

Anwendung eines agentenbasierten Modells der Verkehrsnachfrage auf die Schweiz

Konrad Meister

IVT, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Tel: +41-44-633 30 88, Fax: +41-44-633 10 57, E-Mail: meister (at) ivt.baug.ethz.ch

Marcel Rieser

VSP, TU Berlin, D-10587 Berlin, Tel: +49-30-314 25 258, Fax: +49-30-314 26 269, E-Mail: rieser (at) vsp.tu-berlin.de

Francesco Ciari

IVT, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Tel: +41-44-633 71 65, Fax: +41-44-633 10 57, E-Mail: ciari (at) ivt.baug.ethz.ch

Andreas Horni

IVT, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Tel: +41-44-633 31 51, Fax: +41-44-633 10 57, E-Mail: horni (at) ivt.baug.ethz.ch

Michael Balmer

IVT, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Tel: +41-44-633 27 80, Fax: +41-44-633 10 57, E-Mail: balmer (at) ivt.baug.ethz.ch

Kay W. Axhausen

IVT, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Tel: +41-44-633 39 43, Fax: +41-44-633 10 57, E-Mail: axhausen (at) ivt.baug.ethz.ch

Kurzfassung

Heutige Fragen an die Verkehrsplanung wecken ein Bedürfnis zur Abschätzung der tageszeitlichen Dynamik der Verkehrsnachfrage. Agentenbasierte Modelle des Verkehrsverhaltens simulieren individuelle Aktivitätenpläne und damit explizit die Tageszeit. In diesem Artikel wird die Anwendung des Simulationssystems MATSim-T auf den Strassenverkehr der ganzen Schweiz präsentiert. Die Dynamik der Verkehrsnachfrage kann gut abgebildet werden, was ein Vergleich mit repräsentativen Beobachtungen zeigt.

1 Einleitung

Heutige Fragen an die Verkehrsplanung wecken ein Bedürfnis zur Abschätzung der tageszeitlichen Dynamik der Verkehrsnachfrage. Zu diesen Fragen gehören beispielsweise die Wirkung tageszeitabhängiger Strassennutzungsgebühren und die genauere Berechnung des Nutzens von Infrastrukturinvestitionen.

Zu welchem Zeitpunkt eine Person einen Weg realisiert, kann mit Hilfe aktivitätenbasierter Verkehrsmodelle abgeschätzt werden. Die Modelle treffen die Annahme, dass Verkehr ein Nebenprodukt menschlicher Aktivitäten ist, die wiederum durchgeführt werden um bestimmte Bedürfnisse zu befriedigen. Finden diese Aktivitäten an verschiedenen Orten statt ist eine Ortsveränderung notwendig, und Verkehr wird produziert. Die alltägliche Beobachtung zeigt, dass zu bestimmten Tageszeiten viele Menschen dazu den gleichen Verkehrsweg nehmen wollen, zu anderen Zeiten aber fast alle zuhause sind. Dieser veränderlichen Nachfrage steht allerdings eine im Individualverkehr in der Regel nicht veränderbare Angebotskapazität gegenüber. Das öffentliche Gut Strasse befindet sich folgerichtig regelmässig in Zuständen von Überlastung, Normalbelastung und Nichtbenutzung. Letztendlich stellt sich die Frage des optimalen Verhältnisses dieser Zustände. Eine prägnante Zusammenfassung der Problematik liefern Becker *et al.* [1].

Es ist der Anspruch aktivitätenbasierter Verkehrsmodelle, diese Dynamik zu verstehen und in einem Computermodell zu reproduzieren. In diesem Artikel wird ein solches Modell für den Strassenverkehr der ganzen Schweiz vorgestellt. In der verwendeten Software MATSim-T¹ wird das Aktivitäten- und Reiseverhalten künstlicher Personen simuliert. Das Besondere ist, dass Informationen über Eigenschaften und Intentionen dieser sogenannten Agenten über den kompletten Modellprozess bekannt sind, und sich nicht auf einzelne Aspekte des Verkehrsverhaltens beschränken. Die agentenbasierte Methode wird in Abschnitt 2 näher erläutert. Danach werden die Resultate der Anwendung dieser Methode auf die Verkehrsnachfrage der Schweiz angewandt. Dazu gehört die Modellierung der Aktivitäten, der zugehörigen Wege und deren Attribute, sowie die auf die spezielle Methodik zugeschnittene Konfiguration von MATSim-T (Abschnitt 3). Schliesslich werden die Resultate ausgewertet und mit repräsentativen Beobachtungen verglichen (Abschnitt 4).

2 Agenten und Aktivitätenpläne

2.1 Überblick

In unserer Simulation wird die Verkehrsnachfrage durch Agenten produziert, die eigene Entscheidungen über ihr Verhalten treffen. Ein Agent ist ein statistischer Repräsentant eines Einwohners der modellierten Region. Der Modellansatz hat drei wichtige Bestandteile:

- Jeder Agent verfügt über einen Aktivitätenplan, in welchem seine Absichten für eine be-

¹Multi Agent Transport Simulation Toolkit, <http://www.matsim.org>

```
<person id="393241" sex="m" age="37" income="50000">
  <plan>
    <act type="home" link="58" start_time="00:00" dur="07:00" end_time="07:00"
      />
    <leg mode="car" dept_time="07:00" trav_time="00:25" arr_time="07:25">
      <route>1932 1933 1934 1947</route>
    </leg>
    <act type="work" link="844" start_time="07:25" dur="09:00" end_time="16:25"
      />
    <leg mode="car" dept_time="16:25" trav_time="00:14" arr_time="16:39">
      <route>1934 1933</route>
    </leg>
    <act type="home" link="58" start_time="16:39" dur="07:21" end_time="24:00"
      />
  </plan>
</person>
```

Abbildung 1: Ein typischer Aktivitätenplan in XML.

Agent Nr. 393241 ist männlich und 37 Jahre alt. Er verlässt sein Zuhause um 7:00 in Richtung Arbeit. Der dafür zurückgelegte Weg führt über vier Knoten (fünf Strassenabschnitte) und hat eine erwartete Reisezeit von 25 Minuten. Der Agent bleibt 9 Stunden auf Arbeit, und fährt danach über eine Route mit zwei Knoten wieder nach Hause. - Quelle: Balmer [2], S. 140

stimmte Zeitspanne kodiert sind, typischerweise einen Tag.

- Die Pläne aller Agenten werden gleichzeitig in einem Modell der realen Welt simuliert. In unserem Falle handelt es sich dabei um eine Simulation des Verkehrsflusses.
- Die Agenten können über die Verhältnisse in der realen Welt lernen. Dies wird durch iteriertes Erzeugen der Aktivitätenpläne und deren Simulation erreicht. Das System hält mehrere Pläne pro Agent, sowie deren Bewertung vor. Je besser ein Plan bewertet wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass er für die nächste Iteration der Simulation des Verkehrsflusses wieder ausgewählt wird. Durch die veränderten Verhältnisse im Modell der realen Welt ist es deswegen aber auch möglich, dass zuvor schlecht bewertete Pläne in einem weiteren Lauf wesentlich besser abschneiden.

Ein Plan enthält alle Aktivitäten des Tages die der Agent beabsichtigt durchzuführen, sowie die für Ortsveränderungen notwendigen Wege (Abbildung 1). Aktivitäten sind durch ihre Reihenfolge, den Typ, den Ort der Ausführung und ihre Dauer gekennzeichnet. Details der Wege sind das Verkehrsmittel, die Route und erwartete Abfahrts- und Ankunftszeiten. In dieser Studie gibt es fünf verschiedene Aktivitätentypen, nur ein Verkehrsmittel (MIV) wird detailliert simuliert.

Die Modifikation eines Plans basiert auf einer Menge von Entscheidungen, für die jeweils ein Modul des Simulationssystems verantwortlich ist. Ein Agent ruft mehrere Module auf um seinen Plan mit den darin getroffenen Entscheidungen anzureichern. Im vorliegenden Artikel werden

zwei Module benutzt, die Entscheidungen für die Zeitplanung bzw. die Routen der geplanten Wege treffen. Sobald ein Agent seinen Plan fertig modifiziert hat, wird er der Simulation des Verkehrsflusses zur Verfügung gestellt. Dieses Modul simuliert die zur Ausführung gewählten Pläne aller Agenten gleichzeitig auf einem Modell des Strassennetzes, wobei die Agenten miteinander interagieren weil sie sich die zur Verfügung stehende Kapazität teilen müssen. Die Ausgabe dieses Moduls ist eine Liste von Ereignissen (*events*) aus der rekonstruiert werden kann was den Agenten während ihres simulierten Tages passierte.

Das Resultat der Simulation des Verkehrsflusses (z.B. Stau auf einem bestimmten Strassenabschnitt zu einer bestimmten Zeit) hängt von den Entscheidungen der Agenten ab die sie zuvor getroffen haben. Diese Entscheidungen können zufällig getroffen werden, aber natürlich auch von den Ergebnissen der Simulation des Verkehrsflusses abhängen, beispielsweise Erwartung über Stauzustände. Es gibt also Wechselwirkungen zwischen den Entscheidungen der Agenten und den Verhältnissen in ihrer physischen Umwelt. Dieses dynamische Problem wird wie bei numerischen Verfahren durch iterative Rückkopplung gelöst:

1. Eine Anfangslösung der Entscheidungen und die entsprechenden Pläne werden erzeugt, z.B. aufgrund eines belastungsfreien Netzmodells und zufällig gewählten Abfahrtszeiten.
2. Die Pläne werden in der Simulation des Verkehrsflusses ausgeführt.
3. Die ausgeführten Pläne werden bewertet.
4. Eine Teilmenge der Agenten bekommt die Chance einen neuen Plan zu erzeugen, eventuell basierend auf der Bewertung oder auf detaillierten Informationen aus der Simulation des Verkehrsflusses.
5. Solange die Entscheidungen den Erwartungen nicht entsprechen, gehe zu Schritt 2, sonst Ende.

