender Projekte für das Forschungsprogramm Energie-Wirtschaft-Gesellschaft/BFE und VSI/ASTRA), erscheint aber als unverhältnismässig aufwändig für die Zwecke des NPVM.

Die Parkplatz-Verfügbarkeit ist grundsätzlich stark ausschlaggebend für den Besitz und den Einsatz von Motorfahrzeugen. Parkplätze sind allgemein gesehen in ausreichender Menge vorhanden und deshalb meist kein einschränkender Faktor, für gewisse Wohn- und Arbeitsorte (namentlich in Kernzonen von Städten) aber mitunter auch sehr einschränkend. Grundsätzlich ist denkbar, analog zur zellengenauen Bereitstellung einer Kennzahl zur Abbildung der lokalen ÖV-Angebotsqualität, die Parkplatz-Verfügbarkeit (im Sinne einer „MIV-Angebotsqualität“) zu erheben, zu parametrisieren und bei der Autobesitz-Modellierung zu verwenden. Dem steht aber entgegen, dass der weitaus grösste Teil der Parkplätze sich auf Privatgrund befinden und somit statistisch nicht greifbar sind. Zusätzlich erschwerend wirkt, dass die lokale Parkplatz-Verfügbarkeit im MZMV nicht erhoben wird, die MZMV-Rohdaten aber zur Autobesitz-Modellierung die Basis darstellen würden. Es wird deshalb empfohlen, zuerst zu prüfen, ob es andere Quellen (z.B. GIS-basierte Auswertungen) gibt, welche die lokale Parkplatz-Verfügbarkeit bereitstellen können, und dann zu prüfen, ob sich diese als signifikant für den Autobesitz in den MZMV-Rohdaten erweist.

Zur motorisierten individuellen Mobilität gehören auch die Motorfahräder (oft dem Langsamverkehr zugeordnet), die Leichtmotorräder, die Motorräder sowie die Leichtmotorfahrzeuge. Aufgrund ihrer zahlenmässig geringen Relevanz wird empfohlen, wie bisher darauf zu verzichten, diese Fahrzeugkategorien als separate Verkehrsmittel abzubilden.

Die bestandsmässige und verkehrliche Bedeutung der Leichtmotorfahrzeuge (Fahrzeugkategorien L5e, L6e, L7e) wie z.B. den Renault Twizy ist zurzeit gering. Es wird empfohlen, die Leichtfahrzeuge nicht als separate Fahrzeugkategorie (d.h. als separates Verkehrsmittel) aufzunehmen. Sie sind zurzeit zahlenmässig irrelevant; sollte sich dies künftig ändern, wären sie als kleine Personenwagen abzubilden, nicht als separater Verkehrsträger (auch wenn sie strassenverkehrs-zulassungsrechtlich keine Personenwagen sind).

Aus den vorgängigen Punkten leitet sich die **Empfehlung** ab, im Bereich MIV nur zwischen „kein Auto“ und „Auto vorhanden“ zu unterscheiden.

5.5.2. Einteilung betreffend ÖV-Abonnemente-Besitz

Für die Moduswahl-Kostenmodellierung ist der ÖV-Abobesitz relevant, weil dadurch die ÖV-Distanzkosten massgeblich beeinflusst werden. Ohne Abobesitz wird eine ÖV-Einzelfahrkarte zu Grunde zu legen sein, deren Kosten sich auch entsprechend in den ÖV-Distanzkosten zeigen (siehe dazu Kap. 5.8).

Das übertragbare, nicht-persönliche GA wird vor allem von Gemeinden (sowie Verbänden und andere Institutionen) erworben und tagesweise der Bevölkerung angeboten. Es nimmt dann die Form einer preislich nochmals vergünstigten Tageskarte an. Auch wenn sich gewisse Personen auf den Bezug solcher kommunalen Tages-GA-Karten „spezialisiert“ haben und dies im Einzelfall ein ÖV-Abonnement ersetzen kann, werden Tages-GAs hier doch zu den Tageskarten und damit zu den Fahrkarten für die Einzelfahrt gezählt.

Die in der Schweiz angebotenen ÖV-Abonnemente sind sehr unterschiedlich. Für die Zwecke des NPVM ist es unvermeidlich, gewisse Generalisierungen vorzunehmen und die lokalen ÖV-Abonnemente auf generische Typen zurückzuführen. Grundsätzlich lassen sich die folgenden ÖV-Abotypen unterscheiden:

- Lokale und Tarifverbund¹⁷-Abonnemente;
- Mischformen zwischen lokalen und nationalen Abonnements:
 - Strecken-Abo
 - Inter-Abo (Kombination aus Strecken-Abo und Verbund-Abo)
- Nationale Abonnemente
 - Junior- und Enkelkarte
 - Gleis 7
 - Abend-GA für Erwachsene (wird zurzeit von der SBB erprobt)
 - Halbtax-Abo
 - General-Abonnemente¹⁸ (GA) für Erwachsene, Paare, Familien, Senioren, Jugendliche, Studierende, Kinder, Behinderte

ÖV-Abonnemente mit zeitlicher Gültigkeitsbeschränkung (Gleis 7, Abend-GA) können mit dem in diesem Bericht skizzierten Modellansatz nicht direkt abgebildet werden. Approximativ könnten die Kosten solcher Abonnementstypen im Rahmen der Modellierung der Spitzenstunde abgebildet werden, denn die Gültigkeitsbeschränkung ist meist genau so ausgestaltet, dass sie die Spitzenstunde ausschliesst.

Im vorliegenden Beitrag werden die Generalabonnemente für Hunde sowie für Velos nicht weiter betrachtet. Zwar ist der Hundebesitz mutmasslich ein wichtiger Faktor für die Wahl des Autos als Verkehrsmittel, und kann das Mitführen von Fahrrädern namentlich in Zügen für gewisse Wegeketten sehr erleichternd sein, quantitativ sind sie jedoch von geringer Relevanz und sollten daher im NPVM nicht abgebildet werden.

Es wird empfohlen, auf die Abbildung von Junior- und Enkel-Karten zu verzichten. Diese Abonnemente sind nur in Begleitung eines Erwachsenen gültig, sie spiegeln sich deshalb im ÖV-Abo-Besitz der Erwachsenen hinreichend wieder.

Es wird empfohlen, die Strecken-Abos und Inter-Abos nicht als separate ÖV-Abo-Typen zu führen. Sie sind zahlenmässig vernachlässigbar und modellmässig sehr schwierig abzubilden. Implikation der Vernachlässigung ist, dass in den zu verwendenden Rohdatensätzen (MZMV sowie SBB-Kundendaten) die Inhaber von Strecken- und Inter-Abos auch erhoben sind, und dann den GA- oder den Verbundabo-Besitzern zugeordnet werden müssen.

Auch wird empfohlen, auf die Abbildung des Halbtax-Abonnements als separate ÖV-Abo-Kategorie ersatzlos zu verzichten. Der Besitz eines Halbtax-Abonnements ist weit verbreitet. Für in der Schweiz wohnhafte Personen lohnt sich der Erwerb eines Halbtax-Abonnements bereits dann, wenn innert 12 Monaten 2 bis 3 längere Zugfahrten unternommen werden. Entsprechend wird empfohlen für die ÖV-Distanzkosten für die Gruppe „ohne ÖV-Abo-Besitz“ den Halbtax-Kostensatz zu unterlegen.

Wie oben aufgelistet, werden die General-Abonnemente für verschiedene Haushaltstypen (Single, Paare, Familien) und Altersstufen (Kinder, Jugendliche, Studierende, Erwachsene, Senioren) angeboten. Es wird empfohlen, die altersmässige Differenzierung nach Möglichkeit (mindestens die Altersstufen Junior, Erwachsene, Senior) aufzunehmen. Implikation der Vernachlässigung der Haushaltstypen ist, dass nicht der Preis eines Einzel-GA für Erwachsene eingesetzt werden darf, sondern ein Mischpreis, welcher sich aus dem marktbasierten Mittel der verschiedenen GA-Typen ergibt (Mischung aus Einzel-GA, Paar-GA, Familien-GA für Elternteile).

Es gibt über 20 Tarifverbünde in der Schweiz, mit stark unterschiedlicher Grösse, Tarifstruktur und Gliederung in Zonen. Allen gemeinsam ist, dass sie einem lokalen GA entsprechen (weshalb das „BÜGA“ genannte Bündner General-Abonnement für die vorliegende Auslegeordnung auch zu den

¹⁷ Der ZVV als in der Schweiz einziger Verkehrsverbund wird für die vorliegende Arbeit zu den Tarifverbünden gezählt.

¹⁸ Für Personen ohne festen Wohnsitz in der Schweiz gibt es temporäre GA-Angebote (SwissPass), welche hier nicht weiter betrachtet werden.

Tarifverbunden gezählt wird). Tarifverbünde weisen – in Bezug auf die Moduswahl-Kostenmodellierung – folgende relevante Eigenschaften auf:

- In den Kernzonen des Tarifverbunds sind die Jahreskosten gering, die Verbreitung ist hoch, aber auch der Anteil der so abgedeckten Mobilität an der Jahresmobilität ist im Durchschnitt gering;
- in den Aussenzonen des Tarifverbunds kommen einerseits rein lokale Jahresabonnemente für die Lokalzone vor, andererseits für Berufspendler Mehrzonen-Abonnemente, welche meist die Kernzone einschliessen. Im letzteren Fall sind die Jahreskosten höher (und kommen bei grossen Tarifverbunden mit über CHF 1800 jährlich bereits den Jahreskosten von GA Partner [CHF 2560] und GA Familia Partner [CHF 2060] sehr nahe). Ihre Verbreitung ist geringer, dafür der Anteil an der Jahresmobilität im Durchschnitt höher.

Es gibt grundsätzlich zwei Optionen zur Abbildung der diversen Tarifverbünde im Rahmen des weiter zu entwickelnden NPVM:

- (A) Vereinfachte, generische Abbildung der Tarifverbünde, indem alle Zonenstrukturen auf eine zweistufige Hierarchie bestehend aus „Kernzone“ und „übriges Zonengebiet“ transformiert werden (selbstredend wäre auch eine dreistufige Hierarchie möglich);
- (B) Möglichst detailgetreue Abbildung aller Tarifverbünde, ihrer Zonen und ihrer Tarife.

Bei der Option (B) sind für sehr viele Möglichkeiten von Mehrzonenabonnementen (in der Gesamtzahl würden sich mehrere Tausend mögliche Tarifverbund-Abonnemente ergeben) die entsprechenden Kaufkosten sowie ÖV-Distanzkosten in das Modell einzubringen. Die Option (A) ist dadurch gekennzeichnet, dass vorgängig ein Aufwand zur Überführung der Tarif- und Zonenstruktur eines jeden Tarifverbunds geleistet werden muss, dann aber die Komplexität der ÖV-Distanzkosten deutlich geringer ausfällt.

Es wird empfohlen, die regionalen Tarifverbünde allesamt und vollständig, aber in ihrer Kostenstruktur und Zonenausgestaltung in vereinfachter generischer Form abzubilden (Option A). D.h. die einzelnen regionalen Tarifverbünde würden wie folgt abgebildet:

- Vollständige Abbildung der regionalen Tarifverbünde betreffend:
 - Räumliche Ausdehnung;
 - Tarifhöhe (es wird nur das Jahresabonnement betrachtet), je für Junior/Erwachsene/Senior (gleiche Altersgrenzen wie für GA).
- Vereinfachte regionale Darstellung betreffend:
 - Anzahl Zonen. Diese werden reduziert auf eine Kernzone („Tarifverbund Kern“) und das ganze abgedeckte Tarifverbund-Gebiet („Tarifverbund ganz“);

Die Abbildung der Tarifverbünde auf die NPVM-Zellen ist noch durchzuführen. Räumliche Überschneidungen sind zu vermeiden, jede NPVM-Zelle ist nur einem Tarifverbund zuzuordnen. Weist ein Tarifverbund mehr als eine klare Kernzone auf, wird empfohlen, sie als zwei getrennte Tarifverbünde abzubilden.

Daraus ergibt sich die **Empfehlung** für vier Abstufungen bzgl. des Besitzes von ÖV-Mobilitätswerkzeugen: „kein Abo“, „Tarifverbund Kern“, „Tarifverbund ganz“ und „GA“.

Das heutige NPVM teilt die Zellen, bzw. die in den Zellen erzeugte Verkehrsnachfrage, auf mehrere Personengruppen auf. Für die Moduswahlmodellierung wird empfohlen, künftig eine weitere Differenzierung nach Mobilitätswerkzeugbesitz-Untergruppen einzuführen. Modelltechnisch entspricht dies einer 8-fachen (für die Entscheidungsebene Individuum, siehe Abbildung 3) oder 12-fachen (für die Entscheidungsebene Haushalt, siehe Abbildung 4) Unterteilung der Zellen nach Mobilitätswerkzeugbesitz; für diese Untergruppen kommen unterschiedliche Kostenstrukturen zur Anwendung.

