

Agenten-basierte Simulation für location based services

Schlussbericht KTI 8443.1 ESPP-ES

Report**Author(s):**

Balmer, Michael; Meister, Konrad; Waraich, Rashid A.; Horni, Andreas; Ciari, Francesco; Axhausen, Kay W. 

Publication date:

2010-02

Permanent link:

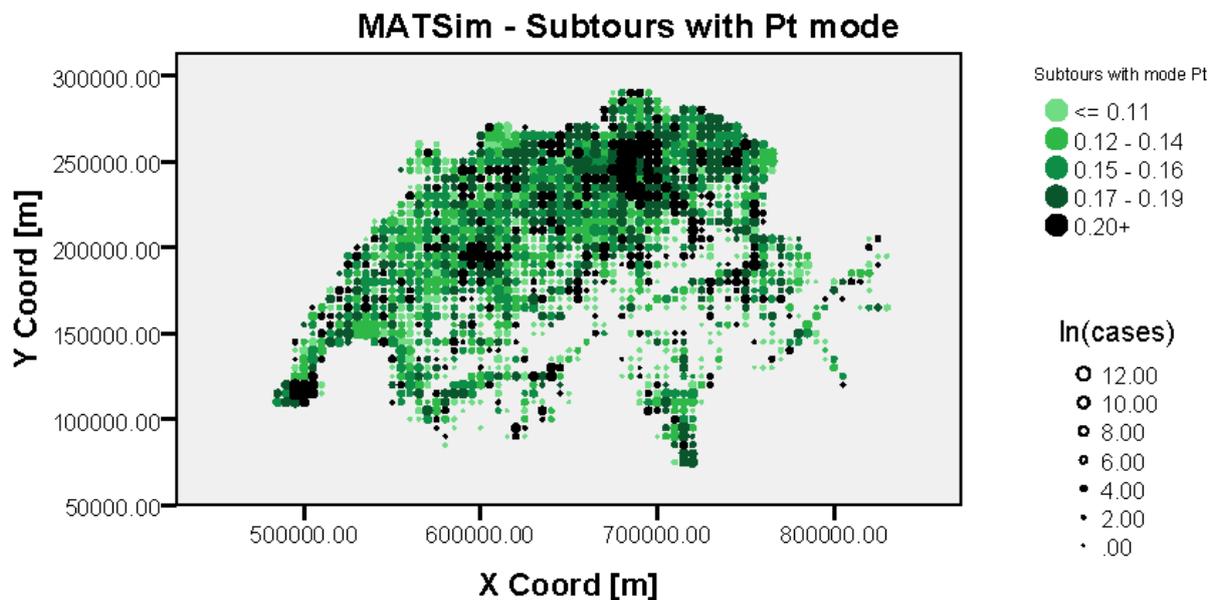
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005977010>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung 613



Schlussbericht KTI 8443.1 ESPP-ES: Agenten-basierte Simulation für location based services

Michael Balmer

Konrad Meister

Rashid A. Waraich

Andreas Horni

Francesco Ciari

Kay W. Axhausen

Datapuls AG

Februar 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Ausgangslage	2
2.1	Verhaltensmodell und Nutzenfunktion	3
2.2	Variation der Aktivitätenpläne	3
2.3	Mikrosimulation der Aktivitätenpläne	4
3	Eingangsdaten	5
3.1	Netzwerk	5
3.2	Zählstation	6
3.3	Gebäude	7
3.4	Haltestellen und OeV-Reisezeit Matrizen	7
3.5	Population und Nachfrage	8
4	Technische Weiterentwicklung	8
4.1	Verhaltensmodell und Nutzenfunktion	8
4.2	Variation der Aktivitätenpläne	9
4.3	Mikrosimulation der Aktivitätenpläne	10
5	Berechnung des relaxierten Zustands	11
5.1	Performanz	11
5.2	Relaxierung	11
6	Resultate	13
6.1	Verkehrsmittelwahl	15
6.2	Fahrtweitenverteilungen	15
6.3	Reisezeitenverteilungen	16
6.4	Strassen-Verkehrszählraten	17
6.5	Räumliche Verteilung der Verkehrsmittelwahl	21

7 Zusammenfassung	23
8 Danksagung	23
Literaturverzeichnis	26
A Weiterentwickelte Nutzenfunktion	27
A.1 Ausführen einer Aktivität	27
A.2 Reisen	28
A.3 Parameterwerte	30

Abbildungsverzeichnis

1	Systematischer Relaxierungsprozess von MATSim	3
2	Rechenzeiten der verschiedenen Simulationskomponenten	12
3	Relaxierung des Verkehrsmodells	12
4	Relaxierung des Verkehrsmodells (25% Sample Run)	14
5	Vergleich Mikrozensus 2005 - MATSim: Fahrtweitenverteilungen	16
6	Vergleich Mikrozensus 2005 - MATSim: Reisezeitenverteilungen	17
7	Übersicht verwendeter Zählstationen (Stunde 8–9)	18
8	Ganglinien ausgewählter Zählstationen	19
9	Beispiele der Fehlerquellen anhand ausgewählter Zählstationen	20
10	Räumliche Verteilung der Wahl der Verkehrsmittel auf Subtour Ebene: MIV . .	21
11	Räumliche Verteilung der Wahl der Verkehrsmittel auf Subtour Ebene: OeV . .	22

Tabellenverzeichnis

1	Modal-Split der Gesamt-Nachfrage (Weg-basiert)	14
2	Werte der Parameter der Nutzenfunktion	30

Datapuls AG

Schlussbericht KTI 8443.1 ESPP-ES: Agenten-basierte Simulation für location based services