Der oben beschriebene iterative Ansatz ist ein Beispiel für einen koevolutionären Prozess: Jeder Agent sucht die für ihn beste Entscheidung, und alle anderen tun das gleiche.

2.2 Bewertung von Plänen

Ein Modell eines evolutionären Prozesses benötigt einen Weg verschiedene Strategien, in unserem Fall Aktivitätenpläne, zu vergleichen. Der einfachste Weg ist einem Plan einen Zahlenwert zuzuordnen. Dies entspricht der Fitnessfunktion bei genetischen Algorithmen, oder Zielfunktionen bei Optimierungsproblemen.

Im Prinzip kann irgendeine Bewertungsmethode herangezogen werden, zum Beispiel *prospect theory* [3]. Unser Ansatz würde im Wesentlichen auch mit Selektion basierend auf dem Rang statt auf dem konkreten Nutzen funktionieren. In dieser Arbeit wird ein nutzenorientierter Ansatz

verwendet. Er orientiert sich an Vickrey's Modell der Wahl der Abfahrtszeit [4, 5], wird jedoch von einzelnen Wegen auf unser Konzept der Verkehrsnachfrage mit kompletten Aktivitätenplänen erweitert [6].

Der Gesamtwert eines Plans ergibt sich aus der Summe der Werte seiner Bestandteile:

$$U_{total} = \sum_{i=1}^n U_{perf,i} + \sum_{i=1}^n U_{late,i} + \sum_{i=1}^n U_{travel,i} \quad (1)$$

mit

U_{total} Gesamtnutzen eines Plans

n Anzahl Aktivitäten (entspricht der Anzahl Wege: ein Aufenthalt zuhause wird immer als erste Aktivität angenommen)

$U_{perf,i}$ (Positiver) Nutzen des Durchführens von Aktivität i

$U_{late,i}$ (Negativer) Nutzen durch Verspätung bei Aktivität i deren Beginn zeitlich fixiert ist

$U_{travel,i}$ (Negativer) Nutzen des Reisens auf Weg i

Für den Nutzen des Durchführens einer Aktivität nimmt logarithmisch mit ihrer Dauer zu. Vernachlässigt man die Terme bezüglich Verspätung und Reisen, handelt es sich um eine Cobb-Douglas-Nutzenfunktion für den Konsum verschiedener Aktivitäten mit normalen Präferenzen bezüglich deren Dauer [7, S. 61 ff.].

2.3 Verwandte Arbeiten

Verschiedene Methoden verfolgen den gleichen Modellzweck einer tageszeitlich variierenden Verkehrsnachfrage. Sie basieren jedoch nicht auf dem agentenbasierten Ansatz mit zeitlich konsistenten Aktivitätenplänen, sondern auf in Quelle-Ziel-Matrizen aggregierten isolierten Wegen wie sie in klassischen statischen Verkehrsmodellen eingesetzt werden. Diese Matrizen werden mit verschiedenen Methoden über den modellierten Durchschnittstag verteilt und auf das Modell des Verkehrsnetzes angewandt.

- Die für Verkehrsplanung zuständigen Schweizer Bundesbehörden setzen eine in 24 Stunden disaggregierte bimodale Quelle-Ziel-Matrix auf Gemeindeebene ein [8]. Die zeitliche und räumliche Differenzierung der Aktivitäten wird mit einer Aufteilung der Matrix in sog. Quelle-Ziel-Gruppen erreicht [9]. Jede Stundenmatrix wird mit einem statischen Umlenungsverfahren auf das Netzwerk angewandt, wobei jeweils die Stundengrenzen überschreitende Wege übernommen bzw. weitergereicht werden [10].
- Eine Verbindung zwischen in der Regel verfügbaren statischen Quelle-Ziel-Matrizen und einer individuenbasierten dynamischen Verkehrssimulation stellt METROPOLIS dar [11].

Anstatt jedoch 24 Teilmatrizen zu erzeugen, werden die isolierten Wege kontinuierlich auf die Tageszeit verteilt. Dies geschieht mithilfe diskreter Entscheidungsmodelle basierend auf Vickrey's Modell der Wahl der Abfahrtszeit, das auch in der hier verwendeten Nutzenfunktion kompletter Tagespläne enthalten ist. Die Wege werden in einem mesoskopischen Modell des Verkehrsflusses simuliert. Wie in MATSim-T werden Nachfrageerzeugung und deren Simulation iteriert. Zielfunktion ist die Minimierung des Unterschieds zwischen erwarteter tageszeitlicher Kostenstruktur und dem Resultat der Simulation.

3 Das Szenario Schweiz

Zur Erstellung eines Modells für eine bestimmte Region (Szenario) gehört die Modellierung der initialen Verkehrsnachfrage sowie die Konfiguration der Module der Multiagenten-Verkehrssimulation.

3.1 Erzeugung der Verkehrsnachfrage

Zunächst ist die Erzeugung einer ersten Generation der Verkehrsnachfrage nötig. Dies beinhaltet die Erzeugung einer künstlichen Agentenpopulation für die Schweiz, sowie die schrittweise Anreicherung ihres jeweiligen ersten Aktivitätenplans [12]. Das dazu benutzte Programm zur Erzeugung initialer individueller Nachfrage kann die notwendigen, in verschiedenen räumlichen Auflösungen erhältlichen Daten fusionieren und zu Aktivitätenplänen verarbeiten [13].

Synthetische Population Zunächst wird aus Volkszählungsdaten des Jahres 2000 eine künstliche Agentenpopulation der Schweiz erzeugt [14]². Für jeden der ca. 7,3 Mio. Einwohner der Schweiz wird ein Agent erzeugt, ein Softwareobjekt, welches einen Einwohner statistisch repräsentiert. In der Regel sind Volkszählungsdaten aus Datenschutzgründen entweder räumlich oder wertemässig verschmiert. Der Anspruch an die Qualität der synthetischen Population ist, dass sie dieselben statistischen Eigenschaften wie die echte Population aufweist, anstatt jeden Einwohner 1:1 abzubilden. Zu den Eigenschaften des Agenten gehört zunächst die auf den Hektar genaue Koordinate des Wohnorts, die später der Aktivität *Zuhause sein* zugeordnet wird (die Schweizer Volkszählungsdaten werden hektarscharf veröffentlicht). Weitere Attribute sind soziodemographischer Art: Alter, Geschlecht und ob sie in einem Arbeitsverhältnis stehen.

Fahrerlaubnisbesitz Die Agenten werden mit Informationen zum Besitz einer Fahrerlaubnis versehen. Sie sind massgebend für die spätere Modellierung der Verkehrsmittelwahl. Sie werden durch die Simulation eines Logit-Modells bewerkstelligt, welches mit Daten des Schweizer Mikrozensus zum Verkehrsverhalten 2005 geschätzt wurde [15, 16]. Wesentliche Ergebnisse dieses Modells sind:

²Schon dieser erste Schritt der Nachfragemodellierung basiert auf Daten, die nicht in jeder Region verfügbar sind. So führt beispielsweise Deutschland seit 1987 keine Volkszählungen mehr durch.

- Je jünger eine Person ist (ab 18 Jahre), desto wahrscheinlicher hat sie eine Fahrerlaubnis.
- Männer haben eher eine Fahrerlaubnis als Frauen.
- Je ländlicher die Wohngemeinde, desto höher ist der Anteil Einwohner die eine Fahrerlaubnis besitzen.
- 62,8% der Agenten besitzen eine Fahrerlaubnis.

Aktivitätenketten Die im Mikrozensus erhobenen Aktivitätenketten werden gewichtet auf die Agentenpopulation verteilt. Das beobachtete Verhalten wird auf Sequenzen der Aktivitäten *Zuhause sein, Arbeit, Bildung, Einkaufen* und *Freizeit* reduziert. Die erste Aktivität ist immer ein Aufenthalt zuhause, und die Kette endet auch immer zuhause. Weiterhin werden die Ketten nach beobachteter Dauer der Aktivitäten unterschieden: Die typische angestrebte Aktivitätendauer t_i^* wird stundengenau auf die beobachtete Dauer gesetzt. Sie ist ein wesentlicher Parameter der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Nutzenfunktion [6].

Mittlerweile sind also folgende Informationen über insgesamt 7 270 378 Agenten bekannt:

- Wohnort (hektarscharf)
- Alter, Geschlecht, Arbeitsverhältnis ja/nein
- Besitz Fahrerlaubnis ja/nein
- Aktivitätenkette, z.B. Zuhause - Arbeit - Einkaufen - Zuhause
- typische Dauern der einzelnen Aktivitäten

Primäre Aktivitätenstandorte Für gewisse Aktivitätentypen sind grobe räumliche Häufigkeitsverteilungen verschiedenen Detailgrades bekannt. So ist die Information über den Wohnort hektarscharf, während für Arbeit und Bildung gemeindefeine Informationen vorliegen (Pendlermatrix aus der Volkszählung 2000). Daraus wird für jede Aktivität jedes Agenten per Monte-Carlo-Simulation eine genaue Koordinate gezogen um sie später dem Modell des Strassennetzes zuordnen zu können. Die Orte dieser sogenannten primären Aktivitäten (Zuhause, Arbeit, Bildung) dienen als Randbedingungen des Szenarios und werden im späteren koevolutionären Anpassungsprozess nicht variiert. Sie dienen als Ankerpunkte für den Aktivitätenraum des Agenten, also für die Wahl der Orte der sekundären Aktivitäten sowie die Routenwahl (s. weitere Punkte). Durch die Eidgenössische Betriebszählung 2001 ist hektarscharf bekannt, wie die Arbeitsplätze und somit auch die Aktivitätentypen räumlich verteilt sind [17, 18]. Die zufällige Ziehung der Koordinaten wird mit diesen Informationen gewichtet.