Dimension MIV	Dimension ÖV			
	kein Abo	Tarifverbund Kern	Tarifverbund ganz	GA
kein Auto Auto vorhanden				

Abbildung 3: Unterteilung der Zellen nach Mobilitätswerkzeugbesitz (Entscheidungsebene Individuum)

Dimension MIV	Dimension ÖV			
	kein Abo	Tarifverbund Kern	Tarifverbund ganz	GA
kein Auto				
1 Auto vorhanden				
2+ Autos vorhanden				

Abbildung 4: Unterteilung der Zellen nach Mobilitätswerkzeugbesitz (Entscheidungsebene Haushalt)

5.6. Modellierung des Erwerbs von Mobilitätswerkzeugen

5.6.1. Gegenseitige Abhängigkeit von MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeugbesitz

Die Entscheidung, ein Auto zu besitzen, und die Entscheidung, ein ÖV-Jahresabonnement zu erwerben, sind im realen Leben oft voneinander abhängig. Beide Entscheidungen führen dazu, dass sich die Distanzkosten für den jeweiligen Verkehrsträger deutlich ändern, was die Entscheidung für den Erwerb von weiteren Mobilitätswerkzeugen für alle übrigen Verkehrsmittel unmittelbar beeinflusst. Dies legt nahe, dass der Erwerb von MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeugen in einem einzigen, integrierten Modell abgebildet werden müsste. Dies würde ein komplexes „nested logit“-Modell erfordern. In der wissenschaftlichen Literatur findet man aber in der Mehrzahl die getrennte Modellierung des Erwerbs von ÖV- und MIV-Mobilitätswerkzeugen. Im Folgenden werden die Hauptmerkmale der beiden Vorgehensweisen gegenübergestellt:

- Die einstufige, gleichzeitige, „parallele“ Modellierung des Mobilitätswerkzeugbesitzes ordnet den Individuen (oder Haushalten) „in einem Durchgang“ ein ÖV-MIV-„Paket“ inkl. dazugehörigen jährlichen Fahrleistungen zu; nachgelagert ist dann noch zu spezifizieren, welche Automodelle konkret erworben werden (allenfalls sind auch die erworbenen ÖV-Abonnemente noch zu konkretisieren);
- Die zweistufige, zeitlich nacheinander erfolgende, „serielle“ Modellierung ordnet den Individuen (oder Haushalten) zuerst eine MIV-Fahrleistung und ein Auto-Besitz zu (und nachgelagert die konkreten Automodelle). Dann, in Abhängigkeit des Haushaltstyps und des Autobesitzes, werden eine ÖV-Fahrleistung und die erworbenen ÖV-Mobilitätswerkzeuge zugeteilt.

Die „parallele“ Modellierung bedeutet, dass die Modelle die 8 (wenn Entscheidungsebene Individuum) oder 12 (wenn Entscheidungsebene Haushalt) Kombinationen aus Kap. 5.5 als abhängige Variable haben; weil auch noch nach Jahresfahrleistungsgruppen unterschieden werden müsste, führt dies zu ca. 40 diskreten Ausprägungen der Zielvariable. Die Modelle wären getrennt zu schätzen mindestens für die Sprachregionen, sowie für Raumtypen (z.B. Stadt/Agglo/Land), d.h. die CH wäre einzuteilen in mindestens ca. 10 Sprachregion-Raumtyp-Subsamples. Zusätzlich sollten noch die Einkommenskategorien berücksichtigt werden. Dies könnte für bestimmte Sprachregionen und Raumtypen zu einer geringen Anzahl MZMV-Datensätze führen. Hier könnte ein Pooling der MZMV 2010 und MZMV 2015 Abhilfe schaffen (so dass total über 100'000 Rohdatensätze vorliegen).

Die „serielle“ Modellierung geht den Erwerb der Mobilitätswerkzeuge getrennt an. Dabei wird zuerst der Besitz (falls Entscheidungsebene Individuum: 0/1 Auto; falls Entscheidungsebene Haushalt: 0/1/2 oder mehr Autos) sowie (nachgelagert) der konkrete Erwerb von Automodellen modelliert (mit

unabhängigen Variablen wie ÖV-Angebotsqualität am Wohnort und ggf. Parkplatzverfügbarkeit am Wohnort); die Kopplung zwischen MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeug-Erwerb erfolgt dann im Rahmen der Modellierung des Erwerbs von ÖV-Mobilitätswerkzeugen.

Für die Entscheidung zwischen paralleler und serieller Modellierung sind die folgenden Aspekte ausschlaggebend.

- a) Wie jedes statistische Regressionsmodell müsste ein paralleles Modell zur gleichzeitigen Abbildung des Erwerbs von ÖV- und MIV-Mobilitätswerkzeugen spezifisch für die aktuellen (und damit hoffentlich auch künftigen) schweizerischen Verhältnisse geschätzt werden. Ein solches Modell liegt zurzeit nicht vor. Es liegt auch für andere europäische Länder nicht vor; zwar gibt es in der wissenschaftlichen Literatur immer wieder Publikationen zu solchen nested-logit-Modellen auf der Grundlage kleiner Stichproben, die Schätzung solcher integrierten Logit-Modelle ist aber schwierig und führt zu sehr vielen Voraussetzungen betreffend des verwendeten Datensatzes, welche nur annähernd erfüllt sind.
- b) Das Auto ist nahezu allgegenwärtig und trägt den weitaus grössten Teil des Personenverkehrs. Der überragenden (und in jedem Szenario auch 2040 noch stark vorherrschenden) Stellung des Personenwagens entsprechend, stellt sich die Frage des Erwerbs eines Autos nahezu allen Personen zwischen 18 und ca. 80 Jahren. Die Kosten des Erwerbs eines noch über viele Jahre fahrtüchtigen Gebrauchtwagens sind unter CHF 10'000. Die einzigen Faktoren, welche den Erwerb eines Autos verunmöglichen, sind (a) dauerhafte Einschränkungen der Fahrtüchtigkeit (durch Behinderung oder Krankheit), (b) nicht vorhandene Parkplätze am Wohnort, (c) persönliche Einstellungen, sowie (d) wenn kein Führerausweis erworben wurde (der Erwerb eines Führerausweises kostet mehrere Tausend Franken; auch trauen sich Personen ab ca. 40 Jahren den Erwerb des Führerausweises oft nicht mehr zu). Bei Personen unterhalb der Armutsgrenze können auch (e) die finanziellen Verhältnisse zum Verzicht auf Autobesitz führen. Auch wenn der Erwerb eines Gebrauchtwagens finanziell fast immer möglich ist, betragen die Betriebskosten doch mehrere hundert Franken pro Monat, zzgl. allfälliger Parkierungskosten. Die Dominanz des Autos ist in Wohlfahrtsgesellschaften so hoch, dass der „Spiess umgedreht“ wird: Die Forschung geht zunehmend von der Prävalenz des Autos aus und wendet sich der Frage zu, warum Haushalte wenig Autos oder gar kein Auto besitzen (Scheiner und Holz-Rau 2012; Delbosc und Currie 2013). Sogar für China fängt die Forschung bereits an, Gründe für den Nichterwerb von Autos zu modellieren (Gao et al. 2014).

Solange „nur“ eine Angebotspalette an ÖV-Abotypen zu modellieren ist, welche weitgehend dem heutigen Angebot entspricht, ist die Kopplung zwischen MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeugbesitz in den Marktdaten abgebildet; interpolierende ÖV-Mobilitätswerkzeug-Erwerbsmodelle auf Basis MZMV (und ggf. SBB-GA-Kundendaten) gewährleisten dann „automatisch“ die Abbildung dieser Kopplung, sei es im Rahmen einer zweistufigen (seriellen) Modellierung (zuerst MIV, dann ÖV in Abhängigkeit vom Autobesitz), sei es in einer einstufigen (parallelen) Modellierung. Der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen ist dann unwesentlich, bzw. bei geeigneter Einbindung erstens der ÖV-Angebotsqualität (bei der MIV-Modellierung) und zweitens des bereits vorhandenen Autobesitzes (bei der ÖV-Modellierung) erlaubt die serielle Modellierung gleichwertige Modell-Vorhersageleistungen bei gleichzeitig einfacherer Modellschätzung und geringeren Anforderungen an die Ausgangsdaten.

Wenn aber gänzlich neue ÖV-Mobilitätswerkzeuge abgebildet werden müssen, ist keine blosse „Interpolation“ der MZMV-Daten mehr möglich. In diesem Fall sind prognosefähige Modelle zu entwickeln, welche nicht bloss aufgrund der MZMV-Daten geschätzt werden können, diesen für die heutigen Randbedingungen aber in etwa reproduzieren können sollten. Solche prognosefähige Modelle weisen mit Vorteil einen parallelen Ansatz auf.

5.6.2. Erwerb von Autos

Im Bereich des „car choice modeling“ gibt es verschiedene vorherzusagende Grössen: Kauft ein Haushalt/Individuum überhaupt ein Auto; welches Auto wird erworben; wie lange dauert der Besitz dieses Autos bis es wieder abgestossen wird; wie viele Kilometer werden mit dem Auto insgesamt (über die Besitzdauer) zurückgelegt. Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf Autobesitz- und Autoerwerbs-Modellen.

Autobesitz-Modelle (englisch car ownership: „kein/ein/mehrere Autos?“): Ob, und wie viele Autos ein Haushalt oder ein Individuum insgesamt besitzt, hängt weitgehend ab vom Haushaltstyp (je mehr Personen insgesamt, und je mehr Erwachsene, desto mehr Autos), von der Einkommensklasse, von der Parkplatzverfügbarkeit am Wohnort sowie von der ÖV-Angebotsqualität am Wohnort. Autobesitz-Modelle sind deshalb stark vom lokalen Kontext abhängig, es gibt keine Modelle in der wissenschaftlichen Literatur, welche Allgemeingültigkeit beanspruchen könnten. Die Güte von Autobesitz-Modellen hängt weitgehend von der Güte der zur Verfügung stehenden Daten ab. In der Schweiz liegt mit den MZMV-Rohdaten ein sehr guter Datensatz vor. Es wird empfohlen, auf dieser Basis für das weiter zu entwickelnde NPVM ein (von der Modellstruktur her sehr einfaches) Logit-Modell zu schätzen. Wird (wie empfohlen) das Individuum als Betrachtungsebene gewählt, wird weitergehend empfohlen, nur die beiden Fälle „kein Auto“ und „ein Auto“ zu unterscheiden (ignoriert, dass eine Person auch mehr als ein Auto erwerben kann). Werden die Haushalte als Betrachtungsebene gewählt, wird empfohlen, die drei Fälle „kein Auto“, „ein Auto“ und „mehr als ein Auto“ zu unterscheiden (ohne Fallunterscheidung für zwei Autos, drei Autos, usw.).

Autoerwerb-Modelle (englisch car choice: „welches Auto?“): Klassische Parameter bei der Autoerwerb-Modellierung sind die Kaufkosten, die Halterkosten (Betriebs-/Unterhaltskosten), die Treibstoffkosten, eventuell getrennt die jährlichen Motorfahrzeug-Steuerkosten, und mindestens ein (meistens mehrere) Nutzenparameter (beispielsweise Länge, Ladevolumen, Grössenklasse, Zeit um von 0 auf 100 km/h zu beschleunigen, usw.). Meist werden nur einige (typischerweise 4 bis 8) „Standardautos“ in verschiedenen Grössen unterschieden. Dies, obwohl der Neuwagenkäufer aktuell aus über 6000 unterschiedlichen Neuwagenmodellvarianten auswählen kann (bzw. muss). Der Grund für die sehr starke Vereinfachung von 6000 auf unter 10 Automodelle liegt darin, dass die entsprechenden Logit-Modelle meist auf Ausgangsdaten mit unvollständigen Autokenngrössen geschätzt werden. Für die Zwecke der Verkehrsmodellierung ist die Differenzierung von 4 bis 8 Grössenklassen hinreichend, für energiepolitische Fragestellungen jedoch unzulänglich, da die Unterschiede des Energieverbrauchs innerhalb der Autogrössenklassen grösser sind als die Unterschiede zwischen den Klassen.

Das wissenschaftliche Feld der Autokaufmodellierung ist breit, an dieser Stelle wird auf eine umfassende Auslegeordnung verzichtet; für eine Gegenüberstellung der Vorteile von aggregierten und mikrosimulierten Modellansätzen siehe Müller et al. (2009). Neueste wissenschaftliche „Trends“ in der Autoerwerb-Modellierung sind die (vorgängig bereits erwähnte) Umkehrung der Fragestellung auf „car deficient households“ (Gründe für den Nichtbesitz von Autos), die Rolle und Modellierung von psychologischen Faktoren (Einstellungen, persönliche und soziale Normen; siehe Peters et al. 2015), die Unterschiede zwischen den Geschlechtern, sowie die grössere Nähe zur Realität (und damit verbunden die vermutet höhere Prognosefähigkeit) von zweistufigen Autokauf-Modellen. Für die Zwecke der Verkehrsmodellierung bringen diese neuesten Forschungsrichtungen jedoch keinen Zusatznutzen.

Zwei Aspekte sind im Rahmen der Moduswahl-Kostenmodellierung besonders relevant: Die Frage nach der vollen Kostenrationalität, sowie nach der unterschiedlichen Wahrnehmung und Gewichtung von fixen und variablen Kosten.

Volle vs. eingeschränkte Rationalität: Die volle Rationalität geht von der vollständigen Information aus, die eingeschränkte Rationalität („bounded rationality“) unterstellt das Paradigma, dass die Konsumenten Verfahren verwenden, welche den Entscheidungsaufwand reduzieren ohne wesentlichen

Verlust. Meist kommen dabei vergangenheitsbasierte Erfahrungswerte zum Einsatz, wie sie sich in Treueraten (Markentreue, Treibstofftypentreue, Getriebeartentreue, Autogrössenklassentreue) äussern. Der wesentliche Unterschied ist, dass Politikmassnahmen und neue Technologien bei eingeschränkter Rationalität eine reduzierte Wirkung aufweisen bzw. weniger schnell in den Markt eindringen, weil die Konsumenten nicht bei jeder Entscheidung alle Informationen einbeziehen.

Bedauernsminimierung statt Nutzenmaximierung: Das Paradigma hinter allen Wahlmodellen (Modus-, Zeit-, Routenwahl, usw.) ist die Maximierung des potenziellen Nutzens – Random Utility Maximisation (RUM). In letzter Zeit wird vermehrt untersucht, in wie weit die Minimierung des potenziellen Bedauerns – Random Regret Minimisation (RRM) – das Verkehrsverhalten möglicherweise besser beschreibt. RRM-Modelle sind bis anhin noch nicht für grosse nationale Verkehrsmodelle eingesetzt worden. Für das niederländische LMS (Landelijk Model Systeem) werden zurzeit mehrere wichtige Teilmodelle mit einem RRM- statt RUM-Ansatz neu geschätzt (TU Delft, im Rahmen des VIDI-Programms; zusammen mit Prof. de Jong, ITS Leeds). Es wird empfohlen, bei der Entwicklung neuer Entscheidungsmodelle für das weiter zu entwickelnde NPVM die parallele Schätzung gewisser Teilmodelle nach dem RRM- statt RUM-Ansatz zumindest prüfen zu lassen.