Michael Balmer
IVT
ETH Zürich
CH-8093 Zürich
Tel: +41-44-633 27 80
Fax: +41-44-633 10 57
balmer@ivt.baug.ethz.ch

Konrad Meister
IVT
ETH Zürich
CH-8093 Zürich
Tel: +41-44-633 30 88
Fax: +41-44-633 10 57
meister@ivt.baug.ethz.ch

Rashid A. Waraich
IVT
ETH Zürich
CH-8093 Zürich
Tel: +41-44-633 32 79
Fax: +41-44-633 10 57
rashid.waraich@ivt.baug.ethz.ch

Andreas Horni
IVT
ETH Zürich
CH-8093 Zürich
Tel: +41-44-633 31 51
Fax: +41-44-633 10 57
horni@ivt.baug.ethz.ch

Francesco Ciari
IVT
ETH Zürich
CH-8093 Zürich
Tel: +41-44-633 71 65
Fax: +41-44-633 10 57
ciari@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
axhausen@ivt.baug.ethz.ch

Februar 2010

Zusammenfassung

Mobilität bildet den Grundpfeiler auf dem ortsbasierte Dienstleistungen (Location Based Services) ruhen. Darum ist ein präzises Abbild der Mobilität der zu erreichenden Zielgruppen für diese Art von Diensten unerlässlich. Mikrosimulationsmodelle zur Generierung von Mobilität liefern hierzu eine vollständige Mobilitätsanalyse, inklusive der Entscheidungsfindungsprozesse mobiler Individuen und somit die Verknüpfung statistisch relevanter Kenngrößen für unterschiedliche demographische und sozio-demographische Gruppierungen mit detaillierter, dynamischer Mobilität. Diese Eigenschaften bilden den Kernaspekt zur Dimensionierung von ortsbasierte Dienstleistungen. Basierend auf dem Open-Source Forschungsprojekt *MAT-Sim* ist das erste, vollständig integrierte Umlegungs- und Verhaltensmodell für Zeit-, Routen-, Verkehrsmittel- und Ortswahl für die gesamte Schweiz entstanden.

Schlüsselwörter

standortbezogene Dienste, Verkehrsplanung, Multi-Agenten Mikrosimulation, MATSim, Schweiz

1 Einleitung

Mobilität bildet den Grundpfeiler auf dem ortsbasierte Dienstleistungen (Location Based Services) ruhen. Darum ist ein präzises Abbild der Mobilität der zu erreichenden Zielgruppen für diese Art von Diensten unerlässlich. Dies stellt die Technologie, wie auch die Forschung vor neue Herausforderungen. Zum einen bietet die moderne Informationstechnik (vor allem die Mobiltelefonie im Zusammenhang mit GPS-Tracking) eine äusserst akkurate Methode, um einzelne Individuen geographisch zu orten. Auf der anderen Seite erlaubt dies keine 100% Abdeckung aller mobilen Individuen, ganz abgesehen davon, dass es (zumindest) schwierig ist, Informationen über die Gründe, resp. Zwecke der Mobilität zu erfahren. Mehr noch stehen diese Praktiken der Informationserfassung zunehmend im Visier des Datenschutzes.

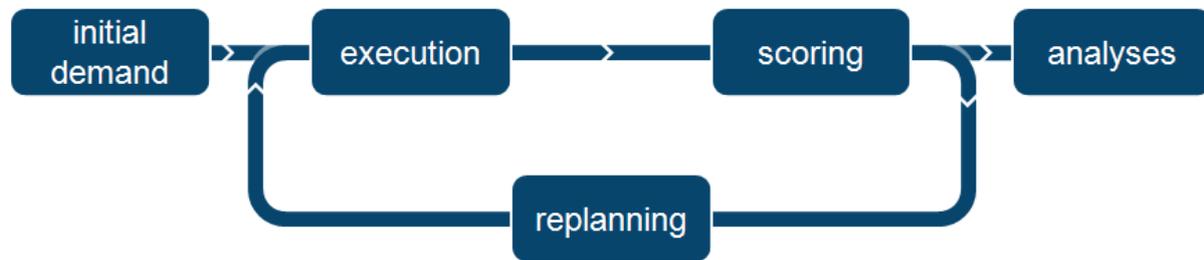
Im Gegensatz dazu stehen Mikrosimulationsmodelle zur Generierung von Mobilität. Diese liefern zum einen eine vollständige Mobilitätsanalyse, inklusive der Entscheidungsfindungsprozesse mobiler Individuen, gehören aber andererseits zu den statistischen Verfahren, die kein individuelles Geo-Tracking produzieren. Dennoch erlauben diese Modelle statistisch relevante Kenngrössen flexibel für unterschiedlichste, demographische und sozio-demographische Gruppierungen mit detaillierter dynamischer Mobilität zu verknüpfen. Diese Eigenschaften bilden einen enorm wichtigen Aspekt zur Dimensionierung von ortsbasierten Dienstleistungen.

Mit dem Open-Source Forschungsprojekt MATSim-T (2008), initiiert von Prof. Kai Nagel (Gruppe VSP, TU Berlin) in Kooperation mit Prof. Axhausen (Gruppe VPL, ETH Zürich) ist es Ziel dieser Arbeit, die oben genannte, 100% Abdeckung für die gesamte Schweiz auf dem Tele Atlas Navigationsnetz (Tele Atlas MultiNet, 2010) anzuwenden. Dies stellt ganz neue Ansprüche an die Software, namentlich an die Performanz und den Speicherverbrauch (die hier präsentierte Anwendung entspricht in etwa dem 600-fachen der üblichen Szenarien), wie auch an die Modellbildung selbst. Zum einen wird die Wahl-Möglichkeiten der synthetischen Personen (auch "Agenten" genannt) auf die Dimensionen, Zeit-, Routen-, Verkehrsmittel- und Ortswahl erweitert, andererseits wird das Verhaltensmodell um wesentliche Faktoren, wie zum Beispiel Distanzkostenanteile pro Verkehrsmittel erweitert und kalibriert.