Sekundäre Aktivitätenstandorte Für die weiteren Aktivitätentypen (Einkaufen, Freizeit) sind keine räumlichen Verteilungen bekannt. Zur Standortwahl wird eine Nachbarschaftssuche angewandt. Enthält die Aktivitätenkette nur eine primäre Aktivität, d.h. Zuhause sein, wird in einer kreisrunden Fläche um den Wohnort mit einem der Gemeindefläche proportionalen Radius gesucht. Unter den gefundenen Alternativen wird eine zufällig ausgewählt. Sollte keine Gelegenheit vorhanden sein, wird der Radius verdoppelt und erneut gesucht. Sind zwei primäre Aktivitäten vorhanden, wird in einem Kreis gesucht der beide primäre Aktivitätenorte enthält und dessen Radius proportional zur deren Entfernung ist. Er wird auch hier gegebenenfalls verdoppelt. Die Ziehung der konkreten Koordinate ist wie bei den primären Aktivitäten durch detailliertere Informationen aus der Betriebszählung gewichtet.

Mobilitätswerkzeuge Auf Basis des geschätzten Besitzes einer Fahrerlaubnis kann nun der Besitz bzw. die Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen modelliert werden. Als Mobilitätswerkzeuge gelten hier das Auto und eine Zeitkarte für den ÖV. Wiederum wurde ein schon bestehendes Logit-Modell simuliert [15]. Im Falle der ÖV-Zeitkarten kommen nur Besitz und Nichtbesitz als Alternativen in Frage, auch verschiedene Typen von Zeitkarten werden nicht unterschieden. Für das Auto gibt es in den zugrundeliegenden Daten des Schweizer Mikrozensus 2005 drei Kategorien für dessen Verfügbarkeit: Immer, manchmal oder nicht verfügbar. Es wird deshalb nicht wie bei den ÖV-Zeitkarten der Besitz, sondern die Verfügbarkeit eines Autos geschätzt. Agenten ohne Besitz einer Fahrerlaubnis werden nie ein Auto verfügbar haben. Die Kategorie *manchmal* deckt beispielsweise den Fall eines Familienautos ab, wobei nur Familienmitgliedern mit Fahrerlaubnis das Auto verfügbar wäre. Wesentliche Resultate des Modells sind:

- Die Verfügbarkeit eines Autos ist um so höher, je ländlicher die Wohngemeinde liegt.
- 59,0% der Agenten haben ein Auto immer oder manchmal verfügbar. Das sind ca. 90% der Agenten die eine Fahrerlaubnis besitzen.

Verkehrsmittelwahl Es wird ein Logit-Modell für die Wahl des Verkehrsmittels aufgrund des Schweizer Mikrozensus 2005 geschätzt. Das Modell wählt ein Verkehrsmittel für den ganzen Aktivitätenplan, d.h. es ist ein tourenbasierter Ansatz für die komplette *home based* Tagestour. Die Alternativen sind *Zu Fuss gehen*, *Fahrrad*, *MIV* und *ÖV*. Eine fünfte Alternative fasst alle übrigen im Mikrozensus beobachteten Verkehrsmittel zusammen. Um Unterschiede im Verkehrsverhalten abzubilden, wurden drei separate Entscheidungsmodelle geschätzt, je nach Hauptaktivität der Tour. Berücksichtigt wurden, in absteigender Folge: Arbeit, Bildung, Einkauf/Freizeit. Der Hauptzweck einer Tour, die sowohl eine Arbeits- als auch eine Einkaufsaktivität beinhaltet, wird somit als Tour mit der Hauptaktivität Arbeit klassifiziert. Eine Tour wird nur dann Einkauf/Freizeit zugeordnet falls sie weder den Aktivitätentyp Arbeit noch den Typ Bildung enthält. Die Nutzenfunktionen ha-

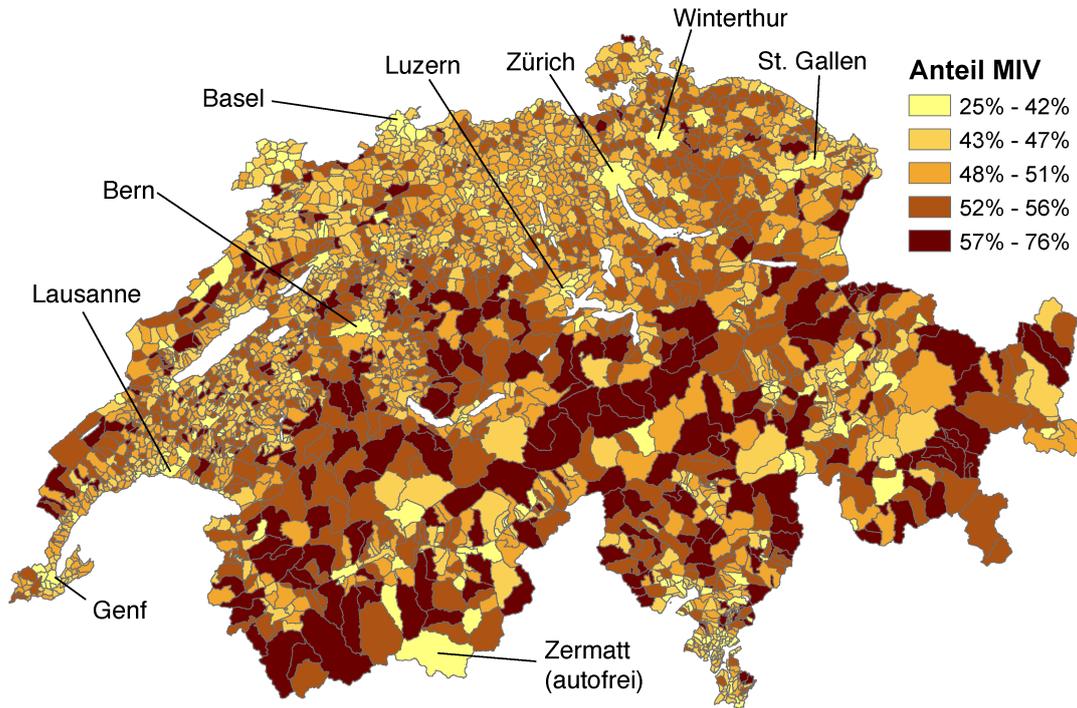
ben eine etwas unübliche Form: Abgesehen von der Reisedistanz und dem Gemeindetyp der Wohngemeinde werden nur soziodemographische Variablen verwendet. Die üblichen alternativenspezifischen Attribute wie Reisezeit und -kosten werden aufgrund fehlender Daten nicht verwendet.

In dieser ersten Version geht es jedoch nur um die Produktion eines plausiblen, regional differenzierten Modal Split im Gegensatz zu einer rein zufälligen Auswahl der Agenten, wie sie in früheren MATSim-T-Szenarien benutzt wurde. Der für die spätere Simulation interessante Anteil der Touren die mit dem Auto zurückgelegt werden ist in Abbildung 2(a) dargestellt. In Grossstädten und Agglomerationen werden in der Regel weniger als die Hälfte, in den entlegeneren Gebieten mehr als die Hälfte der Touren mit dem Auto zurückgelegt. Abbildung 2(b) zeigt die kumulative Verkehrsmittelwahl abhängig von der Länge der Tour. Zu Beginn (<2 km) überwiegen die zu Fuss absolvierten Touren, werden aber danach klar vom MIV abgelöst. Während die unmotorisierten Modi nach spätestens 10 km Tourlänge ihr Maximum erreicht haben, steigen die Anteile von MIV und ÖV langsamer und erreichen es nach ca. 100 km.