Fixe vs. variable Kosten: Bei den Betriebs- und Unterhaltskosten eines Autos lassen sich ca. 59% aller Kosten zu den Fixkosten zählen (Amortisation, Versicherungsprämien, Steuern, periodischer Unterhalt, Abgaswartung, usw.), die übrigen 41% zu den variablen Kosten (Treibstoffkosten, Reifen- und Betriebsmittelkosten, Reparaturen, fahrleistungsabhängiger Unterhalt). Konsumenten beurteilen diese zwei Kostenarten meist sehr unterschiedlich. Die fixen Kosten werden als nicht beeinflussbar wahrgenommen und deshalb untergewichtet, die variablen Kosten, namentlich die Treibstoffkosten, werden im Vergleich übergewichtet. Mehrere potenzielle Politikansätze sehen vor, den Anteil der variablen Kosten zu erhöhen, um damit dem „flat rate“-Effekt von sehr niedrigen marginalen Kosten der MIV-Nutzung entgegenzuwirken, z.B. über fahrleistungsabhängige Versicherungsprämien, Strassengebühren und Motorfahrzeugsteuern.

Möglichkeit der Zuweisung eines Echtbestandes: Für die meisten Zwecke der Verkehrsmodellierung ist es nicht notwendig, Autogrössenklassen zu differenzieren. Wie bereits erwähnt, sind die Unterschiede in den Treibstoffkosten innerhalb der Autogrössenklassen grösser als zwischen den Klassen. Im Durchschnitt machten die Treibstoffkosten 2014 nur 14% aller Kilometerkosten aus. Es zeigen sich deshalb für die verschiedenen Autogrössenklassen keine Unterschiede in den Distanzkosten aufgrund der Treibstoffkosten (sehr wohl aber aufgrund der Amortisation des Kaufpreises). Es gibt auch keine zur Debatte stehenden Politikmassnahmen, welche nach Autogrössenklasse als Hauptkriterium differenzieren würden. Denkbar sind aber Ansätze aufgrund anderer Steuerungsgrössen, z.B. des Energieträgers (z.B. Strom), der Energieeffizienz (z.B. g CO₂/km-Effizienzwert) oder anderer Umweltauswirkungen (analog der deutschen Umweltzonen). Es ist nicht möglich, bereits heute die künftig relevanten Steuerungsgrössen abschliessend aufzuzählen. Deshalb soll das weiterzuentwickelnde NPVM hier nicht auf Vorrat weiter entwickelt, mögliche Erweiterungen aber offen gehalten werden. Die Möglichkeit der Zuweisung eines Echtbestandes an Fahrzeugen (mit interessierenden Steuerungsgrössen je Fahrzeug) stellt sicher, dass das NPVM für künftige Fragestellungen offen bleibt.

Es wird empfohlen, auf die Differenzierung nach Autogrössenklassen zu verzichten, namentlich auch betreffend der Distanzkosten. Um Analysen anderer Bundesämter für Fragen betreffend Umwelt/Luft/Lärm/Klima zu ermöglichen, soll es aber möglich sein, eine Echtflotte oder eine fortgeschriebene/mikrosimierte Flotte von ca. 5 Mio. PKW und übrige Strassenfahrzeuge einzulesen und den Zellen/Untergruppen zuzuordnen. Dann können den Fahrzeugen der Flotte – aufgrund ihrer Steuerungsgrössen, auf welche Politikmassnahmen wie z.B. abgestufte Road-Pricing-Tarifsätze einwirken – individuelle Distanzkosten zugeordnet werden.

5.6.3. Erwerb von ÖV-Abos

Wie vorgängig erwähnt, erfolgt der Erwerb von ÖV-Mobilitätswerkzeugen nachgelagert zum Erwerb von MIV-Mobilitätswerkzeugen (bei diesen geht jedoch die ÖV-Angebotsqualität bereits als Eingangsgrösse ein). Das Modell für den Erwerb von ÖV-Abonnements sollte deshalb die Kopplung zwischen MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeugen abbilden. Klar ist, dass das weiter zu entwickelnde NPVM gemäss Anforderungsprofil zwingend auch heute nicht existierende ÖV-Abo-Typen abzubilden vermögen sollte (die blosser Interpolation von MZMV-Rohdaten und SBB-Kundendaten genügt in solchen Fällen nicht), so dass im Grundsatz ein prognosefähiges ÖV-Mobilitätswerkzeug-Erwerbsmodell benötigt wird.

Es lassen sich demnach zwei Fälle unterscheiden:

- „Kurzfristig“ (d.h. solange die zu modellierende Palette an ÖV-Abonnements dem heute existierenden Angebot weitgehend entspricht) ist die gegenseitige Abhängigkeit von ÖV- und MIV-Mobilitätswerkzeug-Besitz in den MZMV-Rohdaten abgebildet bzw. bilden auf dieser Basis geschätzte Regressionsmodelle die Korrelation korrekt ab. Insgesamt soll selbstredend die GA- sowie Tarifverbund-Abo-„Flotte“ gemäss heutigen Marktdaten zugeteilt werden (über Kalibrierung; diese Kalibrierung erlaubt auch, allfällige systematische Abweichungen von der Repräsentativität im MZMV-Rohdatensatz über Gewichtung zu kompensieren);
- „Langfristig“ (d.h. falls die zu modellierenden ÖV-Abo-Typen sich wesentlich von den heutigen unterscheiden) sollte ein prognosefähiges Modell für den ÖV-Abo-Erwerb geschätzt werden, welches auch das etwaige Vorhandensein eines Autos als unabhängige (Input-) Variable berücksichtigt. Es sind also entsprechende noch zu entwickelnde Modelle einzusetzen, welche theoriebasiert sind, sowie die wesentlichen Zusammenhänge und Gesetzmässigkeiten aus der Mobilitätsverhaltensforschung kausal abbilden. Solche Modelle sollten (a) die ÖV-MIV-Mobilitätswerkzeugbesitz-Koppelung wo übertragbar aus dem MZMV beziehen, (b) die MIV-Mobilitätswerkzeuge zuteilen; (c) die heutige Verteilung an ÖV-Abonnements gemäss MZVM gut reproduzieren können, (d) dann konditional, den jeweils noch anwendbaren Randbedingungen aus (a) gehorchend, die ÖV-Mobilitätswerkzeuge zuteilen.

5.7. Modellierung der Distanzkosten im MIV, je Fahrzeuggruppe

Die Distanzkosten im MIV sind untenstehend illustrativ gezeigt. Im Gegensatz zum heutigen NPVM sollen sie künftig einen nicht-linearen Verlauf (in Abhängigkeit von der Distanz) aufweisen.

Zudem sollen neu die Distanzkosten auch von Fahrzeug-Eigenschaften abhängig gemacht werden können. Die Fahrzeuge wären entsprechend den Untergruppen zuzuteilen. Hier werden als Beispiel die Elektrofahrzeuge separat behandelt, was sicherlich gerechtfertigt ist, so lange kein Road Pricing eingeführt ist und die Elektroautos damit ihre steuerlichen Vorteile (keine Mineralölsteuer) ganz oder teilweise (ab Moment der Einführung einer Elektroauto-Abgabe) geniessen.

Für die CarSharing-Kosten wird hier exemplarisch ein Stundentarif von CHF 3 und ein Kilometer-Tarif von CHF 0.70 unterstellt. Als mittlere Fahrtlängen werden 5 km (bis 7 km), 14 km (8 bis 20 km) und 40 km (ab 21 km) angenommen.

Kosten pro km	bis 7 km	8 bis 20 km	ab 21 km
kein PKW = Taxi	3.40	2.63	2.35
CarSharing	2.7	2.53	2.40
Elektroauto	0.08	0.08	0.08
Benzin/Diesel rational	0.50	0.50	0.50
Benzin/Diesel wahrgenommen	1.10	0.71	0.50

Tabelle 8: Distanzkosten MIV je Fahrzeuggruppe (illustrativ)

Für die Weiterentwicklung des NPVM wird empfohlen, anstelle der heutigen mittleren Kostensätze neu sowohl für MIV wie für ÖV distanzabhängige Kilometerkosten vorzusehen, in Abhängigkeit des Verkehrsmittels sowie des Mobilitätswerkzeugbesitzes.

5.8. Modellierung der Distanzkosten im ÖV, je Tarifgruppe

In Gegensatz zum heutigen NPVM sollen die Kilometerkosten im ÖV neu distanzabhängig sein, d.h. für grössere Distanzen nehmen die Kilometerkosten ab. Damit können auch die Transaktionskosten (z.B. Billettkauf) mit abgebildet werden. Wie bereits vorgängig erwähnt, wird empfohlen für längere Distanzen generell die HTA-Preise zu unterlegen. HTA werden damit beim ÖV-Abo-Besitz nicht separat abgebildet, sondern vorausgesetzt. Die Distanzabhängigkeit ergibt sich in den Tarifverbünden über die sinkenden Preise pro zusätzlicher Zone. Nachstehende Tabelle zeigt die exemplarische Übersicht; die genaue Kostenstruktur der Tarifverbünde (Kernzone sowie ganzes Gebiet) ist zu erheben.¹⁹

	Tarifverbund Kernzone	Tarifverbund restliches Gebiet	übrige CH bis 80 km	übrige CH ab 80 km
Nichts	0.40	0.25	0.21	0.17
ÖPNV-Kernzone	0	0.25	0.21	0.17
ÖPNV-Tarifverbund	0	0	0.21	0.17
GA	0	0	0	0

Tabelle 9: Distanzkosten ÖV je Tarifgruppe (illustrativ)

Die SBB berechnen ihre Tarife zwar über die Tarifkilometer, diese weichen jedoch ab von den effektiven Kilometern; bei höherem Komfort und dichterem Fahrplan entspricht ein effektiver Kilometer mehr als einem Tarifkilometer („Distanzzuschläge“ gemäss Distanzzeiger SBB, Stand vom 14.12.2014). Es kommt jedoch kein „Tarifknick“ zur Anwendung, jeder Tarifkilometer kostet gleich viel: Die Tarife werden anhand der Tarifkilometer (T603/T604) sowie der Preisliste für gewöhnliche Billette (T600) berechnet.

Es kann jedoch argumentiert werden, dass bei längeren Distanzen vermehrt Tageskarten und Sparbillette zum Einsatz kommen, so dass die Kilometerkosten sinken. Illustrativ wurde hier eine Grenze bei ca. 80 km angenommen. Genauere Informationen sind evtl. über die Erhebungen der SBB zu den Fahrgästen und der Verwendung der Fahrausweise erhältlich.

¹⁹ Bemerkung: Die Kernzonen und übrigen Gebiete der ÖPNV-Tarifverbünde können unterschiedliche räumliche Ausdehnungen haben. Dies bedeutet kein zusätzlicher Rechenaufwand für das Modell.

5.9. Fazit

Innerhalb des gesetzten Rahmens lassen sich die nachfolgenden Empfehlungen formulieren. Für die NPVM-Weiterentwicklung ist eine Verbesserung der Abbildung der Kosten der Verkehrsmittelwahl als prioritär zu bezeichnen.

Die Anforderungen des ARE betreffend Anwendungsbereich des NPVM führen dazu, dass eine zweistufige Kostenmodellierung notwendig erscheint: „Erwerb“ von Mobilitätswerkzeugen im ersten Schritt und Verkehrsmittelwahl auf Basis der Grenzkosten (bei gegebenem Besitz an Mobilitätswerkzeugen) in einem zweiten Schritt.

Im weiter entwickelten NPVM soll der erste Schritt des „Erwerbs“ von Mobilitätswerkzeugen auch für künftige, heute nicht existierende Mobilitätswerkzeuge möglich sein (bzw. unter Weglassung heutiger Mobilitätswerkzeuge wie das GA). Es ist deshalb ein im Grundsatz prognosefähiges Modell nötig, welches für heutige Mobilitätswerkzeuge und deren Verteilung in der Gesamtbevölkerung validiert und kalibriert ist.

In der Realität erfolgt der Mobilitätswerkzeugerwerb für MIV- und ÖV-Mobilitätswerkzeuge in gegenseitiger Abhängigkeit, also parallel. Für die NPVM-Weiterentwicklung wird empfohlen, getrennte Modelle zu verwenden, bei welchen zuerst, in Abhängigkeit vom Haushaltstyp und der Einkommensklasse sowie der erwarteten Jahresmobilität, die MIV-Werkzeuge bestimmt werden. Anschliessend – auch in Abhängigkeit der Qualität des lokalen ÖV-Angebots – sind die ÖV-Mobilitätswerkzeuge zu bestimmen.

Für die Modellierung des Erwerbs von Mobilitätswerkzeugen gibt es sowohl Gründe, dies auf Ebene Haushalt zu tun, als auch solche, hierfür die Ebene des Individuums zu wählen. Es wird empfohlen, aus Konsistenzgründen mit den anderen NPVM-Modellteilen und den verfügbaren Datensätzen (beispielsweise der SBB) die Ebene des Individuums (evtl. unter Berücksichtigung von Haushaltsvariablen) zu verwenden.

Bei der zweiten Stufe der Modellierung der Verkehrsmittelwahl sind dann nur noch die Grenzkosten einzusetzen. Diese nehmen mit der Distanz ab. Die Kosten können auch abhängig sein von technischen Fahrzeugparametern (z.B. Antriebssystem, zur Abbildung von Anreizsystemen für Hybrid- und/oder Elektroautos). Deshalb wird vorgeschlagen, auf die herkömmlich Differenzierung nach Autogrössenklassen (kleines/mittleres/grosses Auto, und dergleichen) zu verzichten, da es für die zu untersuchenden Fragestellungen nicht relevant ist. Stattdessen soll die Möglichkeit vorgeschrieben werden, eine Echtflotte (Echtdaten, extrapolierte Echtdaten oder mikrosimierte künftige Autoflotte) zuteilen zu können. Diese Möglichkeit lässt die Anwendung des weiter entwickelten NPVM für künftige neue Fragestellungen nahezu ohne Einschränkung zu, ohne bereits heute Vorinvestitionen leisten zu müssen.