2 Ausgangslage

Neben den verwendeten Daten ist ein MATSim-Szenario durch die verwendeten Implementierungen der drei Systembestandteile *Nutzenfunktion*, *Variation der Aktivitätenpläne (Replanning)* sowie deren *Simulation* gekennzeichnet (siehe Abbildung 1). Deren Standard Implementierungen zu Beginn des KTI-Projektes werden in diesem Abschnitt zusammengefasst. Sie wurden u.a. in einer Studie im Auftrag des Kantons Zürich zur Analyse der kurzfristigen Veränderung

Abbildung 1: Systematischer Relaxierungsprozess von MATSim



Quelle: Rieser (2008)

der Verkehrsströme nach der Eröffnung der Westumfahrung der Stadt Zürich verwendet (Balmer *et al.*, 2009).

2.1 Verhaltensmodell und Nutzenfunktion

Um Aktivitätenpläne vergleichen zu können, werden sie mit einem abstrakten Nutzenmass bewertet. Die dafür verwendete Nutzenfunktion bildet die Präferenzen des Agenten bezüglich des Aktivitätenplans ab. Es gilt die grundsätzliche Annahme, dass die Agenten ihren Nutzen maximieren wollen. Die Standard-Nutzenfunktion von MATSim stammt von Charypar und Nagel (2005). Sie orientiert sich an Vickrey's Modell der Abfahrtszeit (Vickrey, 1969; Arnott *et al.*, 1993), wird jedoch von einzelnen Wegen auf das Konzept der Verkehrsnachfrage mit kompletten Tagesplänen erweitert (Raney und Nagel, 2006).

2.2 Variation der Aktivitätenpläne

Die Variation (in MATSim-T genannt *Replanning*) sorgt dafür, dass jeder Agent seinen Lösungsraum der Tagesplanung "erforscht". Dabei wird ein bestehender Plan eines Agenten dupliziert und variiert (mutiert) und in der nächsten Iteration wiederum ausgeführt und bewertet. Jedes verwendete Modul des Optimierungsprozesses übernimmt spezielle Aufgaben. So zum Beispiel berechnet das *Router* Modul die einzelnen Wege eines Planes aufgrund des Verkehrsaufkommens der letzten Verkehrsfluss-Simulation. Abfahrtszeiten und Dauern von Aktivitäten eines Tagesplans werden durch das *Time Allocation Mutator* Modul verändert. Es mutiert entsprechende Zeiten nach einem Zufallsprinzip. Weitere Module können neue Orte bestimmen, wo Aktivitäten ausgeführt werden, oder auch die Reihenfolge von Aktivitäten verändern. Wichtig dabei ist, dass all diese Module *unabhängig* voneinander arbeiten. Aus diesem Grund ist es möglich, eine beliebige Anzahl von Replanning Modulen in die Optimierung einzufügen.

Ein äusserst wichtiger Aspekt dabei ist, ob ein Modul einen bestimmten Teil eines Planes rein

zufällig verändert (*Random Mutation*) oder ob es die bestmögliche Lösung aufgrund der Resultate der letzten Verkehrsfluss-Simulation ermittelt (*Best Response*). Ersteres hat den Vorteil, kaum Rechenzeit zu verbrauchen. Zudem sucht es — früher oder später — den ganzen ihm zugetragenen Suchraum ab. Der Nachteil dabei ist, dass es (zu) viele Iterationen braucht, bis das Optimierungssystem relaxiert. Im Gegensatz dazu liefert ein *Best Response* Modul eine optimale Lösung aufgrund des momentanen Wissens um das System. Diese Module können sehr rechenintensiv werden, relaxieren das System aber weit aus schneller.

Time Allocation Mutator Das Time Allocation Mutator Modul ist ein typisches Beispiel für ein *Random Mutation* Modul. Es variiert zufällig die Abfahrtszeiten und Dauern der Aktivitäten eines Tagesplans.

Router Module Router Module berechnen aufgrund gegebener Abfahrtszeit der Wege in einem Tagesplan und der dynamischen Reisezeit *aller* Strassen (erhalten von der letzten Ausführung der Verkehrsfluss-Simulation) die bestmögliche Route (Route mit geringst-möglichen negativen Nutzen). Dieses *Best Response* Module benutzt somit *globales Wissen* des Systems zur Ermittlung der Route. Die zur Verfügung stehende Implementation des Router Moduls zur Ausgangslage basiert auf dem zeit-dynamischen Dijkstra Algorithmus, dessen Laufzeit quadratisch mit der Anzahl Knoten im Netzwerk und linear mit der Anzahl von Wegen in einem Plan steigt.