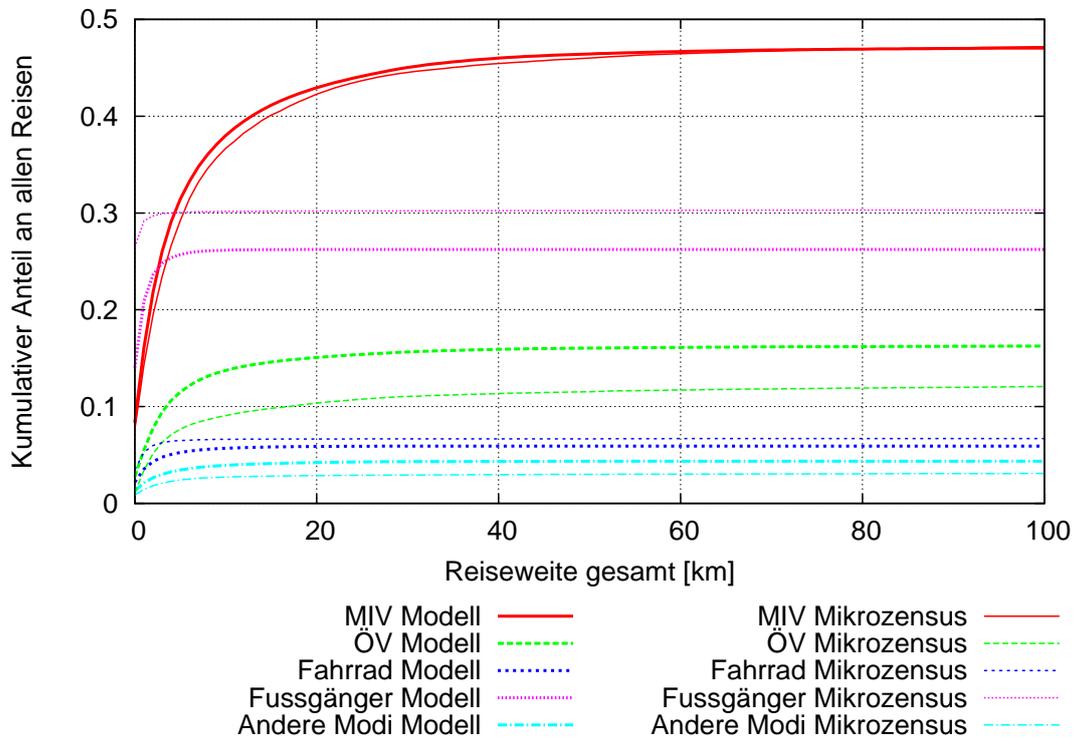
Ab diesem Schritt werden nur noch die Agenten mit Verkehrsmittelwahl MIV berücksichtigt, da nur dieser Modus simuliert wird. Für die anderen Verkehrsmittel werden konstante Reisezeiten/generalisierte Reiskosten angenommen. Da alle folgenden Modellschritte von diesen Kosten abhängen, muss nur noch der MIV betrachtet werden. Ein Agent legt im Schnitt 3,3 Wege an seinem simulierten Werktag zurück, was grob dem beobachteten Wert entspricht (3,6).

Routenwahl Für alle geplanten Wege der 2 285 374 Auto fahrenden Agenten wird schlussendlich eine Anfangslösung für die gewählte Route auf dem Modell des Strassennetzes gesucht. Wir benutzen ein offizielles Planungsnetzwerk mit 24 180 Knoten und 60 528 Kanten. Dies entspricht dem übergeordneten Strassennetz, bzw. der Zusammenfassung mehrerer Strassen. Ein Vergleich mit einem Netzmodell basierend auf Navigationsdaten und einer Karte zeigt die Detailunterschiede auf (Abbildung 3). Während kürzeste Routen auf einem solchen Netz in nützlicher Frist gefunden werden können, wäre die Verwendung des Navigationsnetzes geographisch realistischer. Mit dem Detailgrad des Netzes steigt aber nicht nur der Rechenaufwand, sondern auch der Speicherbedarf für die Aktivitätenpläne: Während mit dem Planungsnetz eine Route durchschnittlich aus 5 Knoten (6 Strassenabschnitten) besteht, ist dieser Wert beim Navigationsnetz ca. zehnmal höher.

Die Routen werden mit einem belastungsfreien Netz, d.h. mit maximal erlaubter Geschwindigkeit berechnet. Details zum Routing-Algorithmus folgen im nächsten Unterabschnitt. Die ermittelten Reisezeiten ergeben in Verbindung mit den erzeugten Aktivitätenketten und ihren variierenden Dauern eine erste zeitliche Verteilung der geplanten Wege (Abbildung 4).



(a) MIV-Anteil Modell pro Gemeinde



(b) Verkehrsmittelwahl nach Distanz

Abbildung 2: Ausgewählte Resultate der Modellierung der Verkehrsmittelwahl - Quelle: Ciari et al. [12]

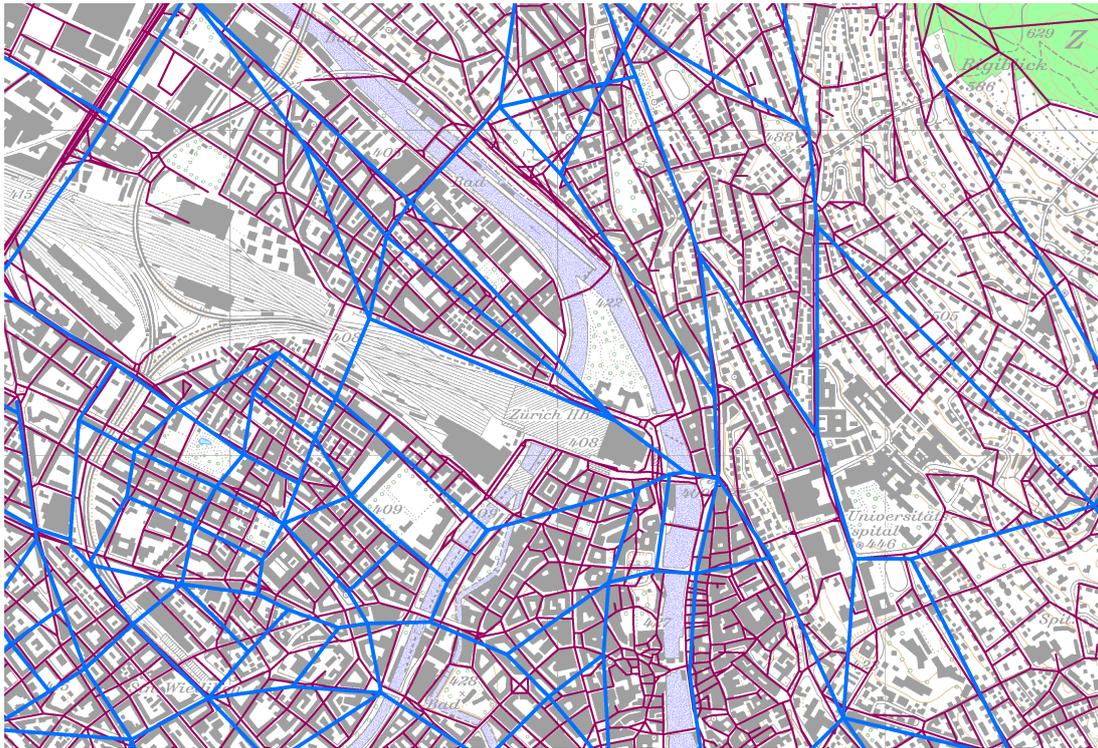


Abbildung 3: Modelle des Strassennetzes am Beispiel Stadtzentrum Zürich

Damit ist die Erzeugung der Anfangslösung der agentenbasierten Nachfrage abgeschlossen. Für ca. $2,3 \cdot 10^6$ autofahrende Agenten sind vollständige Aktivitätenpläne mit folgenden Informationen generiert worden:

- Wohnort
- Alter, Geschlecht, Arbeitsverhältnis ja/nein
- Besitz Fahrerlaubnis ja/nein
- Aktivitätenkette, z.B. Zuhause - Arbeit - Einkaufen - Zuhause
- typische Dauern der einzelnen Aktivitäten
- Standorte der primären und sekundären Aktivitäten
- Besitz eines ÖV-Zeitabonnements, Autoverfügbarkeit
- kürzeste Route im belastungsfreien Modell des Strassennetzes

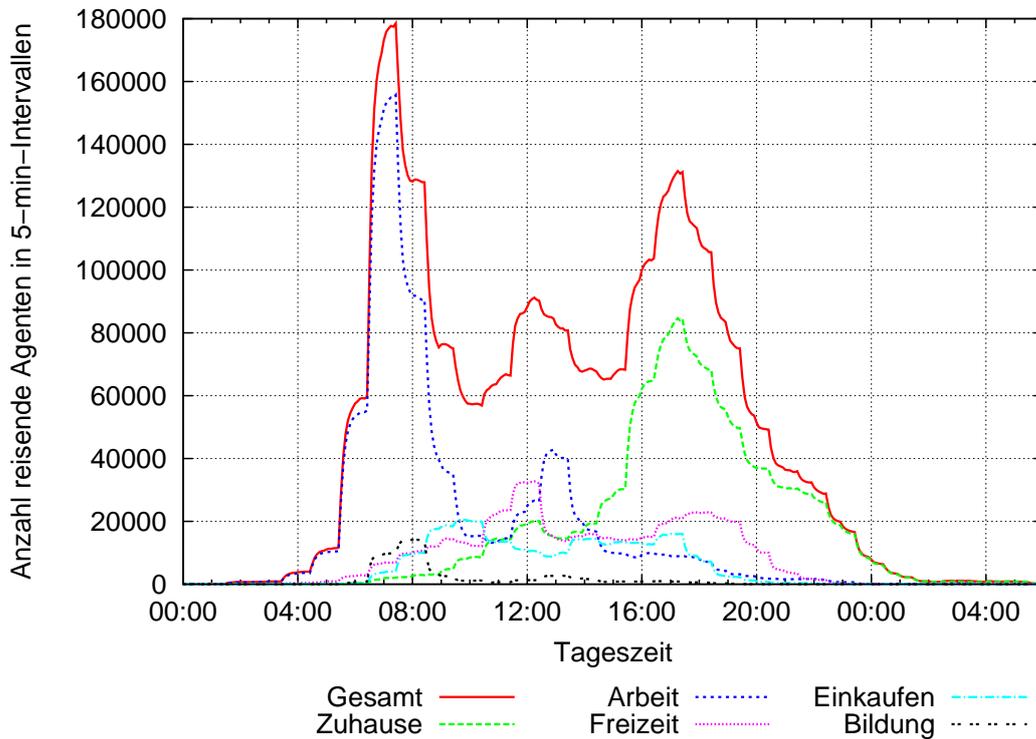


Abbildung 4: Anfangslösung der tageszeitlichen Verteilung der simulierten Wege, unterschieden nach Wegezweck

3.2 Konfiguration der Module

Für ein Szenario wird immer eine bestimmte Auswahl der verfügbaren Module getroffen. Im hier präsentierten Szenario sind Routen- und Zeitwahl die einzigen Freiheitsgrade der Agenten. Verkehrsmittel, Aktivitätenreihenfolge und -orte sowie andere Merkmale des Verkehrsverhaltens können sich nicht ändern.