Es scheint nicht empfehlenswert zu versuchen, alle möglichen Typen von Mobilitätswerkzeugen abbilden zu wollen. Beispielsweise sind die heutigen Inter-Abos und Strecken-Abos in der geplanten NPVM-Modellstruktur kaum abbildbar. Das Gleiche gilt für Enkel- und Juniorkarten. Zu differenzieren sind vor allem der Gebrauch von Einzelfahrkarten, der Erwerb einer Jahreskarte eines Tarifverbunds oder eines GA. Beim GA ist eine Differenzierung nach Alter (GA Junior / Erwachsene / Senior) möglich. Bei Tarifverbünden wird empfohlen, die mehr als 20 Verbünde strukturell vereinfacht darzustellen über eine Kernzone sowie eine Zone, welches das ganze Verbundgebiet abdeckt.

Kosten der Verkehrsmittelwahl in Spitzenstunden: Mit obigen Modelleckpunkten lassen sich ÖV- und MIV-Kosten, welche nach Tageszeit differenzieren, nur eingeschränkt abbilden. ÖV-Tarife mit Gültigkeit z.B. ab 9 Uhr („9-Uhr-Tageskarte“, usw.) oder 19 Uhr („Gleis 7“-Angebot) lassen sich nicht präzise abbilden. Das Analoge gilt für zeitlich differenzierte Road-Pricing-Ansätze. Es ist aber möglich, für eine Spitzenstundensituation die Spitzenstunden-Grenzkosten anzuwenden. Dies ermöglicht die Abbildung der Elastizität der Verkehrsmittelwahl auf entsprechende Preissignale.

6. Grundlegender Modellaufbau

6.1. Zusammenhang der Ortsveränderungen

Verkehrserzeugungsmodelle haben die Aufgabe das Verkehrsaufkommen, d.h. die Zahl von Ortsveränderungen zu ermitteln, die von der Bevölkerung einer Raumeinheit (Verkehrszelle) innerhalb eines bestimmten Zeitraumes (z. B. eines Werktages) durchgeführt werden. Makroskopische Verkehrserzeugungsmodelle berechnen das Verkehrsaufkommen einer Verkehrszelle oder einer Personengruppe dieser Verkehrszelle aus Strukturgrößen dieser Zelle (z. B. Einwohner, Arbeitsplätze, Einkaufsflächen) und spezifischen Mobilitätsraten. Dabei wird unterschieden zwischen erzeugtem und angezogenem Verkehr. Grundsätzlich lassen sich wegebasierte und kettenbasierte Modelle unterscheiden.

Wegebasierte Verkehrsnachfragemodelle bestimmen die Ortsveränderungen zwischen zwei Verkehrszellen, ohne dabei den Kontext der einzelnen Ortsveränderung innerhalb der Wegeketten der betreffenden Personen zu berücksichtigen. Homogene Schichten können sich insbesondere auf Personengruppen oder auf Fahrtzwecke beziehen. (Lohse hat für die Schichtung nach Fahrtzwecken den Begriff der Quelle-Ziel-Gruppen eingeführt.) Jeder Quelle-Ziel-Gruppe sind eine oder mehrere Personengruppen als massgebende Bezugspersonengruppen zugeordnet. So ist für die Quelle-Ziel-Gruppen Wohnen-Arbeiten (WA) und Arbeiten-Wohnen (AW) allein die Bezugspersonengruppe „Berufstätige“ massgebend, während für die Quelle-Ziel-Gruppen Wohnen-Einkaufen (WE) und Einkaufen-Wohnen (EW) im Allgemeinen alle Personengruppen berücksichtigt werden können. Die Quelle-Ziel-Gruppen werden durch die Einbeziehung von unterschiedlichen Personenmerkmalen (z. B. Alter) und PW-, GA- und HTA-Besitz zu aktivitätenhomogenen Personengruppen.

In kettenbasierten Verkehrsnachfragemodellen werden nicht einzelne Fahrten, sondern ganze Aktivitätenketten erzeugt, die eine Folge von Aktivitäten beschreiben (z. B.: W-A-E-W). Eine Aktivitätenkette im Personenverkehr beginnt und endet stets am Wohnort. Auch hier werden jeder Kette eine oder mehrere Personengruppen als massgebende Bezugspersonengruppen zugeordnet, welche ebenso auf aktivitätenhomogenen Personengruppen erweitert werden. Kettenbasierte Verkehrsnachfragemodelle betrachten dabei im Gegensatz zu wegebasierten Verkehrsnachfragemodellen die Tagestour.

	EmP	EoP	NEmP	NEoP	Azubi	Stud	Sch	GSch
WAW	74.25	62.60	8.18	2.82	33.48	11.08	1.92	0.30
WBW	0.00	0.00	0.00	0.00	47.57	0.00	0.00	0.00
WEW	17.42	25.94	60.60	62.93	12.37	23.91	12.99	9.08
WEW	27.03	25.32	52.50	39.74	38.08	37.33	40.12	38.67
WGW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.99
WHW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.19	0.00	0.00
WSW	0.90	1.82	0.96	0.47	0.00	0.00	80.48	0.00
WAAW	3.12	0.85	0.13	0.06	0.52	0.16	0.11	0.00
WAEW	4.67	7.05	0.96	0.33	1.79	0.80	0.37	0.00
WAFW	1.64	1.46	0.18	0.02	0.86	1.56	0.09	0.00
WASW	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WBAW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00
WBBW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00
WBEW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00
.....								
WHEFW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00
WHFFW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00
WHFHW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00
WHHEW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00
WHHHW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00
WSAAW	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSAEW	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSAFW	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
WSASW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
WSEEW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
WSEFW	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.14	0.00
WSESW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
WSFEW	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.17	0.00
WSFSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00
WSSSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00

Tabelle 10: Liste von Aktivitätenketten mit spezifischem Verkehrsaufkommen je Personengruppe nach VISEM [Quelle: Deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2001]

Für beide Modelltypen sind entsprechende spezifische Verkehrsaufkommen zu bestimmen. Das spezifische Verkehrsaufkommen einer solchen Personengruppe ist grundsätzlich definiert als mittlere Anzahl der Ortsveränderungen pro Tag und Person. Bei der Ermittlung dieser Verhaltenskennwerte und -merkmale der einzelnen Bezugsgruppen sind die Modelle auf hochwertige und umfangreiche Verkehrserhebungen angewiesen, da die Werte differenziert nach Aktivitäten bzw. Quelle-Ziel-Gruppen erhoben werden müssen. Praktische Beispiele zur Gewinnung von Verkehrskennziffern in Städten und Regionen sind Mikrozensus, System repräsentativer Verkehrsbefragungen (SrV) und Mobilität in Deutschland (MID). Beide Modellansätze haben Vor- und Nachteile, welche sich im Kapitel Aktivitäten, Ziel-, Modus- und Routenwahl deutlich zeigen.

6.2. Modellannahmen zur Nachbildung der Entscheidungsprozesse

Die Aufgabe eines Entscheidungsmodells besteht darin, die Wahrscheinlichkeiten für die Wahl der einzelnen Alternativen durch den Verkehrsteilnehmer zu ermitteln. Diese Auswahlwahrscheinlichkeiten werden über eine Entscheidungsfunktion modelliert, deren Einflussvariablen zum einen die Merkmale der Alternativen und zum anderen die situativen Merkmale des Verkehrsteilnehmers sind. In der Regel werden in der Verkehrsplanung Entscheidungsmodelle verwendet, welche auf dem Verhaltensprinzip des maximalen subjektiven Nutzens basieren.

Die Verwendung eines Logit-Ansatzes (und somit einer Gumbel-Verteilung) für Nachfragemodelle besitzt viele positive mathematische, als auch praktische verkehrsplanerische Gesichtspunkte. Trotzdem sei darauf verwiesen, dass auch entscheidende Nachteile des Logit-Modells existieren. Im Logit-Modell entsteht als Bewertungsfunktion eine natürliche Exponentialfunktion. Da der Logit-Ansatz auf Nutzendifferenzen beruht, ergeben sich die gleichen Reaktionen auf gleiche Aufwandsdifferenzen. Das bedeutet, dass die Zunahme an Ortsveränderungen bei einer Reisezeitverbesserung von 10 auf 5 min genau so gross ist, wie bei einer Reisezeitverbesserung von 100 auf 95 min. Diese Reaktion auf Reisezeitdifferenzen ist für Städte vollkommen sachlogisch und verkehrsplanerisch richtig. Bei landesweiten Modellen ist dieser Ansatz jedoch nicht verwendbar, da es zu den klassischen Überreaktionen der Verkehrsteilnehmer auf weiten Relationen kommt. Die eigentliche Ursache hierfür liegt in der fallenden Elastizität des Logit-Modells.

Bei kurzen Relationen können Verkehrsteilnehmer Differenzen schätzen, bei weiten Relationen hingegen nur noch Aufwandsverhältnisse. Diese bedingen aber eine konstante Elastizität. Um diesen „Fehler“ zu vermeiden, müssen Funktionen genutzt und geschätzt werden, welche im Bereich der weiten Aufwände die Elastizität „abfangen“ und sie konstant weiterlaufen lassen. Dazu zählen zum Beispiel Box-Tuckey und EVA-2.

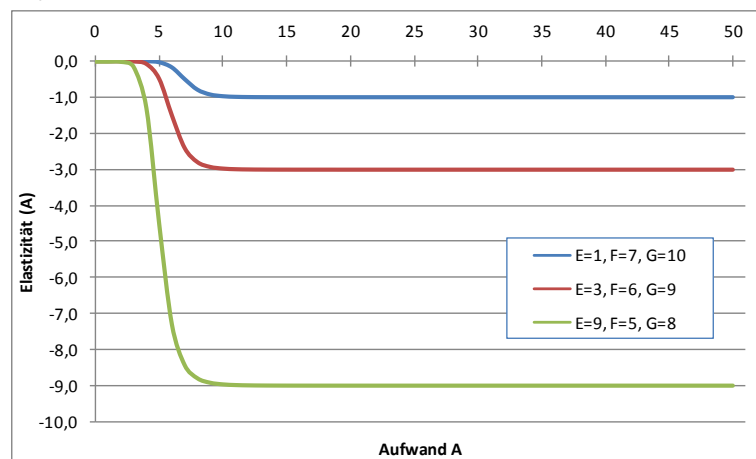


Abbildung 5: Elastizität der EVA2-Funktion

Hinzu kommt noch, dass der eine (lineare) Parameter in der Bewertungsfunktion des Logit-Modells nur eine globale Kalibrierung zulässt. Dadurch fällt die Funktion entweder im Nahbereich sehr stark oder sinkt im Fernbereich nicht schnell genug ab. Auch dieser Punkt wird von den o.g. Funktionen umgangen.

Empfehlung zu Modellannahmen zur Nachbildung der Entscheidungsprozesse: Das NPVM sollte seine Wahlentscheidungen grundlegend auf Basis des Logit-Ansatzes durchführen. Jedoch sind Transformationen im Sinne von Box-Tuckey oder EVA-2 vorzunehmen, welche auch in den SP-Experimenten geschätzt werden müssen. Sämtliche Transformationen des Logit-Ansatzes können in wegebasierten und kettenbasierten Modellen eingesetzt werden.

6.3. Verknüpfung der Nachfrage mit den Strukturdaten

Massgebende Raumstrukturgrößen, Lagegunst sowie verkehrliche Bilanzbedingungen im Untersuchungsraum beeinflussen das tatsächliche (also reale) Verkehrsgeschehen grundlegend und müssen somit in die verkehrsplanerischen Berechnungsverfahren einfließen. Weiterhin ist zu beachten, dass je nach Aktivität unterschiedliche Abhängigkeiten des Verkehrsaufkommens von diesen Einflussgrößen vorhanden sind. Das Verkehrsaufkommen kann drei grundlegende Abhängigkeiten von Raumstrukturgrößen und Lagegunst besitzen:

- nur von den Raumstrukturgrößen und deren Kapazitäten
- von den Raumstrukturgrößen, deren Kapazitäten und der Lagegunst
- nur von der Lagegunst

Um diese Restriktionen des Raumes korrekt abzubilden, ist die aktivitäten- und zellenfeine Beachtung von Randsummenbedingungen bei Aktivitäten-, Ziel- und Moduswahl unumgänglich. Grundsätzlich sind zwei Arten von Randsummenbedingungen zu unterscheiden:

- Bei unelastischen Randsummenbedingungen werden die räumlich nicht substituierbaren Aktivitäten (z. B. Arbeit, Bildung) betrachtet, bei denen nicht unmittelbar das Aktivitätsziel verändert werden kann. Der Erwartungswert des Verkehrsaufkommens berechnet sich ausschliesslich aus den massgebenden Strukturgrößen. Die Lagegunst spielt für die Randsumme der Verkehrsstrommatrix somit keine Rolle.
- Bei elastischen Randsummenbedingungen ergibt sich der Erwartungswert des Verkehrsaufkommens bei substituierbaren Aktivitäten (z. B. Einkaufen, Sonstiges) nicht mehr ausschliesslich durch die massgebenden Strukturgrößen. In Bezug auf das Verkehrsaufkommen spielt hier ebenfalls die Lagegunst bei der Wahl konkurrierender Aktivitäten eine entscheidende Rolle. So bewerten beispielsweise Verkehrsteilnehmer auch den Ortsveränderungsaufwand zu verschiedenen Einkaufszentren bei ihrer Zielwahl. So lange das mit dem geringsten Aufwand zu erreichende Einkaufszentrum noch nicht durch andere „konkurrierende“ Verkehrsteilnehmer ausgelastet ist, werden die Verkehrsteilnehmer dieses Einkaufszentrum mit grösserer Wahrscheinlichkeit auswählen. Bei Überlastung ändern sie ihre Zielwahl entsprechend.

Anmerkung: Die meisten einfachen Gravitationsmodelle arbeiten ohne mehrseitige Randsummenbedingungen. Diese Modelle unterstellen, dass die Verkehrsaufkommen ausschliesslich von der Lagegunst abhängig sind und nicht mehr durch Raumstrukturgrößen beeinflusst werden. Hierbei ergibt sich das Verkehrsaufkommen nur durch die Erreichbarkeit konkurrierender Ziele. Kapazitätsgrenzen der Strukturgrößen wirken dabei nicht mehr. Die Strukturgrößen werden hierbei allenfalls zur Gewichtung der Bewertung genutzt.