2.3 Mikrosimulation der Aktivitätenpläne

Die Verkehrsfluss-Simulation hat die Aufgabe, die Tagespläne in einer physikalischen Umgebung umzusetzen. Grundsätzlich sind beliebig detaillierte Modelle anwendbar, wie zum Beispiel das Fahrzeugfolgemodell (Wiedemann, 1974) oder ein zellulärer Automat von Nagel und Schreckenberg (1992), die aber entsprechend grosse Rechenzeiten benötigen. Die Ansprüche der Verkehrsplanung sind jedoch nicht das detaillierte Fahrverhalten, sondern eine realitätsnahe Abbildung des dynamischen Verkehrsaufkommens, der Staubildung und des daraus entstehenden Rückstaus, der Stauauflösung, usw. Diese Anforderungen erfüllt das Warteschlangen-Modell (Simon *et al.*, 1999). Dabei wird jede Strasse durch eine Warteschlange modelliert, in der Fahrzeuge mindestens die benötigte Fahrzeit auf freier Strasse abwarten müssen. Implementationen des Modells müssen die Randbedingungen des Verkehrs (Kapazität einer Strasse, Höchstgeschwindigkeit etc.), die Randbedingungen der Infrastruktur für Aktivitäten (z.B. Öffnungszeiten von Aktivitätenebenen), sowie den physikalisch machbaren Rahmen beachten. Es ist einem Agenten zum Beispiel nicht gestattet, eine Aktivität zu verlassen, bevor er dort angekommen ist.

Als Resultat produziert die Simulation eine Liste von *events*, zeitlich und örtlich lokalisierten Ereignissen. Dadurch ist für jeden Zeitpunkt bekannt wo sich die Agenten aufgehalten haben: Ob in Aktivitäten oder auf einem Weg, in welcher Aktivität, auf welchem Strassenabschnitt, usw.

Die beste, zu Beginn des KTI-Projekts verfügbare Implementation ist eine parallelisierte, deterministische, event-basierte Warteschlangensimulation *DEQSim* (Charypar *et al.*, 2009). Zusätzlich zum FIFO-Verhalten (First-in, first-out) simuliert sie eine sich rückwärts bewegende Lücke, die das Rückstauverhalten noch realistischer abbildet. Event-basierte Simulation bedeutet im Falle der agentenbasierten Verkehrssimulation, dass nur Ein- und Austrittsereignisse an den Strassenabschnitten simuliert werden, und nicht die Bewegung der Agenten auf den Strassenabschnitten selbst. Dies ist der wesentliche Unterschied zu einer anderen, zeitschritt-basierten Verkehrssimulation, die in den vergangenen Jahren hauptsächlich benutzt wurde (Cetin, 2005). Es ist zu vermerken, dass die *DEQSim* in der Programmiersprache *C++* geschrieben ist. Das bedeutet, dass die benötigten Daten via Dateien ausgeschrieben werden müssen. Zudem müssen nach der Simulation die Resultate wiederum in *MATSim* eingelesen werden, um den Optimierungszyklus, wie in Abbildung 1 dargestellt, zu schliessen.

3 Eingangsdaten

In diesem Abschnitt werden die zur Verfügung stehenden Daten beschrieben, aus denen sich die neuen technischen Herausforderungen ergeben haben, die im Rahmen dieses Projektes bewältigt werden mussten.

3.1 Netzwerk

Erklärtes Ziel des Projektes ist es, auf hoch aufgelösten kommerziellen Navigationsnetzen zu rechnen, deren typischer Einsatzbereich GPS Navigationsgeräte sind. Dies führt zu drei Herausforderungen: (i) Interpretation der Eingangsdaten, (ii) Performanz des Relaxierungsprozesses und (iii) Validierung der Resultate gegen hochauflösende Verkehrsmessungen.

Das hier verwendete Netz basiert auf den *Tele Atlas MultiNet Shapefile 4.3.2.1 Format* Spezifikationen (siehe Tele Atlas MultiNet, 2010) und liefert die Verkehrsinfrastruktur der Schweiz im Zeitraum Herbst 2008 bis Frühling 2009. Als Grundlage wurden die folgenden Datensätze (i) *junction (jc) shape file*, (ii) *network (nw) shape file*, (iii) *speed restriction (sr) dbf file*, (iv) *maneuver (mn) shape file* und (v) *maneuver path (mp) dbf file* verwendet. Während Topologien, Geschwindigkeiten, wie auch Abbiegebeziehungen äusserst präzise in den Datensätzen attribuiert sind, sind Angaben zu den Anzahl Fahrspuren pro Richtung wie auch Verkehrs-

kapazitätsangaben nicht Teil der Datenerfassung (mit Ausnahme weniger Strassenabschnitte). Aus diesem Grund wurden diese Daten für die Planungssimulation aus den *Tele Atlas* Strassentypisierung imputiert.

Teil der Performanz Optimierung für Mikrosimulationsmodelle liegt darin, die beschreibenden Systemgrenzen einerseits präzise abzubilden, andererseits diese von unnötigen, zum Modell nichts beitragenden Meta-Informationen zu befreien. Dazu gehören in diesem Fall (i) die *Poly-line* Geo-Kodierung der Strassenabschnitte, wie auch (ii) Knotenkodierungen zur Unterteilung langer Strassenabschnitte. Bei (i) wurden einfach die Zwischenknoten der Polylinien ignoriert und stattdessen, die real zu befahrende Strassenlänge den Kanten des Simulationsnetz hinzugefügt. Bei (ii) wurde das Netz “topologisch identisch ausgedünnt”. Das heisst, Strassenzüge mit mehreren Kanten gleicher Attributierung ohne Abzweigungen oder Kreuzungen, werden zu einem Strassenstück zusammengefasst. Das daraus entstandene *MATSim XML Network v1* Dokument (siehe MATSim-T, 2008) beschreibt 472’819 Knoten (MATSim *nodes*) und 1’035’305 Kanten (MATSim *links*), die die gesamte Schweiz repräsentieren.