Zeitwahlmodul Dieses Modul variiert die Aktivitätendauern und Abfahrtszeiten. Momentan wird eine einfache Implementation verwendet die diese Zeitpunkte zufällig verschiebt. Jede Aktivitätendauer und jede Abfahrtszeit um $[-30\text{min}, +30\text{min}]$ verschoben. Dabei wird sichergestellt, dass keine negativen Aktivitätendauern entstehen, oder der Plan nun vor 0:00 beginnt.

Obwohl das ein naiver Ansatz ist produziert er nützliche Resultate, solange die Anfangslösung der Zeitinformationen nicht allzu unrealistisch ist. Das Modul hat einen relativ kleinen Suchradius und wird auch in 1000 Iterationen nicht den ganzen Lösungsraum abgesucht haben. Da die initialen Aktivitätendauern und somit auch die Abfahrtszeiten realistische Werte haben (s. Abschnitt 3.1) ist es akzeptabel dieses einfache Modul hier zu benutzen.

Routenwahlmodul Beim Routing-Modul handelt es sich um einen Dijkstra-Algorithmus der

mit tageszeitabhängigen Kantengewichten operieren kann. Er berechnet zunächst Reisezeiten auf den Streckenabschnitten aus den Ereignissen des vorherigen Laufs der Simulation des Verkehrsflusses. Diese Zeiten liegen viertelstundenfein vor und werden als Gewichte der Kanten im Modell des Strassennetzes verwendet. Abgesehen von kleinen, aber wichtigen technischen Details ist eine Implementation relativ einfach [19]. Der schnellste Weg von einer Aktivität zur anderen wird auf Basis gegebener Abfahrtszeiten berechnet. Man beachte dass die Abfahrtszeiten selbst nicht variiert werden. Dies würde im Modul für die Zeitwahl geschehen (s. oben).

Simulation des Verkehrsflusses Dieses Modul simuliert die Aktivitätenpläne im Modell der physikalischen Wirklichkeit, hier des Strassennetzes. Es ist als Warteschlangensimulation implementiert, d.h. jeder Strassenabschnitt ist als FIFO-Schlange modelliert. Die Grösse der Warteschlange entspricht der maximal möglichen Verkehrsdichte des entsprechenden Strassenabschnitts. Weiterhin ist eine minimale Verweildauer des Agenten in einer Schlange durch die erlaubte Höchstgeschwindigkeit definiert. Die Simulation eines Weges entspricht also der sequentiellen Simulation aller Strassenabschnitte auf der Wegroute. Die in diesem Szenario verwendete Implementation ist ereignisbasiert und durch Unterteilung des Netzmodells in mehrere Regionen parallelisierbar [20].

Agentendatenbank, Feedback Wie schon oben erwähnt, wird ein iteratives Feedback benutzt um das koevolutionäre Anpassungsproblem zu lösen. Zu diesem Zweck kann jeder Agent mehrere Pläne vorhalten, sie ausprobieren und aufgrund des Nutzenwertes miteinander vergleichen. In diesem Szenario kann ein Agent höchstens 4 Pläne halten. Dies ist ein Kompromiss zwischen Stabilität (je mehr Pläne desto besser) und Speicherbedarf (je weniger Pläne desto besser).

Der Lernmechanismus ist detailliert erklärt in [21], und wird zum Verständnis hier kurz zusammengefasst.

Die Agentendatenbank beginnt mit dem vollständigen initialen Plan jedes Agenten. Er wird als *gewählt* markiert. Die Simulation des Verkehrsflusses führt die markierten Pläne aus und gibt Ereignisse aus. Jeder Agent berechnet den Nutzenwert des ausgeführten Plans auf Grundlage dieser Ereignisse und entscheidet, welcher der verfügbaren Pläne für die nächste Iteration markiert wird. Dabei hat der Agent drei Alternativen, die mit je einer vorher festgelegten Wahrscheinlichkeit (in Klammern) gewählt werden:

- Erzeuge einen neuen Plan durch erneute Routenwahl für einen bestehenden Plan (10%).
- Erzeuge einen neuen Plan durch erneute Zeitwahl für einen bestehenden Plan (10%).

- Wähle einen bestehenden Plan aus der Datenbank aus (80%).
Die Auswahlwahrscheinlichkeit richtet sich nach der letzten Bewertung dieses Plans: Sie hat die Form $p \sim e^{\beta \cdot S_i}$, wobei S_i der Nutzenwert von Plan i ist und β eine empirische Konstante. Es wird also die in der Verkehrsplanung weit verbreitete Logit-Methode angewandt, mit welcher traditionell rationale Entscheidungen unter Unsicherheit modelliert werden [22].

Nach diesem Schritt werden die neu als gewählt markierten Pläne ausgeführt. Anschließend wird er bewertet. Hält der Agent schon die maximal mögliche Anzahl Pläne, wird der schlechteste von ihnen gelöscht; dabei kann es sich auch um den gerade simulierten und evaluierten Plan handeln. Auf diese Weise ist der Selektionsaspekt der koevolutionären Anpassung implementiert. Dieser Prozess wird wiederholt bis das System einen stationären Zustand gefunden hat. Wir beurteilen das System als gelöst sobald die Reihe der durchschnittlichen Nutzenwerte aller vorhandenen Pläne ein stationärer Prozess über die Iterationen ist. Andere Abbruchkriterien sind möglich, z.B. sobald die Abweichung des erwarteten Nutzens vom erzielten minimal ist [11]. Dies ist jedoch Gegenstand zukünftiger Arbeit.

3.3 Werte der zeitbezogenen Parameter

Folgende Werte für die Parameter der Nutzenfunktion wurden gewählt:

$$\beta_{perf} = +6 \text{ Euro/h}, \beta_{travel} = -6 \text{ Euro/h}, \beta_{late} = -18 \text{ Euro/h}$$

Obwohl nicht auf den ersten Blick ersichtlich, entsprechen diese Werte den Standardwerten des Vickrey-Modells. Ein Agent der auf den Beginn seiner Aktivität warten muss, weil er beispielsweise vor der Ladenöffnungszeit oder dem Schichtbeginn ankommt, hat ca. 6 Euro/h Opportunitätskosten aufgrund verlorener Zeit für andere Aktivitäten³. Beim Reisen geht der gleiche Betrag verloren, und zusätzlich 6 Euro/h als direkte Reisekosten. Die Bestrafung für Verspätungen beträgt schliesslich 18 Euro/h. Es ergeben sich folgende effektive Kosten der verschiedenen Zeitnutzungen:

$$\beta_{wait,eff} \approx -6 \text{ Euro/h}, \beta_{travel,eff} \approx -12 \text{ Euro/h}, \beta_{late,eff} = -18 \text{ Euro/h}$$

Obwohl die Wahl des Timings des Aktivitätenplans durch die Vorgaben der Befragungen schon grob definiert ist, wird es Anpassungen aufgrund der auszurechnenden Reisezeiten geben. Dies ist der Grund für die Verwendung des oben beschriebenen Moduls für die Zeitwahl. Um sie nicht völlig freizugeben, werden tageszeitliche Begrenzungen pro Aktivitätentyp festgelegt. Sie spiegeln Öffnungszeiten von Läden oder Arbeitsplätzen wider. Ausserhalb dieser Zeitfenster in Aktivitäten verbrachte Zeit bringt dem Agenten keinen Nutzen. Für die Typen Arbeit und Bildung gilt der Zeitraum 6:00 bis 20:00, für Einkauf 8:00 bis 20:00. Freizeitaktivitäten und natürlich auch der Aufenthalt zuhause haben keine zeitliche Begrenzung.

³Der genaue Betrag hängt aufgrund der logarithmischen Form des Aktivitätennutzens von der Wartedauer ab und ist nicht genau bekannt.

4 Resultate

In diesem Abschnitt werden die Resultate des iterierten Systems präsentiert. Simulation des Verkehrsflusses und Anpassung der Aktivitätenpläne bezüglich Zeit- und Routenwahl wurden 100 Mal in der beschriebenen Weise abwechselnd ausgeführt. Das System zeigte ab ca. 70 Iterationen ein stabiles Verhalten; der durchschnittliche Nutzenwert der Pläne war in einem Optimum angelangt. Die Resultate der 100. Iteration werden als Lösung herangezogen.

4.1 Analyse der Simulationsresultate

Um einen groben Überblick zu bekommen, ist die Betrachtung einzelner Werte möglich auf die, die gesamte agentenbasierte Nachfrage reduziert wird (Tabelle 1). In diesem Fall liegt beispielsweise die durchschnittliche Wegreisezeit im iterierten Fall 16,3% über der Wegreisezeit bei Höchstgeschwindigkeit. Dieser Wert scheint niedrig ist aber plausibel da er sich auf den gesamten Tag, und nicht nur auf Stauperioden bezieht [vgl. 11, S. 364].