Empfehlung zur Verknüpfung der Nachfrage mit den Strukturdaten: Das NPVM sollte mit mehrseitigen unelastischen und elastischen Randsummenbedingungen arbeiten. Diese müssen zellen- und aktivitätenfein festlegbar sein.

Randsummenbedingungen werden schon seit 20 Jahren in wegebasierten Modellen eingesetzt (grösstes multimodales Modell: 11.000 Binnenzellen, DB Regio). Seit kurzer Zeit können auch in kettenbasierten Modellen Randsummenbedingungen eingesetzt werden. (Jedoch nur in VISUM 14 der PTV AG.) Allerdings sind diese Modelle bis dato noch nicht in umfangreicher Form bzgl. Zellen- und Aktivitätenanzahl zur Anwendung gekommen (grösstes bekanntes Modell: 2.000 Binnenzellen, München).

6.4. Aktivitätenwahl

Grundsätzlich können bei der Aktivitätenwahl sowohl wege- als auch kettenbasierte Modelle alle bisher formulierten Anforderungen erfüllen. Unabhängig davon welche Modellgruppe im NPVM verwendet wird, sind folgende Aspekte zu beachten:

Um die Erzeugung angemessen aufzustellen, muss die Einteilung der aktivitätenhomogenen Personengruppen in Verbindungen mit den Wegezwecken (vgl. Tabelle 7), den Zusammenhängen der Ortsveränderungen (vgl. Kapitel 6.16.3) und den Randsummenbedingungen (vgl. Kapitel 6.3) verkehrsplanerisch und statistisch sachlogisch verknüpft werden.

Die Abbildung von Verhaltensunterschieden in Raumtypen (z. B. einzelnen Gebieten und Korridoren) ist über Regressionsansätze abzubilden. Diese müssten verschiedene Wirkungszusammenhänge abbilden. Z. B. je grösser der generelle Aufwand zu substituierbaren Zielen, desto kleiner (oder grösser) die Mobilitätsraten. Ein erster, wenn auch statischer, Ansatz ist mit der Festlegung unterschiedlicher Mobilitätsraten im 2010er NPVM je Raumtyp gemacht worden.

Zur Abbildung kombinierter Mobilität (z. B. Park and Ride) sind in der Erzeugung die massgebenden Anziehungspotentiale (z. B. Anzahl Parkstände, Grösse der Parkfläche) als tatsächliche Verkehrsaufkommen oder als Potentiale mit den entsprechenden Randsummenbedingungen festzulegen und zu berechnen.

Zur verbesserten Abbildung des Aussenverkehrs, insbesondere in den Bereichen grenzüberschreiten der Agglomerationen, könnten bereits in der Erzeugung zwei verschiedene Ansätze verfolgt werden. 1.) Sollen Grenzgänger extern modelliert werden, sind über Attraktions- und Produktionsfaktoren diese Verkehre bereits in der Erzeugung abzuspalten. Damit ist ebenfalls die entsprechende Konsistenz gegeben. Hierbei sind jedoch stets die Abschnitte „Räumliche Segmentierung“ der Schweiz und des Auslandes zu beachten. 2.) Alternativ: Es werden Grenzgänger als eigene aktivitätenhomogene Gruppe modelliert, welche auch entsprechend gut in einem ganzheitlichen Modell (In- und Ausland) betrachtet und kalibriert werden können.

Empfehlung zur Aktivitätenwahl: Das NPVM könnte aus der Sicht der Aktivitätenwahl ein wegebasiertes als auch kettenbasiertes Modell verwenden, wenn dieses die Zuordnung der aktivitätenhomogenen Personengruppen und Fahrtzwecke gemäss des Abschnittes „Segmentierung der Verkehrsnachfrage“ vornimmt, die Randsummenbedingungen gemäss des Abschnittes „Zusammenhang der Ortsveränderungen“ und die allgemeinen Ansprüche an eine „state of the art Erzeugung“ (z. B. Trip Balancing etc.) beachtet.

6.5. Ziel- und Moduswahl

Unter Verkehrsverteilung (Zielwahl) wird die Aufspaltung und Zuordnung eines Quellverkehrsaufkommens auf mögliche Zielverkehrszellen bzw. eines Zielverkehrsaufkommens auf die möglichen Quellverkehrszellen verstanden. Beide Verteilungsrichtungen (quell- und zielorientiert) wirken komplex und sind daher voneinander abhängig. Verkehrsverteilungsmodelle dienen somit der Berechnung der Verkehrsströme einer Verkehrstrommatrix eines Untersuchungsgebietes für eine bestimmte Verkehrsart. Die Moduswahl berechnet die Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die verschiedenen Modi.

Da die Ziel- und Moduswahl auf den gleichen modelltheoretischen Grundlagen beruhen, sowie zum grössten Teil von den gleichen Aufwänden und der Bewertung des Verkehrsteilnehmers abhängig sind, ist eine isolierte und sequentielle Modellierung nicht sinnvoll. Ferner tritt bei der sequentiellen Modellierung das Problem der Bestimmung und Handhabung des massgebenden Aufwandes immer wieder auf (z. B.: Welcher modusabhängige Aufwand soll für die Zielwahl verwendet werden, wenn noch keine Moduswahl berechnet wurde?).

Empfehlung zur Ziel- und Moduswahl: Für das NPVM sollte festgelegt werden, dass aufgrund der o.g. Punkte eine Modellstruktur mit simultaner Ziel- und Moduswahl gewählt wird.

Fortführend wird auf die Unterschiede der simultanen Berechnung der Ziel- und Moduswahl bei wegebasierten und kettenbasierten Modellen eingegangen.

Wegebasierte Modelle ermitteln die simultane Ziel- und Moduswahl auf Basis von ijk -Aufwandsbewertungen. Auf dieser Grundlage berechnen sie zur Lösung der Verkehrsströme v_{ijk} in der Gleichung

$$v_{ijk} = B_{ijk} \times f_{q_i} \times f_{z_j} \times f_{a_k}$$

$$Q_i^{min} \leq Q_i = \sum_j \sum_k v_{ijk} \leq Q_i^{max}$$

$$Z_j^{min} \leq Z_j = \sum_i \sum_k v_{ijk} \leq Z_j^{max}$$

$$\sum_i \sum_j v_{ijk} = A_k$$

i	Laufindex der Quellverkehrszellen
j	Laufindex der Zielverkehrszellen
k	Laufindex der Modi
v	Verkehrsstrom
A	modusfeiner Anteil am Gesamtverkehrsaufkommen
Q	Quellverkehrsaufkommen
Z	Ziellverkehrsaufkommen

die Faktoren f_{q_i} , f_{z_j} und f_{a_k} so, dass die aus der Erzeugung Quell-Ziel-Gruppen (QZG) fein vorgegebenen Q_i und Z_j als auch der QZG-fein vorgegebene Modal Split eingehalten wird. Hierbei wird tatsächlich eine simultane Lösung für jede QZG mit Hilfe verschiedener Iterationsverfahren sukzessiv approximativ berechnet. Über die Bewertung B_{ijk} , welche frei wählbare Komponenten enthalten kann (siehe Abschnitt „Modellannahmen zur Nachbildung der Entscheidungsprozesse“), kann das Modell je verhaltenshomogener Gruppe zweckfein, modusfein und aufwandsfein kalibriert werden.

Die Vorgabe des Modal Splits, die tatsächliche simultane Ver- und Aufteilung und die sehr gute Kalibrierbarkeit zählen zu den entscheidenden Vorteilen der wegebasierten Modelle. Nachteile besitzen diese Modelle, neben der bereits genannten Nichtbeachtung der Wegefolge, bei der Matrixbilanzierung am Ende der Berechnungen. Diese ergeben nach Abschluss der Berechnung eines zeitlich und räumlich geschlossenen Modells sachunlogische Abweichungen. So müssen z. B. Tagesmatrizen über alle QZG und Modi symmetrisch sein, was ohne Ausgleichsrechnung nicht möglich ist (blaue Markierung in folgender Abbildung). Erst durch umfangreiche und zeitintensive Ausgleichs (z. B. Randsummenausgleich) kann dies (jedoch auch nicht immer) gewährleistet werden (grüne Markierung).

Σ Realität	1	2	3	Q _i
1				15,00
2				10,00
3				10,00
Z _j	15,00	10,00	10,00	35,00

Σ QZG T12	1	2	3	Q _i	delta max
1				15,00	0,00
2				5,00	5,00
3				10,00	0,00
Z _j	15,00	10,00	5,00	30,00	
delta max	0,00	0,00	5,00		

Σ QZG T3	1	2	3	Q _i
1				0,00
2				2,50
3				2,50
Z _j	0,00	2,50	2,50	5,00

Σ Modell alt	1	2	3	Q _i
1				15,00
2				7,50
3				12,50
Z _j	15,00	12,50	7,50	35,00

RSA T3	1	2	3	Q _i
1				0,00
2				5,00
3				0,00
Z _j	0,00	0,00	5,00	5,00

Σ Model neu	1	2	3	Q _i
1				15,00
2				10,00
3				10,00
Z _j	15,00	10,00	10,00	35,00

Abbildung 6: Asymmetrien der Wegematrizen von 5 Quell-Ziel-Gruppen

Kettenbasierte Modelle versuchen ebenfalls simultan die Ziel- und Moduswahl auf der Basis von ijk-Aufwandsbewertungen zu berechnen. Allerdings führen diese Modelle entweder abwechselnde Berechnungen zwischen Ziel- und Moduswahl aus, was sehr zeitaufwändig und oft nicht gut kalibrierbar ist, oder sie berechnen die Moduswahl auf dem ersten Weg während der Zielwahl. (Der zweite Punkt ist in der Regel bei praktischen Wegekettenmodellen sehr oft anzutreffen und wird daher auch weiter betrachtet.)

So wird bei der Berechnung der Moduswahl auf dem ersten Weg für diesen Teilabschnitt der Gesamtkette ein diskretes Aufteilungsmodell aufgestellt und ein Modus ausgewählt. Dies bedeutet, dass die gesamte Wegekette mit dem Modus durchgeführt wird, der ausschliesslich durch den ersten Weg bestimmt wird. Somit wird für die Wegekette mit dem bestimmten Modus dann die Zielwahl berechnet. Dadurch, dass der Modus dann nicht mehr verändert werden kann, ergibt sich zur Berechnung der Verkehrsströme folgende Gleichung:

$$v_{ij(k)} = B_{ij} \times f_{q_i} \times f_{z_j}$$

$$Q_i^{min} \leq Q_i = \sum_j v_{ij} \leq Q_i^{max}$$

$$Z_j^{min} \leq Z_j = \sum_i v_{ij} \leq Z_j^{max}$$

Die Faktoren f_{q_i} und f_{z_j} halten die aus der Erzeugung wegekettenein vorgegebenen Q_i und Z_j ein. Ein Modal Split kann nicht vorgegeben werden und muss pro Wegekettentyp je verhaltenshomogener Gruppe zusätzlich kalibriert werden. Über die Bewertung B_{ijk} , welche frei wählbare Komponenten enthalten kann (siehe Abschnitt „Modellannahmen zur Nachbildung der Entscheidungsprozesse“), kann das Modell je verhaltenshomogener Gruppe nur modus- und aufwandsfein kalibriert werden. Somit ist auch die Moduswahl abhängig von der Personengruppe und nicht von der Aktivität bzw. dem Zweck. Dadurch ist die Kalibrierung eines Modal Splits für die einzelnen Aktivitäten wesentlich schwerer, was insbesondere bei Mobility Pricing etc. zu Problemen führen kann.

Die nicht mögliche Vorgabe des Modal Splits, die Reduktion der Moduswahl auf den ersten Teilweg und die damit einhergehende schwierige Kalibrierbarkeit zählen zu den Nachteilen der wegeketteneinbasierten Modelle. Vorteile besitzen diese Modelle bei der Beachtung der Wegefolge und der Matrixbilanzierung am Ende der Berechnungen.

VZ	EW	AP	VFL
1	200	50	500
2	300	200	450
3	400	300	200

sv (WAEW)	0,0467
W-A-E-W	9,34

W	A	E	W
1	1	1	1
1	1	2	1
1	1	3	1
1	2	1	1
1	2	2	1
1	2	3	1
1	3	1	1
1	3	2	1
1	3	3	1

Aij	1	2	3
1	1,0	1,5	2,0
2	1,5	1,0	2,0
3	2,0	2,0	1,0

Bij	1	2	3
1	1,000	0,7841	0,6598
2	0,7841	1,0000	0,6598
3	0,6598	0,6598	1,0000

Bij	W-A-E-W	f	WK mit f
1,00	1,933	0,000	0,000
0,61	1,188	0,714	0,849
0,44	0,841	0,000	0,000
0,61	1,188	2,858	3,396
0,61	1,188	0,000	0,000
0,34	0,660	0,000	0,000
0,44	0,841	0,790	0,664
0,34	0,660	4,254	2,806
0,44	0,841	1,931	1,624
4,83	9,34		9,34

vij	1	2	3	Qi-Ist	Qi-Soll
1	0,85	3,40	5,09	9,34	9,34
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
Zj-Ist	0,85	3,40	5,09	9,34	
Zj-Soll	0,85	3,40	5,09		9,34

A-E					
vij	1	2	3	Qi-Ist	Qi-Soll
1	0,00	0,85	0,00	0,85	0,85
2	3,40	0,00	0,00	3,40	3,40
3	0,66	2,81	1,62	5,09	5,09
Zj-Ist	4,06	3,65	1,62	9,34	
Zj-Soll	4,06	3,65	1,62		9,34

E-W					
vij	1	2	3	Qi-Ist	Qi-Soll
1	4,06	-	-	4,06	4,06
2	3,65	-	-	3,65	3,65
3	1,62	-	-	1,62	1,62
Zj-Ist	9,34	-	-	9,34	
Zj-Soll	9,34	-	-		9,34

Gesamt					
vij	1	2	3	Qi-Ist	
1	4,91	4,25	5,09	14,25	
2	7,05	0,00	0,00	7,05	
3	2,29	2,81	1,62	6,72	
Zj-Ist	14,25	7,05	6,72	28,02	

Abbildung 7: Symmetrien der Wegematrizen einer Wegeketten W-A-E-W

Nach Abschluss der Berechnung eines zeitlich und räumlich geschlossenen Modells sind diese Tagesmatrizen über alle Ketten und Modi symmetrisch (siehe farbliche Markierung als auch Gesamtverkehrsstrommatrix).