3.2 Zählstation

Zur Validierung der Verkehrsströme werden — unter anderem — Zählungen von halb- und/oder vollautomatischen Zählstationen gesammelt und mittlere, stündliche Verkehrsmengen für den Werktag berechnet. Die Zählungen sollten bestenfalls den gleichen, möglichst langen Zeitraum erfassen. Die hier verwendeten Daten stammen aus verschiedenen kantonalen, wie auch städtischen Behörden und wurden mit den nationalen Zählstationen des ASTRA (ASTRA, 2006) vereinigt. Die Daten stammen, je nach Quelle, von den Jahren 2004 bis 2008 und decken die folgenden Regionen ab:

- ASTRA (gesamte Schweiz)
- Kanton Basel Land
- Kanton Graubünden
- Kanton Neuenburg
- Kanton Zürich
- Stadt Zürich

Die daraus berechneten 655 richtungstrennten, mittleren, stündlichen Zählwerte wurden per Hand auf das oben beschriebenen Strassennetz gemappt. Aus den stundenfeinen Jahresdaten

werden für jede der Zählstationen die Stundenwerte für einen durchschnittlichen Werktag abgeleitet. Dies geschieht, indem für jede Zählstelle der Durchschnitt aller Dienststage bis Donnerstage gebildet wird, wobei Feiertage und die 5 % stärksten Abweichler ausgeschlossen werden.

3.3 Gebäude

Das modellierte Untersuchungsgebiet ist neben der Verkehrsinfrastruktur im Wesentlichen durch die Landnutzung geprägt. Sie bestimmt, welche Aktivitäten an welchen Orten stattfinden können. Für ein mikroskopisches Verkehrsmodell sind hoch aufgelöste Landnutzungsdaten wünschenswert. Mit der Eidgenössischen Betriebszählung 2001 stehen der Nachfragemodellierung hektarscharfe Datensätze für die Verteilung der Arbeitsplätze schweizweit zur Verfügung (Bundesamt für Statistik, 2001). Um den Ort der ausgeführten Aktivitäten möglichst differenziert bestimmen zu können, werden aus den Hektardaten künstliche Gebäude generiert (*MAT-Sim XML Facilities v1* Dokument, siehe MATSim-T, 2008). Diesen Gebäuden werden Aktivitätentypen mit entsprechenden Fassungsvermögen zugeordnet:

- Die künstlichen Wohngebäude auf dem Gebäude-Datensatz der Datapuls AG. Für jeden der ca. 1.3 Mio. Einträge wird in der Schweiz ein Gebäude modelliert mit Aktivitätentyp *home*, dessen Fassungsvermögen der Anzahl im Gebäude registrierten Personen des Datapuls Personen-Datensatz entspricht.
- Die künstlichen Arbeitsstätten (Aktivitätentyp *work*) basieren auf den hektarscharfen Betriebszählungsdaten. Dort sind die exakte Anzahl Arbeitsplätze in Industrie und Dienstleistungen, sowie die exakte Anzahl Arbeitsstätten in den Grössenordnungen 0-9, 10-49, 50-249 und >250 Vollzeitäquivalente pro NOGA-Klasse gegeben. Die Arbeitsplätze wurden hektarweise proportional auf die Arbeitsstätten verteilt. Insgesamt wurden 382'979 Arbeitsstätten erzeugt. Je nach NOGA-Typ der Arbeitsstätte wurden ihr ggf. einer der zusätzlichen Aktivitätentypen *education*, *shop* und *leisure* hinzugefügt (Meister, 2008).

3.4 Haltestellen und OeV-Reisezeit Matrizen

MATSim liefert eine detaillierte, zeitdynamische, agentenfeine Auflösung der Verkehrsflüsse für den MIV und LIV. Es steht aber (noch) kein Modell zur Kanten- und Fahrzeugfeinen Modellierung des öffentlichen Verkehrs zur Verfügung. Es ist jedoch ohne weiteres möglich, Verkehrsmittelwahlmodelle in MATSim zu integrieren, ohne auf eine mikroskopische Simulation des OeV angewiesen zu sein. Als "Ersatz" wird dabei auf schon berechnete oder erfasste Reisezeitenverteilungen zurückgegriffen, in diesem Fall auf die Reisezeitmatrizen und die Haltestellentabelle aus den Modellen von (Vrtic *et al.*, 2005).

3.5 Population und Nachfrage

Die initiale Nachfragemodellierung in MATSim besteht zum einen aus der Generierung der synthetischen Population (Agentenpopulation) und zum anderen aus der Modellierung der initialen, individuellen, aktivitätenbasierten, zeitdynamischen Nachfrage. Das Projekt verlangte in diesem Fall sich direkt auf den Personendatensatz der Datapuls AG zu beziehen. Das heisst, die Modellierung reduziert sich auf eine simple Konvertierung des Datensatzes. Dies entspricht der gleichen Vorgehensweise wie bei den Arbeiten mit der Volkszählung 2000 (siehe Balmer *et al.*, 2008, 2009, etc.). Die Modellierung der initialen Nachfrage basiert wiederum auf der Pendlerstatistik (Vrtic und Axhausen, 2003) und dem Mikrozensus des Verkehrs 2005 (Bundesamt für Statistik, 2006). Die detaillierte Modellierung ist in Ciari *et al.* (2008) und Balmer *et al.* (2009) zu finden. Die resultierende initiale Nachfrage im *MATSim XML Plans v4* Format enthält

- 5'986'051 Agenten (ca. 88% der gesamten Schweizer Bevölkerung),
- 22'152'812 Wege (ca. 3.7 Wege pro Agent),
- 28'138'863 Aktivitäten (ca. 4.7 Aktivitäten pro Agent),
- 5 Verkehrsmittel: MIV, OeV, Fahrrad, zu Fuss und Mitfahren,
- 10 Aktivitätentypen: zu Hause, Arbeit-Sektor 2, Arbeit-Sektor 3, Einkaufen, Freizeit, Schule-Kindergarten, Schule-Pflicht, Schule-Erweitert, Schule-Universität und Schule-Übrige,

wobei die Orte der Aktivitätentypen zu Hause, bei der Arbeit und in der Schule als Ankerpunkte gelten, da sie aus den Eingangsdaten (Mikrozensus und Pendlerstatistik) extrahiert wurden und nicht im Relaxierungsprozess verändert werden dürfen.