Die iterierte Reisezeit von 7 min, 40 sec ist gut mit dem Wert aus dem Mikrozensus vergleichbar. Teilt man die beobachtete Unterwegszeit mit dem Auto an Werktagen (27,3 min) durch die beobachtete Anzahl Wege pro Werktag (3,6) ergeben sich ebenso exakt 7 min, 40 sec. Diese exakte Übereinstimmung ist sicherlich zufällig und die Berechnungsweise naiv: In der Realität werden nur ca. 1,2 Wege pro Person und Tag mit dem Auto zurückgelegt. Dieser Wert bezieht sich jedoch auf die gesamte Schweizer Bevölkerung von ca. $7,3 \cdot 10^6$ Personen, während wir nur $2,3 \cdot 10^6$ Agenten simulieren. Der Vergleich zeigt aber, dass das System Resultate in der richtigen Grössenordnung erzeugt. Wird das Modell der Verkehrsmittelwahl wie geplant auf die Ebene von Subtouren verfeinert,

- wird sich die simulierte durchschnittliche Unterwegszeit mit dem Auto erhöhen,
- wird sich die Anzahl Wege/Tag die mit dem Auto zurückgelegt werden verringern,

da Touren mit kurzer Distanz eher unmotorisiert als mit dem Auto zurückgelegt werden (Abbildung 2(b)). Tendenziell wird sich also die simulierte Wegreisezeit der im Mikrozensus tatsächlich beobachteten (27,3 Minuten) annähern.

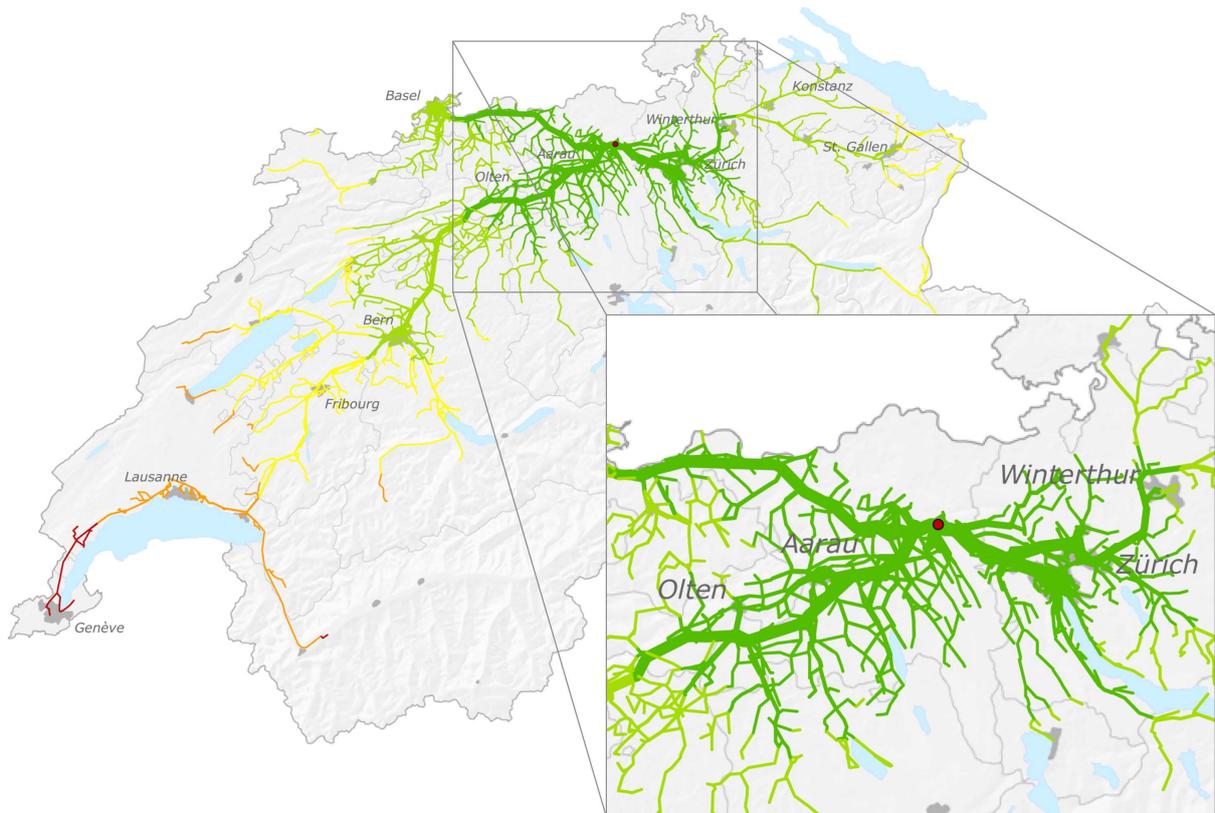
Durch diese erfreuliche Übereinstimmung scheint auch die freie Reisezeit von 6 min 25 sec ein plausibler Wert zu sein.

Der aufgeführte durchschnittliche Nutzenwert ergibt sich direkt aus der beschriebenen Nutzenfunktion für den kompletten Aktivitätenplan. Er kann z.B. zum ökonomischen Vergleich mit Szenarien herangezogen werden, die die Wirkung von Strassenbenutzungsgebühren analysieren [23].

Aufgrund des zeitkontinuierlichen Nachfragekonzepts sind detaillierte zeitlich-räumliche Analysen des modellierten Verkehrsgeschehens möglich. Abbildung 5 zeigt die Spinnenanalyse des

Mass	Wert
freie Reisezeit / Weg	6 min 25 sec
iterierte Reisezeit / Weg	7 min 40 sec
mittlerer Reisezeitverlust	16,3%
durchschnittlicher Nutzen	191,6 Euro

Tabelle 1: Grundlegende aggregierte Messgrößen



**Abbildung 5: Spinnenanalyse der Nachfrage: Barenegg Tunnel, Fahrtrichtung Zürich, 7-8 Uhr.
Durch Reisezeit ist in 30min-Schritten (von grün nach rot aufsteigend) kodiert. Je
mehr Agenten einen Strassenabschnitt benutzen, desto dicker ist er dargestellt.**

Barenegg Tunnel, eines hochbelasteten Autobahnabschnitts zwischen drei der grössten Schweizer Agglomerationen (Bern, Basel und Zürich). Dargestellt sind alle Wege, die zwischen 7:00 und 8:00 morgens den Barenegg Tunnel in Fahrtrichtung Zürich beinhalten. Spinnenanalysen werden zur Plausibilitätsprüfung von Nachfragemengen herangezogen, vergleiche mit der Spinnenanalyse des Barenegg für die Quelle-Ziel-Matrix des Schweizer Personenverkehrsmodells [24, S. 90].

4.2 Validierung mit Zähldaten

Die Qualität der Nachfragemodellierung in Verbindung mit der Routenwahl kann durch den Vergleich realer Zähldaten mit künstlichen Verkehrszählungen der Simulation beurteilt werden. Von den zuständigen Bundes- und Kantonsbehörden stehen uns stundenfeine Zähldaten eines ganzen Jahres zur Verfügung. Da das Ziel ist das Verkehrsverhalten eines durchschnittlichen Werktages zu modellieren, wurden die Zählungen von Dienstag, Mittwoch und Donnerstag zu einem repräsentativen Tag zusammengefasst. Ferien und Feiertage wurden von der Aggregation ausgeschlossen.

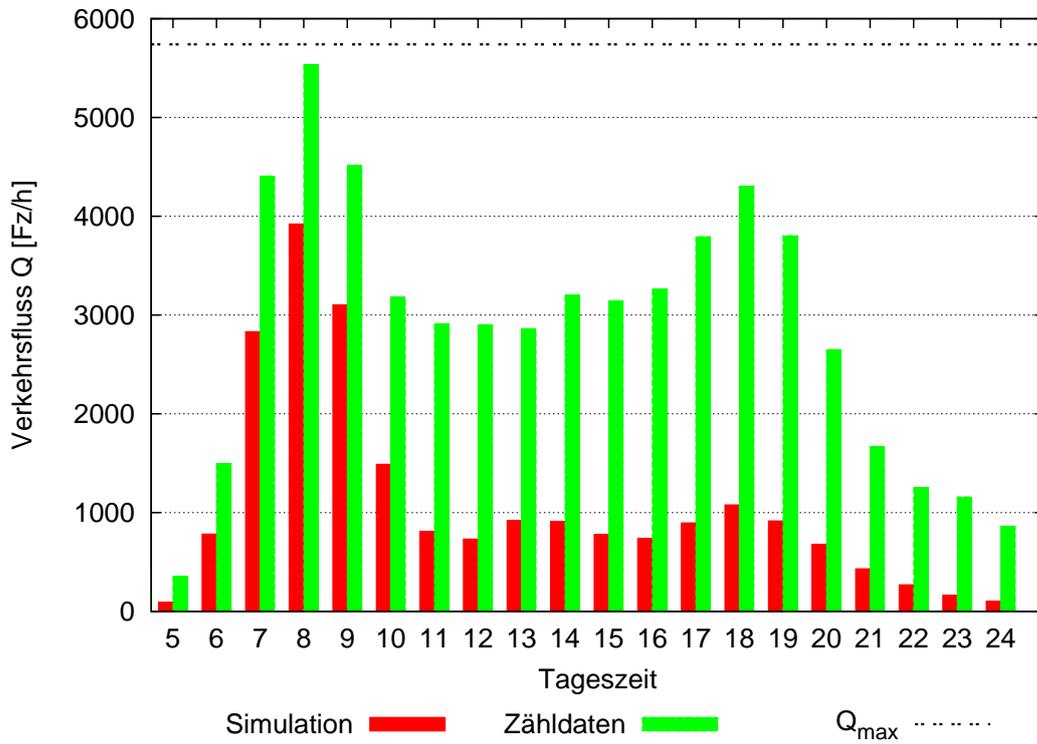
Die Vergleiche der Tagesganglinien am schon erwähnten Baregg Tunnel, sowie einem weiteren Autobahnquerschnitt nahe Adliswil bei Zürich zeigen deutlich die Stärken und die Schwächen des Szenarios (Abbildungen 6 und 7). Die qualitative Struktur der jeweiligen Pendlerspitzen kann gut nachgebildet werden, was für die Repräsentativität der Zeitangaben im Mikrozensus, deren Verteilung auf die Agenten in der initialen Nachfragemodellierung und die Routenwahl während der Iterationen spricht. Während jedoch im Falle Adliswil auch die Volumina gut getroffen werden, gibt es am Baregg in der Simulation nur halb so viel Verkehr wie in der Realität. Wir vermuten, dass der in der agentenbasierten Nachfrage fehlende Transit- und Werksverkehr für diese Lücken verantwortlich ist. Generell zeigt sich der fehlende Transitverkehr am stärksten bei Zählstellen am Rand der Schweiz und auf klassischen Transitstrecken wie dem Gotthardtunnel (nicht dargestellt).