Empfehlung zur Ziel- und Moduswahl: Für das NPVM sollte eine genaue Abwägung der beiden Modelltypen stattfinden. Sowohl das wegebasierte als auch das kettenbasierte Modell sind grundsätzlich geeignet, weisen jedoch die genannten, spezifischen Vor- und Nachteile auf. Grundsätzlich ist zu sagen, dass Wegeketten in städtischen Gebieten Vorteile durch die Tourenoptimierung und Quelle-Ziel-Gruppen in überregionalen Gebieten durch die zweckgebundene Kalibrierbarkeit besitzen. Die Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile als auch die Betrachtung der Erfahrungen mit grossen Modellanalysen lassen die Empfehlung zu, für das NPVM einen wegebasierten Ansatz zu wählen.

Unabhängig von der Entscheidung, welcher Modelltyp im NPVM verwendet wird, sollten trotzdem folgende Aspekte in der simultanen Ziel- und Moduswahl beachtet werden:

- Die Abbildung von unterschiedlichen Aufwänden mit frei wählbaren Bewertungsfunktionen ist äusserst wichtig. Viele Modelle lassen nur Standardfunktionen zu. So können z. B. Parkkosten, Aufwandsvektoren, GA-Besitz etc. modelliert werden.
- Die Verwendung von Aufkommen und/oder Potenzialen von P+R-Plätzen lässt in Verbindung mit unelastischen und elastischen Randsummenbedingungen eine Abschätzung der P+R-Verkehre zu. Hierzu sind allerdings alle P+R-Plätze inkl. ihrer Eigenschaften (Kapazität, Anbindungen etc.) schweizweit zu erheben.
- Dadurch, dass immer feiner werdende Modelle immer grössere Gebiete abdecken, ist eine globale Bewertungsfunktion bzw. ein globaler Parametersatz nicht mehr zeitgemäss. Verhaltensunterschieden in einzelnen Gebieten bzw. in Korridoren kann mit unterschiedlichen Bewertungsfunktionen bzw. Parametersätzen begegnet werden. Somit können neben den Eingangsdaten (z. B. Mobilitätsraten, Modal Split, Besetzungsgrad) auch das tatsächliche Verkehrsverhalten raumtypenfein abgebildet werden. So könnte zum Beispiel eine über die real existierende Bewertung hinausgehende Verkehrsverflechtung zwischen Grossstädten oder eine unterschiedliche Bewertung von Reisezeit in Agglomerationen und ländlichen Gebieten modelliert werden.

6.6. Routenwahl

Die Aufgabe von Umlegungsmodellen ist die Nachbildung des Verkehrsablaufes in einem Verkehrsnetz. Das Umlegungsmodell bildet dazu den Zusammenhang zwischen Angebot und Nachfrage ab und produziert im Wesentlichen drei Arten von Ergebnissen:

- Verkehrsströme, d.h. Routen bzw. Verbindungen von einer Quelle zu einem Ziel mit der zugehörigen Belastung;
- Belastungen einzelner Netzelemente, z. B. von Strecken, Haltestellen und Abbiegern an Knoten;
- Kenngrößen einer Ortsveränderung, z. B. Reisezeiten, Kosten, Umsteigehäufigkeit.

Bei der Routenwahl im Individualverkehr wird im einfachsten Fall unterstellt, dass jeder Verkehrsteilnehmer den kürzesten Weg wählt. Dieser Ansatz kann bei Fuss- und Radverkehren in strategischen Verkehrsnachfragemodellen zur Gewinnung der Kenngrößenmatrizen entsprechend genutzt werden. Eine tatsächliche Umlegung der Verkehrsströme erfolgt i.d.R. nicht. Sollen Sonderverkehrsmodi wie z. B. E-Bike modelliert werden, ist eine Umlegung notwendig. Sie dient der Überprüfung der räumlichen Verteilung der Verkehrsströme der Sonderverkehrsmodi.

Für den MIV handelt es sich allerdings um kein sehr praxisnahes Modell, da die Entscheidung eines Autofahrers die Fahrzeit und damit die Routenwahl der anderen Autofahrer beeinflussen kann. Da Be- und Überlastungen einzelner Netzabschnitte zu einer Erhöhung der Fahrtdauer und somit der Widerstände der betroffenen Routen führen, muss dieser Aspekt unbedingt in das Routenwahlmodell einfließen.

Aus diesem Grund sind Entscheidungsmodelle vom Typ Logit für die Routenwahl im Individualverkehr nur bedingt geeignet. Stattdessen ist ein sogenanntes belastungsabhängiges Routenwahlmodell erforderlich. Das klassische Modell für die Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Nachfrage und Routenwahl im Individualverkehr ist ein Gleichgewichtsmodell. Diese Verfahren bestimmen die Belastung eines Verkehrsnetzes, so dass eine vorgegebene Zielfunktion optimiert wird. Es wird in deterministische und stochastische Verfahren unterschieden.

Beim deterministischen Nutzergleichgewicht besitzen alle Verkehrsteilnehmer die 100%ige Information über alle Aufwände des Netzes. Entsprechend minimieren die Nutzer in einem Verkehrsnetz die Aufwände über ihre Routenwahl. Das bedeutet, dass sich auf allen benutzten Routen jeder Quelle-Ziel-Beziehung gleiche Aufwände ergeben, auf jeder nicht benutzten Alternativroute die Aufwände höher sind und kein Verkehrsteilnehmer durch Umschwenken auf eine andere Route einen persönlichen Vorteil erzielen kann. Zur Ermittlung des deterministischen Nutzergleichgewichts gibt es verschiedene Lösungsverfahren: Method of Successive Averages (MSA), FRANK-WOLFE Verfahren, Lernverfahren mit deterministischen Bestweg-Verfahren.

Beim stochastischen Nutzergleichgewicht besitzen die Verkehrsteilnehmer keine 100%ige Information über die Aufwände, sondern treffen (subjektive) Annahmen. Die Aufwandsschätzungen und deren Bewertung durch die einzelnen Verkehrsteilnehmer streuen um den Erwartungswert einer Verteilung. Entsprechend minimieren die Nutzer in einem Verkehrsnetz die Aufwände über ihre Routenwahl. Das bedeutet, dass auf allen benutzten und nicht benutzten Routen jeder Quelle-Ziel-Beziehung verschiedene Aufwände existieren und ein Verkehrsteilnehmer durch Umschwenken auf eine andere Route einen persönlichen Vorteil erzielen könnte. Jedoch schätzt er seine Entscheidung als die beste Route ein und wechselt seine Route nicht. Zur Ermittlung des stochastischen Nutzergleichgewichts gibt es ebenfalls verschiedene Lösungsverfahren: VRTIC, DUGGE, Lernverfahren mit stochastischen Mehrweg-Verfahren.

Hierbei ist noch zu erwähnen, dass im Besonderen Ansätze des stochastischen Nutzergleichgewichts sachlogische Ergebnisse bei der Abbildung von Mobility-Pricing-Effekten haben. Das unvollständige

Wissen über Aufwände und die damit verbundenen Aufwandsschätzungen lassen wesentlich konsistentere Ergebnisse der Ausweichverkehre entstehen, als Umlegungen mit deterministischen Nutzergleichgewicht.

Für den ÖV ist durch die Verwendung des HAFAS-Systemfahrplans der SBB (siehe Absatz „Segmentierung des Verkehrsangebots“) die Verwendung eines fahrplanfeinen Verfahrens alternativlos. Es baut auf dem entsprechenden Strecken-, Linien- und Fahrplanmodell auf und berücksichtigt alle Fahrten der ÖV-Linien mit deren genauen Abfahrts- und Ankunftszeitpunkten und somit die Koordinierung des Fahrplanes. Dieses Verfahren ist besonders dort anzuwenden, wenn ÖV-Systeme sehr genaue Taktzeiten aufweisen und die Koordinierung des Fahrplanes für Umsteigevorgänge bedeutend ist. Es ergibt sehr genaue Ergebnisse, benötigt aber überdurchschnittlich hohen Speicherplatz und Rechenzeit. Ebenso ist bei einem fahrplanfeinen Verfahren die Umrechnung der 24h-Matrix (aus Erzeugung, Verteilung, Aufteilung) auf die minutenfeinen Abfahrtszeiten zu beachten. Hierbei sind mindestens raumtypenfeine Tagesganglinien für den ÖV zu bestimmen und im Verfahren zu verwenden.

Empfehlung zur Routenwahl: Der MIV sollte mit einem stochastischen Gleichgewichtsverfahren, der ÖV mit einem fahrplanfeinen Verfahren umgelegt werden. Entsprechend sind auch die Routenwahlparameter zu schätzen.

6.7. Gleichgewichte

Gleichgewichte existieren in verschiedenen Ebenen der Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung. So wird während des Verfahrens zwischen Routenwahl auf der Nachfrageseite und Belastung des Netzmodells auf der Angebotsseite ein Gleichgewicht erzeugt. Ebenso wirken Veränderungen in den Aufwänden des Verkehrsangebotes auf die Aktivitäten-, Ziel- und Moduswahl und je nach Randsummenbedingungen auch auf die Verkehrsaufkommen der Verkehrszellen.

Mit der Verwendung eines stochastischen Routenwahlmodells, bei dem Verkehrsteilnehmern zusätzlich eine Unschärfe bei der Einschätzung des Aufwandes unterstellt wird, die um einen zu definierenden Erwartungswert streut, fließt eine stochastische Komponente in das Modell ein. Diese nutzenmaximierenden und stochastischen Ansätze lassen durch Rückkopplungen einen nutzerorientierten stochastischen Gleichgewichtszustand entstehen.

Empfehlung zur Gleichgewichtsmodellierung: Das NPVM sollte eine hinreichend genaue Rückkopplung der MIV-Kenngrößen erfahren, welche durch nachprüfbare Abbruchkriterien definiert wird.

6.8. Nachgelagerte Zeitscheibenmodellierung

In Kapitel 2.3 wird die grundlegende Problematik zur Modellierung der Abfahrtszeitwahl beschrieben. Die Modellierung der Abfahrtszeit wird vor allem bei Massnahmen zum Brechen von Verkehrsspitzen und Mobility Pricing benötigt. Beide Punkte stellen in der Regel zeitabhängige Aufwandserhöhungen dar und gehen von der Annahme aus, dass bei gegebener Flexibilität die zu erwartende Kostenersparnis oder Reisezeitersparnis einen signifikanten Einfluss auf die Abfahrtszeitwahl hat. Diese Annahme stützt sich auf Beobachtungen geänderter Verkehrsnachfrage bei verkehrlichen Situationen. Wie in Kapitel 2.3 ebenso beschrieben, sollte das NPVM die Schritte der Abfahrtszeitwahl (und somit auch die Spitzenstundenmodellierung) als „Abschätzungswerkzeuge“ nachgelagert abbilden.

Ein Vorschlag zur Abschätzung der Abfahrtszeitwahl basiert zunächst auf der Modellierung der ebenso nachgelagerten Spitzenstundenumlegung. Diese wird hinlänglich genau bereits im jetzigen Modell abgebildet. Hier werden die spitzenstundenfeinen Belastungen auf den Dauerzählstellen mit der Umlegungsbelastung verglichen und durch Einarbeiten von Abfahrtszeitfaktoren ebenso Asymmetrien innerhalb der Verkehrsstrommatrix erzeugt. Dadurch können spitzenstundenfeine Netzbelastungen erstellt werden.

Den Kern des Ansatzes bildet eine stundenfeine Nachfragematrix-Disaggregation, um die gewünschten Reaktionen der Abfahrtszeitwahl abzuschätzen. Dabei sind zunächst die zweckfeinen Abfahrtszeiten raumtypfein aus dem Mikrozensus zu extrahieren. Darauf aufbauend ist ein Zusammenhang zwischen zweckfeiner Abfahrtszeit und Lagegunst des Raumtyps zu finden. Dieser Zusammenhang versucht die Bereitschaft zur Anpassung der Abfahrtszeit raumtypenfein abzubilden. Wichtig hierbei ist, dass in die Berechnung der zeitscheibenfeinen Lagegunst sowohl die zeitlich als auch die räumlich unterschiedlichen relationalen Aufwände bzw. Netzzustände einfließen. Durch die unterschiedlichen relationalen Aufwände können zum Beispiel Reisezeitveränderungen (durch Kapazitätsreduzierung) oder Reisekostenveränderungen (durch Mobility Pricing) abgebildet werden. Dieser Zusammenhang kann dann auf alle heimatseitigen Zellen der zweckfeinen Verkehrsstrommatrizen entsprechend ihrer Raumtypzuordnung ausgedehnt werden.

Ob sich aufgrund der veränderten relationalen Aufwände Verschiebungen innerhalb einer Verkehrsstrommatrix ergeben, ist von einer Grenzwertbetrachtung der Aufwände abhängig. Diese bildet (z. B. über Pivot-Point) das Verharren oder das Wechseln in Abhängigkeit der Aufwandsänderung in die Zeitscheibe vor oder nach der Spitzenstunde ab. Zusätzlich können die durch Verschiebung der Abfahrtszeiten entstehenden Verkehrsstrommatrizen mit den aus dem Mikrozensus zu extrahierenden Werten der Fahrtenanteile, Reisezeiten und Reiseweiten (bis 1 Stunde) verglichen werden.