4 Technische Weiterentwicklung

Dieser Abschnitt enthält die Beschreibung des Fortschritts von MATSim sowohl was die Simulationssoftware betrifft, als auch den projektspezifischen Fortschritt des Verhaltensmodells.

4.1 Verhaltensmodell und Nutzenfunktion

Die Hauptanforderung an die Weiterentwicklung des Verhaltensmodells war die vermehrte Individualisierung von Attributen der Aktivitäten. Individualisierung führt tendenziell zu realistischen und stabileren, weil heterogeneren Szenarien. Sie stellt höhere Ansprüche an die

Datenverarbeitung, da statt wenigen Werten für alle Agenten nun jeder Wert pro synthetischer Person oder anderer Modelleinheit vorgehalten werden muss. Bei folgenden Modellbestandteilen konnten Individualisierungen erreicht werden:

Öffnungszeiten Der tägliche Zeitraum, an dem Aktivitäten ausgeführt werden können, weil die entsprechende Aktivitätenegelegenheit zeitlich zur Verfügung steht, ist nun ein Attribut der Aktivitätenegelegenheit, und nicht mehr des Aktivitätentyps. Es führen also nicht mehr alle Agenten die Aktivität *shop* im gleichen Zeitraum aus, sondern die Öffnungszeiten sind durch die konkrete Aktivitätenegelegenheit (hier: den Laden) vorgegeben. Die modellierten Öffnungszeiten basieren teils auf erhobenen Daten, teils auf einfachen Annahmen (Meister, 2008).

Aktivitätendauern Das gewünschte Verhältnis der Aktivitätendauern ist ein wesentlicher Eingangsparameter der Nutzenfunktion (Parameter t^* , siehe 2.1). Anstatt vereinfachend pro Aktivitätentyp den gleichen Wert anzunehmen, oder Hilfslösungen wie eine Permutation von Aktivitätentypen und stundenweisen gewünschten Dauern zu benutzen, sind diese Werte nun Attribute des Agenten.

Freigabe der Zeitnutzung Führt ein Agent mehrere Aktivitäten des gleichen Typs aus, spielt es für den Nutzen keine Rolle mehr, wieviel Zeit der Agent pro Einzel-Aktivität verbringt. Die Aktivitätendauern werden pro Typ addiert. In der Nutzenfunktion werden diese Summen verarbeitet. Der Vorteil ist, dass keine starren Parameter für jede einzelne Aktivität vorgegeben werden müssen, sondern sich die Zeitverteilung einzig und allein aus der in der Nutzenfunktion formulierten Verhaltensmodells ergibt.

Freigabe der Verkehrsmittel Im Gegensatz zu früheren Studien (Balmer *et al.*, 2009; Raney und Nagel, 2006; Rieser *et al.*, 2007, etc.), ist eine Bewertung der Wege nun auch anhand verschiedener Verkehrsmittel möglich. Bewertbar sind MIV, Mitfahren, OeV, Fahrrad, zu Fuss und "Restliche Verkehrsmittel".

4.2 Variation der Aktivitätenpläne

Um neben Routenwahl und Wahl der Abfahrtszeiten bzw. Aktivitätendauern noch weitere Aspekte des Verkehrsverhaltens abbilden zu können, kommen drei neue Replanning-Module zum Einsatz.

Landmarks-A* Router Die Implementation des Router Moduls auf Basis des dynamischen Dijkstra Algorithmus genügt den Anforderungen an die Performanz nicht mehr. Deshalb

wurde ein weiterer Router von Lefebvre und Balmer (2007) entwickelt, dessen Berechnungen auf euklidischen Netzen identische Resultate zum herkömmlichen Router Modul liefert, jedoch um etwa eine Grössenordnung schneller ist.

Planomat Beim Planomat handelt es sich um ein Best-Response-Modul in Bezug auf die Zeitplanung des Agenten und die Verkehrsmittelwahl auf Subtour-Ebene. Einerseits fungiert dieses Modul als Ersatz für das bisherige Random-Mutation-Modul *Time Allocation Mutator* (siehe Abschnitt 2.2). Damit konvergiert neben den Routen auch die Zeitverteilung im evolutionären Algorithmus von MATSim schneller (Meister *et al.*, 2006). Da für die Optimierung ein genetischer Algorithmus verwendet wird, ist es recht einfach, weitere Variablen in die Optimierung mit einzubeziehen. In diesem Projekt wird neben den Aktivitätenzeiten auch das Verkehrsmittel für jede Subtour des Aktivitätenplans variiert. Als Alternativen stehen dabei die vier erwähnten Modi *car*, *pt*, *bike* und *walk* zur Verfügung.