In den Verteilungen der Aktivitätszeiten des Mikrozensus, und deshalb auch in den Zähldaten der Simulation zeigt sich jeweils eine kleine Mittagsspitze, welche durch den Weg zur und von der Mittagspause erzeugt werden. Diese Spitze ist in den erhobenen Zähldaten nicht erkennbar (vergleiche Abbildung 4 mit Abbildungen 6/7). Der Grund ist, dass der komplette Aktivitätenplan eines simulierten Agenten mit dem Auto absolviert wird, demzufolge auch diese mittäglichen Wege. In der Realität handelt es sich jedoch in der Regel um Fusswege. Deshalb wird auch dieser qualitative Fehler höchstwahrscheinlich durch das geplante tourenbasierte Modell der Verkehrsmittelwahl korrigiert werden.

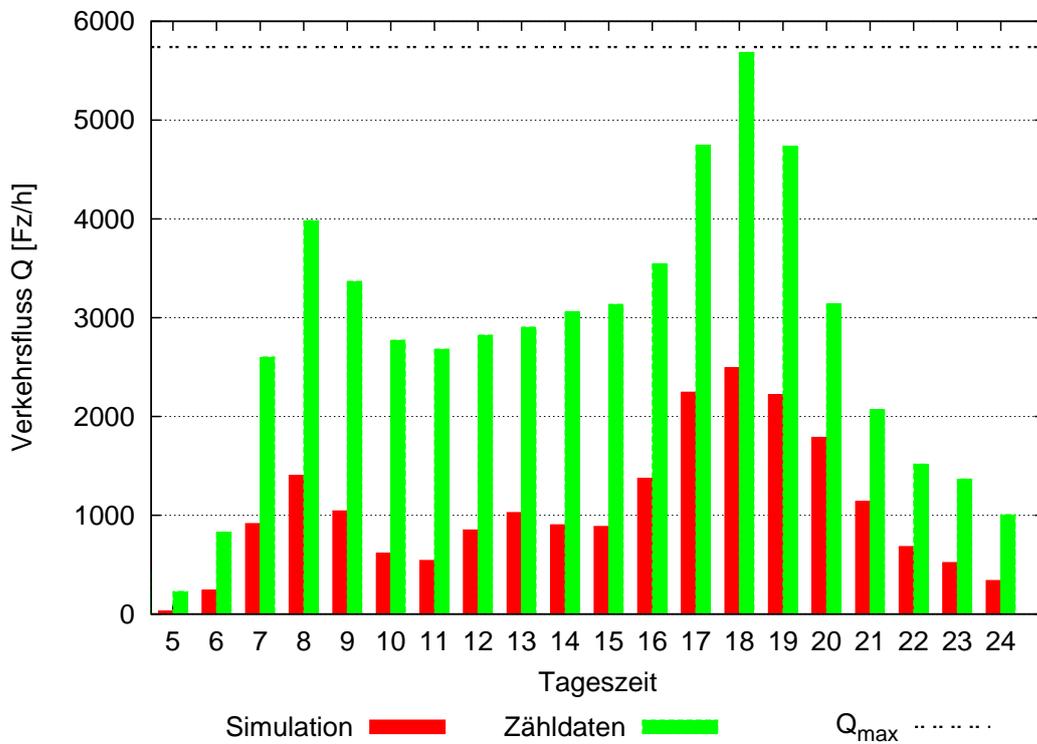
Eine Zusammenfassung der Zähldatenvergleiche zeigt eine durchschnittliche Unterschätzung der Verkehrsnachfrage um 50% (Abbildung 8). Die wenigen Fahrten in den Nachtstunden (1:00-4:00) sind in unserer Simulation vorhanden jedoch in den Abbildungen nicht dargestellt.

5 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass agentenbasierte Simulation des Verkehrsverhaltens in der Lage ist, in grossem Massstab den dynamischen Zustand des Strassenverkehrs der Schweiz abzubilden. Die Verkehrsnachfrage kann in ihrer tageszeitlichen Dynamik gut abgebildet werden, was ein Vergleich der echten und simulierten Verkehrszählungen zeigt. Die Nachfrageerzeugung beschränkt sich auf den inländischen Personenverkehr, und lässt Transit- sowie Werksverkehr