Der Zusammenhang zwischen zweckfeiner Abfahrtszeit und Lagegunst des Raumtyps, die Umrechnung auf die Zellen sowie die Erstellung der Abfahrtszeitfaktoren lassen ein nachvollziehbares Verfahren entstehen. Dieser Ansatz kann prognostisch über die Veränderung der zweckfeinen Lagegunst (z. B. Kostenveränderung) die Verschiebung der Abfahrtszeitfaktoren berechnen. Es könnten aber ebenso die Abfahrtszeitfaktoren direkt geändert werden. Somit besitzt das Verfahren Vorteile, da es einen transparenten Ansatz verwendet, eine fundierte prognostische Abschätzung zulässt und den gleichen Ansatz zur Abfahrtszeitwahl und Spitzenstundenmodellierung verwendet. In Anlehnung an Abbildung 11, welche das Struktogramm des Gesamtmodells darstellt, ist nachfolgend der grundlegende Aufbau der nachgelagerten Zeitscheibenmodellierung dargestellt.

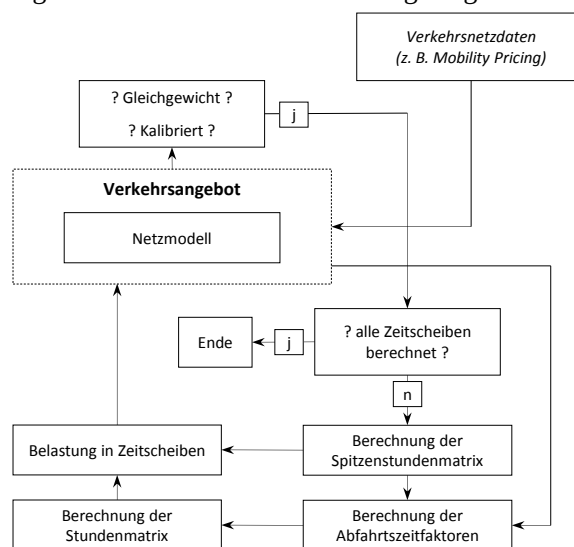


Abbildung 8: Struktogramm der Zeitscheibenmodellierung

7. Ein- und Ausgangsdaten

7.1. Datengenauigkeit

Der Genauigkeitsaspekt der Ein- und Ausgangsdaten ist für jede Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung relevant. Modelle ersetzen - als Stellvertreter - letztlich die nicht vollständig erfassbare Realität der Analyse und ermöglichen überhaupt erst die Prognose. Somit pflanzen sich Fehler in den Eingangsgrößen unweigerlich in der Verkehrsnachfrageberechnung fort. Grundsätzlich sind bei den Eingangsdaten folgende Fehlerquellen zu beachten:

Fehlerquelle Verkehrsinfrastrukturdaten, Netzmodelle:

- bei der (M)IV-Modellierung werden untergeordnete Strassen i.d.R. nicht vollständig modelliert;
- Anfang und Ende der Ortsveränderungen sind nicht die Eintrittsstellen in den öffentlichen Verkehrsraum, sondern die fiktiven Schwerpunkte der Verkehrszellen;
- Parametrisierung der CR-Funktionen ist oft langjährigen Erfahrungen unterworfen und kann kaum verifiziert werden.

Fehlerquelle Raumstrukturdaten:

- geringe Fehler bei Einwohnerdaten (auf der Grundlage der amtlichen Statistik); grössere Fehler bei Beschäftigtenangaben (i.d.R. 5-10%);
- ähnliches Fehlerproblem für alle anderen Raumstrukturdaten.

Fehlerquelle Verkehrsverhaltensdaten:

- fehlender Fach- und Sachverstand bei Abgleich und Systematisierung von raumtypabhängigen Mobilitätsraten, Modal Split, Besetzungsgraden, Reisezeiten und Reiseweiten (vor allem bei Begleitwegen) etc.;
- fehlende Grundlagen als Vergleichsgrößen aus aktuellen Befragungen zur Plausibilisierung und Kalibrierung von Parametern.

Fehlerquelle Verkehrserhebungen im MIV und ÖV:

- Verkehrszählungen sind stets fehlerbehaftet (vor allem in Innenstädten);
- verschiedene Quellen = verschiedene Ergebnisse;
- Fragestellungen wie z. B. welcher Binnenverkehrsanteil gezählt oder welche Hochrechnungsmethode genutzt wird sind zu beantworten.

Fehlerquelle Nachfragemodell:

- benutzt fehlerbehaftete Ausgangsdaten und „verknüpft“ sie mit seinen speziellen Nachfragealgorithmen zu unvermeidlich auch mit Fehlern behafteten Ergebnisdaten;
- Fehlerquellen in Parameterschätzung der Bewertungsfunktion, Modellstrukturen und Rückkopplungsprozeduren;
- falsche Grenzen der Iterationen;
- nicht komplett nachvollziehbare Berechnung aller Ergebnisse und fehlende Protokolle manueller Eingriffe.

Empfehlung zur Datengenauigkeit: Es bedarf einer transparenten Definition von Auftraggeber und Auftragnehmer, welche Eingangsdaten vorliegen und welche Genauigkeit diese besitzen. Des Weiteren sind die Parameter des Angebotsmodells (CR-Funktion etc.) und der Verkehrsverhaltensdaten in ihrer Qualität beidseitig zu überprüfen (z. B. lange Wege im Mikrozensus). Ebenso hat der Auftraggeber vor Beginn der Arbeiten die Einsatzeigenschaften und Grenzen im Nachfragemodell festzulegen (z. B. Parameterschätzungen, Modellstrukturen, Rückkopplungsprozeduren, nachvollziehbare Berechnung etc.)

7.2. Kalibrierung

Die Aussage- und Prognosefähigkeiten eines Modells hängen von qualitativ und quantitativ hochwertigen Kalibrierungsarbeiten im Analysefall bezüglich der Eingangsdaten als auch der Parameterschätzungen ab. Ziel der Kalibrierung ist eine (weitgehende) Übereinstimmung der Modellberechnung mit den empirischen Zählwerten. Dabei gilt ein Modell als kalibriert, wenn alle relevanten Abweichungen plausibilisiert und akzeptiert werden können.

Kalibrierungspunkte, -tiefe und -genauigkeiten müssen sinnvoll von Auftraggeber und Auftragnehmer festgelegt werden.

Primärer Punkt ist i.d.R. die Kalibrierung der Streckenbelastungen. Hierbei wird oft der GEH-Faktor als Abweichungsmass zwischen Streckenbelastung M und Zählung C genutzt.

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \times (M - C)^2}{M + C}}$$

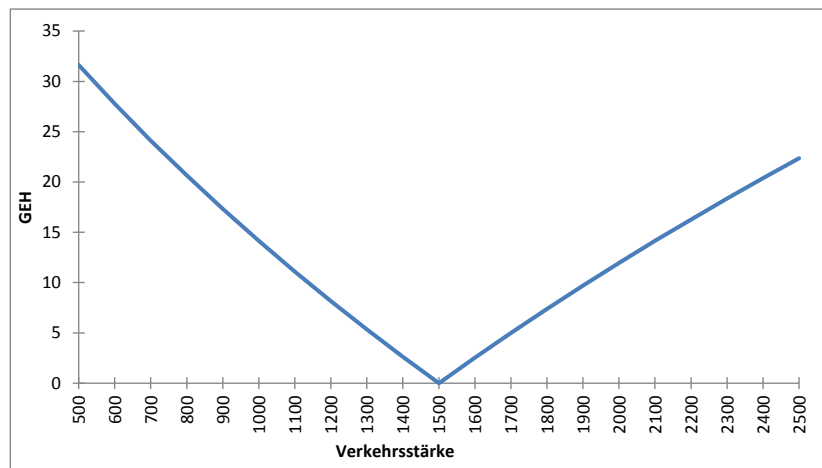


Abbildung 9: GEH-Faktor

Die Vorteile des GEH-Faktors liegen vor allem in der einfachen Berechnung und der Verfügbarkeit vorgeschriebener Masszahlen. Weiterhin ist er abhängig von der Absolutgrösse (bei hoher Verkehrsbelastung, wird der gleiche absolute Abstand zwischen Zählung und Belastung besser beurteilt, als bei niedriger Belastung). Seine Nachteile sind der lineare Verlauf und die fehlende Normierung auf 1. Somit ist er schwer interpretierbar.

Weitere wichtige Kalibrationspunkte sind:

- Quell- und Zielverkehrsaufkommen;
- durchschnittliche Reisezeiten und Fahrtweiten nach Modus und Wegezweck;
- Reisezeitverteilung und Fahrtweitenverteilung nach Modus und Wegezweck;
- entfernungsklassenabhängiger Modal Split nach Wegezweck;
- Verkehrsverflechtungen anhand von Screen Lines.

Eine beispielhafte Übersicht über Kenngrössen zur Bewertung der Modellqualität finden sich in nachstehender Abbildung 10.

Kenngröße	inhaltlich	räumlich	Kontrolldaten	zulässige Abweichung
Anzahl Wege / Werktag	pro Nachfragesegment	gesamtes Untersuchungsgebiet	Haushaltsbefragung	< 2%
Anzahl Wege / Werktag	Sozialversicherungspflichtige Berufspendler	Relationen auf Gemeindeebene	Pendlermatrix der Bundesagentur für Arbeit	Auf 80% der Relationen GEH < 20 Über alle Relationen GEH < 10
Anzahl Wege / Werktag	ÖV	Relationen zwischen den Raumeinheiten der Mittelbereichsebene 2	ÖV Matrix des VVS	Auf 80% der Relationen GEH < 20 Über alle Relationen GEH < 10
Verteilung der Fahrtweite (mittlere Fahrtweite)	pro Nachfragesegment	gesamtes Untersuchungsgebiet	Haushaltsbefragung	< 4% oder < 0,2 km
mittlere Reisezeit einer Person/Tag	pro Nachfragesegment	gesamtes Untersuchungsgebiet	Haushaltsbefragung	< 10% oder < 10 min
Modal-Split	pro Nachfragesegment	gesamtes Untersuchungsgebiet	Haushaltsbefragung	< 2%
Modal-Split	über alle Nachfragesegmente	gesamtes Untersuchungsgebiet	Haushaltsbefragung	< 1%
Verkehrsstärke [Kfz/Werktag]	Pkw-Verkehr	Zählstelle	Querschnittsverkehrszählungen	Auf 80% der Zählstellen GEH < 20 Über alle Zählstellen GEH < 10
Verkehrsleistung (Personenkilometer/Werktag)	ÖV	Verkehrssystem (SSB-Bus, Stadtbahn, S-Bahn, Regionalbus)	VVS Daten	< 5%

Abbildung 10: Qualitätsanforderungen [Quelle: Verband Region Stuttgart 21, 2013]

Die Kalibrierung findet ausschliesslich an den dafür vorgesehenen Verhaltensparametern statt. Alles andere ist aus Modellierungssicht nicht zulässig. So ist zum Beispiel der Einsatz von V-Strom-Fuzzy etc. zur Annäherung an die Streckenbelastungen nicht als Kalibration zu verstehen. V-Strom-Fuzzy passt eine Verkehrsstrommatrix so an, dass gegebene Streckenbelastungen bestmöglich erreicht werden. Das Problem dabei ist, dass die „neue“ Matrix durch die Zählstellen unterbestimmt ist. Mittels einer Zielfunktion wird die Matrix über die Maximierung der Entropie / Minimierung des Informationsgewinns, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Proportionen der alten Matrix, erstellt. Die entstehenden Korrekturfaktoren sind nicht prognosefähig. Allerdings kann V-Strom-Fuzzy zum „Glattziehen“ einer Matrix für Präsentationszwecke genutzt werden.

Die Modellqualität wird somit durch vielfältige Aspekte beeinflusst. Treffend fassen diese Punkte Sammer et al. zusammen:

- Definition der Zielsetzungen vor Beginn der Arbeiten;
- Festlegung der Rahmenbedingungen und Eingangsdaten;
- Offenlegung der zu erwartenden Modellgenauigkeiten, Unsicherheiten sowie Fehlerrisiken;
- Transparenz der Modellmechanismen und Verhaltensparameter;
- Sensitivitätstests;
- Protokolle manueller Eingriffe;
- Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsprozesse;
- Vermeidung von Verkehrsmodellmonopolen.

8. Softwareempfehlung

In der Praxis wird eine Modellsoftware benötigt, welche nicht nur die bisher genannten Punkte umfasst, sondern auch flexibel und fachgerecht von den Anwendern nutzbar ist. Folgende Punkte sollten dabei als Minimalanforderung berücksichtigt werden:

- Softwarelösungen die nicht auf handelsüblichen Personal-Computern funktionieren, sollten nicht zur Anwendung kommen (z. B. überdurchschnittlicher Arbeitsspeicher, welcher nur mit bestimmten Controllern verwaltet werden kann).
- Aufgrund der Softwareausstattung im ARE sollte die verwendende Software mit aktuellen Windows-Versionen kompatibel sein, bzw. aktuelle Windows-Standards unterstützen.
- Die Software bzw. das Modell sollte, zumindest nach einer zeitlich angemessenen Einarbeitungszeit, vom ARE und dessen Auftragnehmern selbstständig installiert, angewandt und gepflegt werden können.
- Um zeitintensive und fehleranfällige ÜbergabeprozEDUREN zu vermeiden, sollten alle Schritte der Angebots- und Nachfragemodellierung in einer einheitlichen Softwarelösung modelliert werden können.
- Um die Übersichtlichkeit zu wahren, müssen an die Software besondere Anforderungen bzgl. des Daten- und Dateimanagements gestellt werden. So muss die Software eine leistungsstarke integrierte Datenbank selbstständig aufbauen und verwalten können. Idealerweise ist diese extern über Standardsoftware (z. B. MS Access) oder Standardprotokolle (z. B. ODBC) ansteuerbar.
- Die Softwarelösung sollte die grundlegenden Modelltheorien für ein multimodales Verkehrsmodell in einem hochverdichteten Raum beinhalten. (z. B. Abbildung von unterschiedlichen Aufwänden mit frei wählbaren Bewertungsfunktionen, Verwendung von Aufkommen und/o-der Potentialen von P+R-Plätzen, Abbildung von Verhaltensunterschieden in einzelnen Gebieten bzw. in Korridoren etc.)
- Bis auf künstlich erzeugte Grenzen (z. B. Versionsgrößen), sollten praktisch keine Modellierungsgrenzen durch die Software oder die zugrundeliegenden Algorithmen entstehen. Das betrifft im Besonderen die Modellierungsberechnung, die Speicherfähigkeit und das Datenmanagement. Nur so können auch sehr grosse Modelle noch erweitert werden. Zusätzlich müssen die Berechnungen in einem „verträglichen“ Zeitrahmen stattfinden.
- Die Software sollte die Integration anderer Systeme zulassen (z. B. GIS, Zensus, HAFAS etc.). Zusätzlich sollte das Programm um eigene Ansätze erweiterbar sein.