Standortwahl für sekundäre Aktivitäten Es gibt Aktivitätentypen deren Standort sich in der Simulation nie ändert. Dazu gehören alle Aktivitäten der Typen *zu Hause*, *Arbeit* und *Schule*. Während die Standorte von Aktivitäten dieser Typen aus Daten bekannt sind und so als Randbedingung fungieren, müssen die Standorte der Aktivitäten der Typen *shop* und *leisure* hergeleitet werden. Der dafür verwendete Ansatz schätzt zunächst ein verfügbares Zeitbudget für die An- und Abreise von/zu diesen Aktivitäten sowie deren Ausführung (Horni *et al.*, 2009). Damit wird der in Frage kommende räumliche Teil des Szenarios, in welchem ein neuer Aktivitätenstandort ermittelt wird, begrenzt. Aus diesem Bereich wird dann zufällig ein Standort gewählt, an dem die Aktivität ausgeführt werden kann. Abschliessend werden für die beiden Wege zu und von der betroffenen Aktivität die neuen kürzesten Routen ermittelt. Dieses Modul ist also ein Random-Mutation-Modul in Bezug auf den Standort flexibler Aktivitäten, kombiniert mit dem Best-Response-Router (siehe oben).

4.3 Mikrosimulation der Aktivitätenpläne

Eines der Projektziele war es die C++ DEQSim Mikrosimulation in MATSim zu integrieren. Zu diesem Zweck wurde das event-basierte Simulationsmodell in der Programmiersprache *Java* neu implementiert, in welcher auch MATSim programmiert ist. Dies hat den Vorteil, dass der Datenaustausch zwischen MATSim und der Mikrosimulation nicht mehr über eine langsame, datei-basierte Schnittstelle erfolgen muss. Zudem hat dies zu neuen Wegen für die Beschleunigung von MATSim geführt, weil die Events sofort bearbeitet werden können. Es muss nicht gewartet werden, bis die Mikrosimulation zu Ende gelaufen ist. Zudem wurde die Verarbeitung der Events parallelisiert, so dass Rechner mit mehreren Prozessoren diese parallel verarbeiten können.

Performanzmessungen zwischen der C++ DEQSim und der Java Implementation mit paralleler Events-Verarbeitung auf unterschiedlichen Auflösungen des Verkehrsnetzes haben bei grossen Netzen, wie hier verwendet, einen Zeitgewinn von ca. 30% pro MATSim Iteration gegenüber der C++ Implementation ausmachen können (Waraich *et al.*, 2009). Anzumerken dabei ist, dass die Parallelisierung sich bis jetzt einzig auf das Verarbeiten des JDEQSim Outputs bezieht und die Mikrosimulation selbst noch nicht parallelisiert ist.

5 Berechnung des relaxierten Zustands

Zur Berechnung des relaxierten System mit dem MATSim Relaxierungsprozess (siehe Abbildung 1) der gesamten Nachfrage von 5.9 Mio. Agenten wurde ein Rechnerserver vom Typ Sun Fire X4600 M2 mit 16 Kernen (8 Dual-Core CPUs) und 128 GB Hauptspeicher verwendet. Die Applikation verlangt für den verwendeten Datensatz 90 GB RAM auf der Java 1.5.17 VM.

5.1 Performanz

Die Gesamtdauer einer Iteration (siehe Abbildung 2) beträgt ca. 4.5 Stunden, wobei der Hauptteil von ca. 75% von der Mikrosimulation und dem parallelen Event-Handling benötigt wird. Unter den Replanning-Modulen benötigen die beiden Best-Respond-Module *planomat* und *Landmarks-A* Router* die meiste Zeit. Das *Location-Choice* und das *MutateTimeAllocation* Modul benötigen entsprechend ihrer Natur als Random-Mutation-Modul kaum Rechenzeit (siehe Abschnitte 2.2 und 4.2). Zieht man in Betracht, dass das Replanning gleichmässig auf 16 Kerne verteilt werden kann, die Mikrosimulation an sich jedoch nicht parallelisiert ist, ist der Anteil an CPU-Zeit in den Replanning-Modulen deutlich höher als in der Mikrosimulation. Alle 10 Iterationen wird die Agentendatenbank zwischengespeichert (*dumpPlans*). Die zur Serialisierung, Komprimierung und physischen Speicherung der mehrere GB grossen Datei nötige Zeit beträgt ca. 1 Stunde. Dieser Schritt ist nicht parallelisierbar. Weiterhin wird alle 10 Iterationen der Zählzeitenvergleich durchgeführt (*counts*).

5.2 Relaxierung

In Abbildung 3 ist die Relaxierung des Verkehrsmodells anhand von Durchschnittswerten des Nutzens der Aktivitätenpläne bzw. seiner Komponenten dargestellt. Das System gilt als relaxiert, wenn sich der Nutzen der ausgeführten Pläne ($U_{plan,exec}$) nicht mehr verbessert. Je nach Konfiguration sind dafür mindestens 50-60, oft aber auch hunderte bis tausende Iterationen möglich. Durch die Nutzung von Best-Response-Replanning-Modulen ist es möglich, die An-