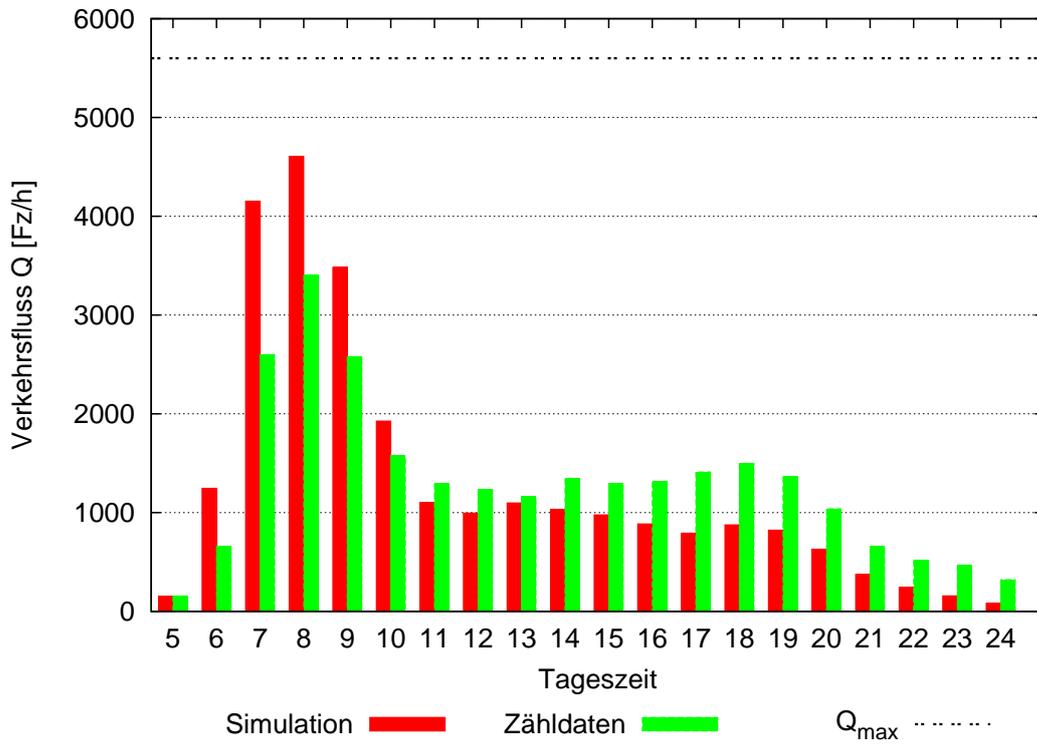


(a) Fahrtrichtung Zürich

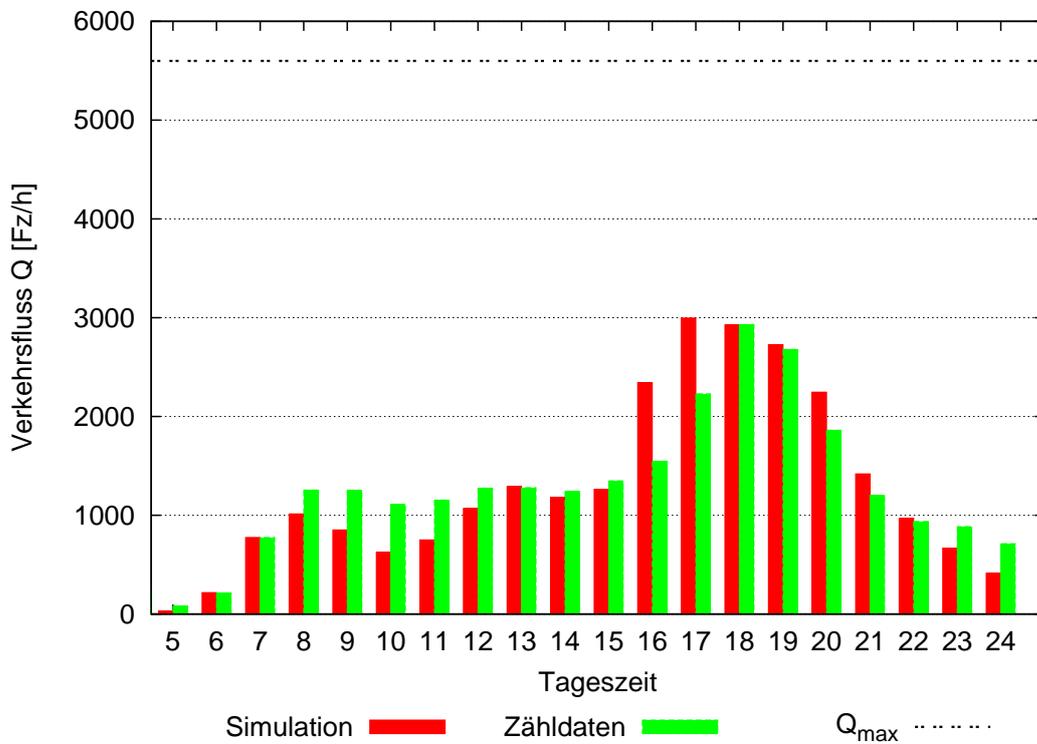


(b) Fahrtrichtung Bern/Basel

Abbildung 6: Vergleich Simulation - Zählstelle: Autobahn A1, Baregg tunnel



(a) Fahrtrichtung Zürich



(b) Fahrtrichtung Chur

Abbildung 7: Vergleich Simulation - Zählstelle: Autobahn A3, Höhe Adliswil

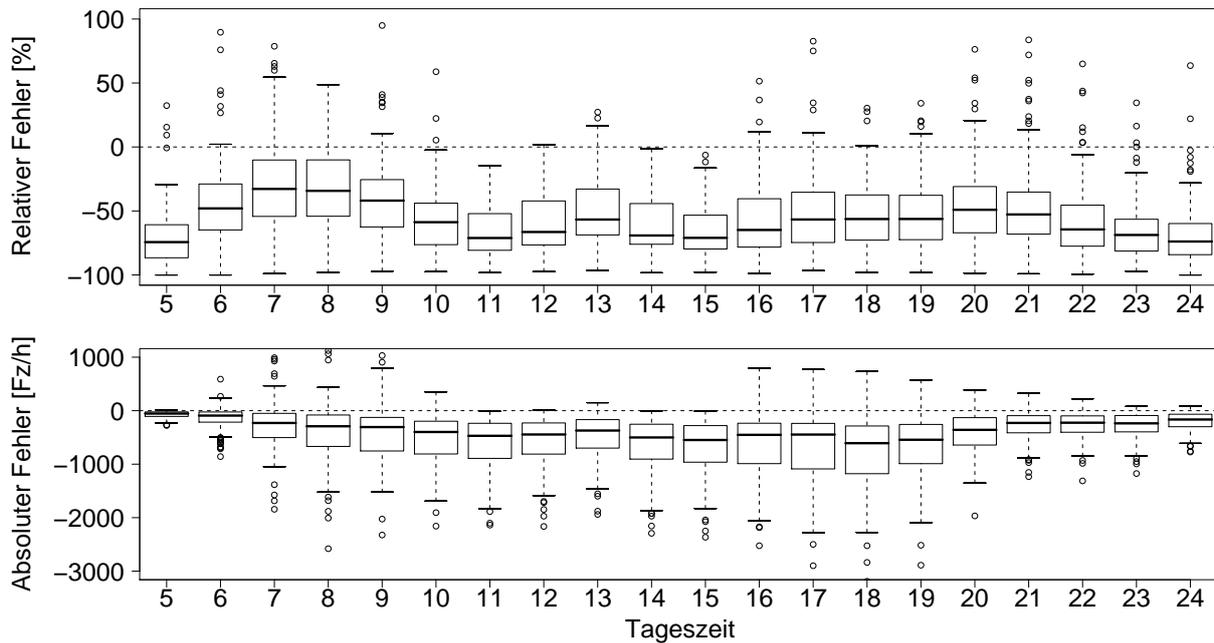


Abbildung 8: Stundenweiser Vergleich aller Zählstellen mit Simulationsresultaten
Der Boxplot wurde mit der freien Statistik-Software R hergestellt [25].

aussen vor. Deshalb sind die Verkehrsmengen am Rand des modellierten Gebietes bzw. auf den Haupttransitachsen zu niedrig, abgesehen davon werden die Volumina in der richtigen Grössenordnung reproduziert. Die simulierten Wegreisezeiten stimmen mit entsprechenden Beobachtungen überein.

Die Berechnung der 100 Iterationen von Simulation des Verkehrsflusses und der modularen Anpassung der Aktivitätenpläne wurde auf einem Hochleistungsrechner mit 8 CPUs und 22 GB RAM durchgeführt. Pro Iteration werden ca. 40 Minuten benötigt, die gesamte Rechendauer beträgt ca. 3 Tage. Die initiale Nachfrageerzeugung kann innerhalb von 6 Stunden berechnet werden.

Die Autoren danken der Eidgenössischen Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie der Datapuls AG für die finanzielle Förderung im Rahmen des Forschungsprojekts *Agentenbasierte Simulation für location based services*. Claudia Dolci, ETH Zürich erstellte die Spinnenanalysen der iterierten Nachfrage.

Literatur

- [1] BECKER, G. S., R. GERIKE und A. VÖLLINGS (1999) Gesellschaftliche Ziele von und für Verkehr, Schriftenreihe, 1, Dresdner Instituts für Verkehr und Umwelt e.V (DIVU), Dresden.

- [2] BALMER, M. (2007) Travel demand modeling for multi-agent traffic simulations: Algorithms and systems, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Mai 2007.
- [3] AVINERI, E. und J. N. PRASHKER (2003) Sensitivity to uncertainty: Need for a paradigm shift, *Transportation Research Record*, 1854, 90–98.
- [4] VICKREY, W. S. (1969) Congestion Theory and Transport Investment, *The American Economic Review*, 59 (2) 251–260.
- [5] ARNOTT, R., A. DE PALMA und R. LINDSEY (1993) A structural model of peak-period congestion: A traffic bottleneck with elastic demand, *The American Economic Review*, 83 (1) 161–179.
- [6] CHARYPAR, D. und K. NAGEL (2005) Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms, *Transportation*, 32 (4) 369–397.
- [7] VARIAN, H. R. (2004) *Grundzüge der Mikroökonomik*, 6. Aufl., Oldenbourg, München.
- [8] Bundesamt für Raumentwicklung, Bundesamt für Strassen und Bundesamt für Verkehr (2007) Tageszeitliche Fahrtenmatrizen im Personenverkehr an Werktagen im Jahr 2000, Endbericht, Bundesamt für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation et al.
- [9] VRTIC, M., D. LOHSE, P. FRÖHLICH, C. SCHILLER, N. SCHÜSSLER, H. TEICHERT und K. W. AXHAUSEN (2007) Simultaneous two-dimensionally constrained disaggregate trip generation, distribution and mode choice model: Theory and application for a Swiss national model, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41 (9) 857–873.
- [10] VRTIC, M. und K. W. AXHAUSEN (2003) Experiment mit einem dynamischen Umlegungsverfahren, *Straßenverkehrstechnik*, 47 (3) 121–126.
- [11] DE PALMA, A. und F. MARCHAL (2002) Real cases applications of the fully dynamic METROPOLIS tool-box: An advocacy for large-scale mesoscopic transportation systems, *Networks and Spatial Economics*, 2 (4) 347–369.
- [12] CIARI, F., M. BALMER und K. W. AXHAUSEN (2007) Mobility tool ownership and mode choice decision processes in multi-agent transportation simulation, Paper Presentation the 6th Swiss Transport Research Conference, Ascona, September 2007, http://www.strc.ch/pdf_2007/ciari.pdf.
- [13] BALMER, M., K. NAGEL und B. RANEY (2006) Agent-based demand modeling framework for large scale micro-simulations, *Transportation Research Record*, 1985, 125–134.
- [14] Bundesamt für Statistik (2000) *Eidgenössische Volkszählung 2000*.

- [15] BEIGE, S. und K. W. AXHAUSEN (2004) Ownership of mobility tools in switzerland, Paper Presentation the 4th Swiss Transport Research Conference, Ascona, März 2004, http://www.strc.ch/pdf_2004/Beige_OwnershipMobilityTools_STRC_2004.pdf.
- [16] Bundesamt für Statistik (2006) Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- [17] Bundesamt für Statistik (2001) Eidgenössische Betriebszählung 2001 - Sektoren 2 und 3, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- [18] MEISTER, K. (2007) MATSim Facilities, Interner Vortrag, IVT, ETH Zürich, Zürich, Mai, <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/presentations/v195.pdf>.
- [19] LEFEBVRE, N. und M. BALMER (2007) Fast shortest path computation in time-dependent traffic networks, Paper Presentation the 6th Swiss Transport Research Conference, Ascona, September 2007, http://www.strc.ch/pdf_2007/lefebvre.pdf.
- [20] CHARYPAR, D., K. W. AXHAUSEN und K. NAGEL (2007) An event-driven parallel queue-based microsimulation for large scale traffic scenarios, Paper Presentation the 11th World Conference on Transportation Research, Berkeley, Juni 2007, <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab425.pdf>.
- [21] RANEY, B. und K. NAGEL (2006) An improved framework for large-scale multi-agent simulations of travel behavior, in P. Rietveld, B. Jourquin und K. Westin (Hg.) Towards better performing European Transportation Systems, 305–347, Routledge, London.
- [22] BEN-AKIVA, M. E. und S. R. LERMAN (1985) Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand, MIT Press, Cambridge.
- [23] RIESER, M., U. BEUCK, K. NAGEL und K. W. AXHAUSEN (2007) Multi-agent transport simulations and economic evaluation, Arbeitsbericht, 457, IVT, ETH Zürich, Zürich, <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab457.pdf>.
- [24] Bundesamt für Raumentwicklung (2006) Erstellung des nationalen Personenverkehrsmodells für den öffentlichen und privaten Verkehr, Modellbeschreibung, Bundesamt für Raumentwicklung and Bundesamt für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- [25] R Development Core Team (2007) R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Wien, <http://www.R-project.org>.