Empfehlung zu den Hard- und Softwareanforderungen: Erwartungsgemäss existieren sehr viele unterschiedliche Softwarelösungen auf dem Markt. Allerdings sind fast genauso viele Lösungen ausschliesslich für einzelne Teile einer strategischen Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung konzipiert. Soll ein überwiegender Teil der o.g. Punkte erfüllt werden, reduziert sich der Kreis der Softwarelösungen wahrscheinlich wie folgt:

Hersteller	Software
Atkins	SATURN 10.x
Caliper	TransCAD X.x
Citilabs	CUBE 6.x
INRO	EMME 4.x
IVV Aachen	Venus 12.x
Omnitrans	OmniTRANS 6.x
PTV AG	VISUM 14.x
TSS	Aimsun 8.x

Tabelle 11: Grundlegend empfohlene Softwareprodukte

9. Zielerreichung

Mit den hier vorliegenden Vorschlägen wird ein Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell der nächsten Generation entstehen, welches die zu Beginn genannten Ziele erfüllt. Grundlegend wird das vorgeschlagene Modell wie folgt strukturiert:

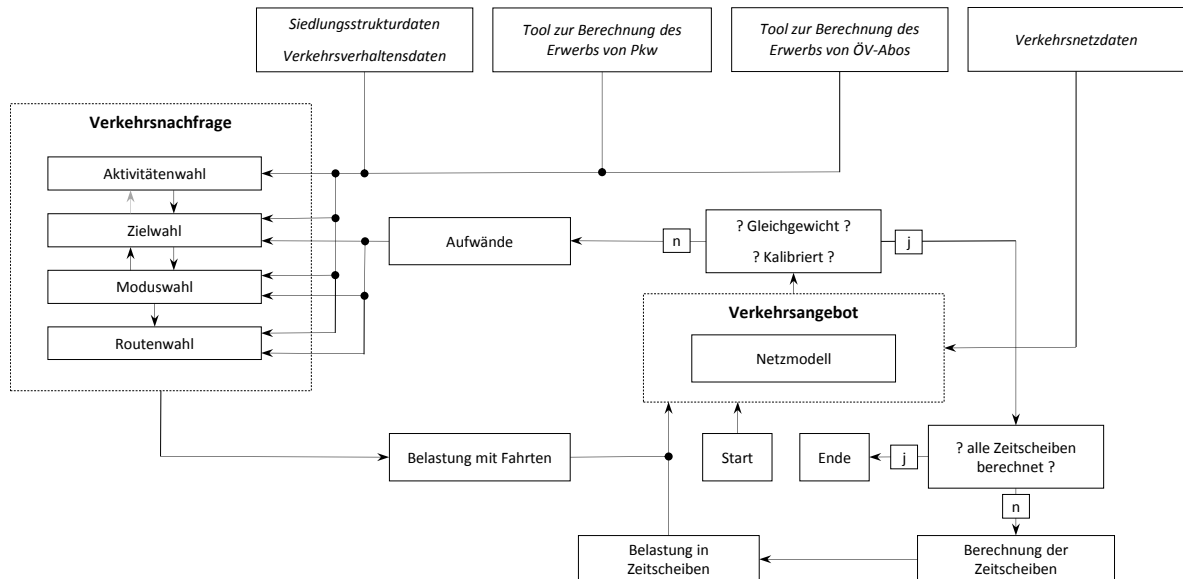


Abbildung 11: Struktogramm des Modellaufbaus (kursiv: Eingangsdaten)

9.1. Verkehrsangebotsmodell

Verfeinerte Zonen- und Netzstrukturen: Die generelle Erweiterung des NPVM auf der schweizerischen Ebene auf das durchschnittliche Aggregationsniveau der kantonalen Modelle (ca. 9.000 bis 10.000 Binnenzellen) erfüllt die geforderte Verbesserung der Zonen- und Netzstrukturen und somit der Modellierungsergebnisse.

Untergliederung des LV in Velo und Fuss: Dies wird beim grundlegenden Aufbau des NPVM auf Basis von vier Verkehrsmodi (Fuss, Rad, ÖV und PW) beachtet.

Verwendung der Datenmodelle „Schienennetz“ und „Haltstellen“: Die ÖV-Modellierung über das BAV-Netz in Verbindung mit HAFAS-Daten der SBB beachtet diesen Punkt.

Beachtung von ÖV-Auslastungsgraden: Die Relevanz dieses Ziels wurde im Bericht diskutiert. Ob das Ziel einer Modellierung der ÖV-Auslastungsgrade und der Wirkung auf die Verkehrsnachfrage adressiert werden kann, hängt auch davon ab, ob dies technisch, d.h. softwareseitig, überhaupt möglich ist.

Abstimmung der Massnahmen Strasse und Schiene: Das NPVM wird MIV- und ÖV-Systeme in wechselseitiger Einflussnahme modellieren, d.h. Massnahmen mit Wirkung auf den Modal Split zwischen den Verkehrsträgern können analysiert werden.

9.2. Verkehrsnachfragemodell (Eingangsdaten)

Strukturdaten für kantonale Modelle und das NPVM standardisieren: Durch die Verwendung des Aggregationsniveaus der kantonalen Modelle werden auch die Strukturdaten der Modelle standardisiert.

Abbildung des Aussenverkehrs in Verbindung mit kantonalen Modellen: Es ist zu klären, welche Modelle (NPVM, kantonale Modelle) welche Eingangsdaten für das jeweils andere Modell liefern können.

Abbildung der Mobilitätswerkzeuge (auch mit regionalen ÖV-Abonnements): Die Verwendung eines vorgeschalteten Tools zur Berechnung des Erwerbs von ÖV-Abos erfüllt dieses Ziel.

Prognosemodell für die Zusammensetzung des Fuhrparks: Dies wird ebenfalls durch ein vorgeschaltetes Tools zur Berechnung des Erwerbs von PW beachtet.

9.3. Verkehrsnachfragemodell (Modelltheorie)

Detailliertere Modellierung der Zusammenhänge zwischen Siedlung und Verkehr: Die vorgeschlagene Empfehlung zur Nachfragesegmentierung in Verbindung mit der Abbildung von Verhaltensunterschieden in Raumtypen (z. B. einzelne Gebieten und Korridore) über ein eigenes Wahlmodell adressiert das genannte Ziel.

Verkehrsbelastungen insbesondere in den Städten und Agglomerationen: Durch die Verfeinerung des Netzes (MIV-Netz, BAV-Netz) und die Zellenverkleinerung können alle nachfragerrelevanten Punkte, von der Erzeugung bis zur Umlegung, auf einem sehr disaggregierten Niveau berechnet werden.

Abbildung der Wirkung von unterschiedlichen Preisen und Preisstrukturen: Die Verwendung nicht-linearer Fahrzeugkosten/km und differenzierter ÖV-Kosten (GA, Verkehrsverbünde etc.) nehmen Bezug auf dieses Ziel.

9.4. Verkehrsnachfragemodell (Modelltheorie)

Modellierung von Massnahmen zum Brechen von Verkehrsspitzen und Modellierung von Massnahmen zum Mobility Pricing: Massnahmen zum Brechen von Verkehrsspitzen und Mobility Pricing stellen in der Regel zeitabhängige Aufwandserhöhungen dar. Beide Punkte können mit dem beschriebenen Verfahren (siehe Kapitel 6.8, Nachgelagerte Zeitscheibenmodellierung) abgeschätzt werden. Aus dem Zusammenhang zwischen zweckfeiner Abfahrtszeit und Lagegunst des Raumtyps, sowie der Erstellung der Abfahrtszeitfaktoren (z. B. in Abhängigkeit zeitabhängiger Kosten), kann prognostisch die Verschiebung der Abfahrtszeit berechnet werden.

9.5. Verkehrsnachfragemodell (Auswertungen)

Validierungsgrundlagen mit den Kantonen abzustimmen: Durch die Verwendung des Aggregationsniveaus der kantonalen Modelle wird auch die Übernahme bzw. der Austausch der Validierungsgrundlagen der Kantone möglich.

Detailliertere Verkehrsanalysen (Erreichbarkeiten, Verkehrsleistungen, Wechselwirkungen zwischen Kernstädten, Agglomerationen und ländlichem Raum) und Vergleich Regionalverkehr und Fernverkehr für STEP: Die Erweiterung des NPVM auf der schweizerischen Ebene auf das durchschnittliche Aggregationsniveau der kantonalen Modelle, die grundlegende Untergliederung nach Fuss, Rad, ÖV und PW sowie die Verwendung eines höher aufgelösten MIV-Netzes und des BAV-Netzes lassen diese detaillierten Auswertungen zu.

Quellenverzeichnis:

- Baltas G, Saridakis C (2013): An empirical investigation of the impact of behavioural and psychographic consumer characteristics on car preferences: An integrated model of car type choice. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 54
- Bolduc D, Boucher N, Alvarez-Daziano R (2008): Hybrid Choice Modeling of New Technologies for Car Choice in Canada. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2082, Transportation Research Board of the National Academies
- Ciari F, Axhausen K W (2012): Choosing carpooling or car sharing as a mode: Swiss stated choice experiments, paper presented at the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Ciari F, Balmer M, Axhausen K W (2008): A new mode choice model for a multi-agent transport simulation. Conference paper STRC
- de Haan P, Müller M G, Scholz R W (2009): How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars, part II: Forecasting effects of feebates based on energy-efficiency. Energy Policy, 37
- Delbosc A, Currie G (2012): Choice and disadvantage in low-car ownership households. Transport Policy 23
- Deutsches Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2011): Forschungsprojekt „Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen“
- Deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2001): Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten
- Erath A, Axhausen K W (2010): Long term fuel price elasticity: Effects on mobility tool ownership and residential location choice. Im Auftrag BFE-EWG
- Friedrich M, Schiller C (2015): Modellierung von Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage
- Gao Y, Rasouli S, Timmermans H, Wang Y (2014): Reasons for not Buying a Car: A Probit-selection Multinomial Logit Choice Model. Procedia Environmental Sciences, Volume 22
- Hoën A, Koetse M J (2014): A choice experiment on alternative fuel vehicle preferences of private car owners in the Netherlands. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 61
- Innocenti A, Lattarulo P, Pazienza M G (2013): Car stickiness: Heuristics and biases in travel choice. Transport Policy 25
- Jäggi B, Erath A, Dobler C, Axhausen K W (2012): Modeling Household Fleet Choice as Function of Fuel Price by Using a Multiple Discrete–Continuous Choice Model. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2302
- Kim J, Rasouli S, Timmermans H (2014): Expanding scope of hybrid choice models allowing for mixture of social influences and latent attitudes: Application to intended purchase of electric cars. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 69
- Kok R (2013): New car preferences move away from greater size, weight and power: Impact of Dutch consumer choices on average CO2 emissions. Transportation Research Part D 21
- Link H (2015): Is car drivers' response to congestion charging schemes based on the correct perception of price signals? Transportation Research Part A, 71
- Lohse D (1997): Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und Verkehrsplanung, Band 2

- Müller M G, de Haan P (2009): How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars, part I: Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation. *Energy Policy*, 37
- Nayum A, Klöckner C (2014): A comprehensive socio-psychological approach to car type choice. *Journal of Environmental Psychology* 40
- Peters A, de Haan P, Scholz R W (2015): Understanding car buying behavior: Psychological determinants of energy efficiency and practical implications. *International Journal of Sustainable Transportation*, 9
- PTV AG (2015): Handbuch VISUM 14
- Rieser M, Grether D, Nagel K (2009): Adding Mode Choice to Multiagent Transport Simulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2132, Transportation Research Board of the National Academies
- SBB (2014): Distanzzeiger T603
- Scheiner J, Holz-Rau C (2012): Gendered travel mode choice: a focus on car deficient households. *J Transport Geography* 24
- Schweizer Bundesamt für Raumentwicklung (2010): Verkehrsmodellierung im UVEK, Konzeptstudie zur Zonen- und Netzverfeinerung
- Schweizer Bundesamt für Raumentwicklung (2012): Verkehrsmodellierung im UVEK, Zonen- und Netzstrukturen des Nationalen Personenverkehrsmodells
- Schweizer Bundesamt für Raumentwicklung (2014): Verkehrsmodellierung im UVEK, Synthese Bedürfnisanalyse Bundesämter / Kantone
- Valeri E, Danielis R (2015): Simulating the market penetration of cars with alternative fuel powertrain technologies in Italy. *Transport Policy*, Volume 37
- Verband Region Stuttgart – Körperschaft des öffentlichen Rechts (2013): Verkehrsmodell Stuttgart 21
- Vrtic M, Schuessler N, Erath A, Axhausen K W (2009): The impacts of road pricing on route and mode choice behaviour. *Journal of Choice Modelling*
- Vrtic M., Schüssler N, Erath A, Bürgle M, Axhausen K W, Frejinger E, Bierlaire M, Rudel R, Scagnolari S, Maggi R (2008): Einbezug der Reisekosten bei der Modellierung des Mobilitätsverhaltens, final report for SVI 2005/004, Schriftenreihe, 1191
- Weis C, Axhausen K W, Schlich R, Zbinden R (2010): Models of Mode Choice and Mobility Tool Ownership Beyond 2008 Fuel Prices. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2157, Transportation Research Board of the National Academies
- Xu G, Miwa T, Morikawa T, Yamamoto T (2015): Vehicle purchasing behaviors comparison in two-stage choice perspective before and after eco-car promotion policy in Japan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 34