Abbildung 2: Rechenzeiten der verschiedenen Simulationskomponenten

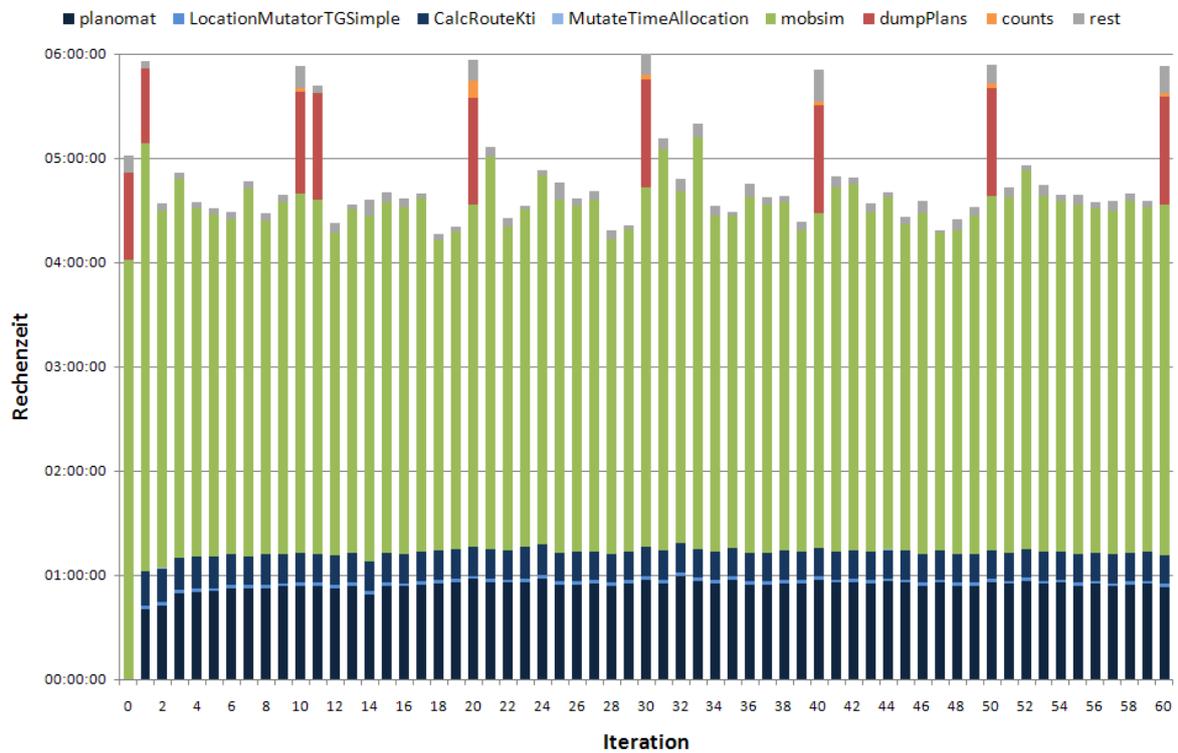
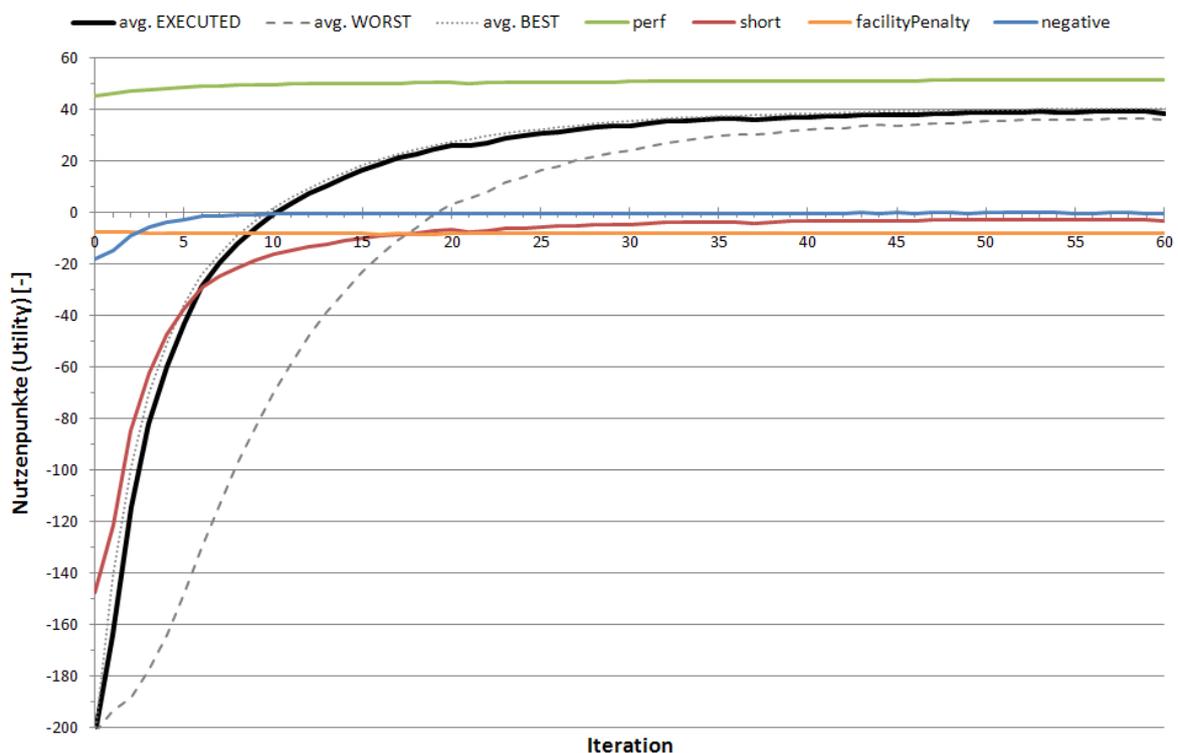


Abbildung 3: Relaxierung des Verkehrsmodells



zahl Iterationen auf unter 100 zu reduzieren. Es ist klar zu erkennen, dass der durchschnittliche Nutzen der umgelegten Nachfrage (durchgezogene schwarze Kurve) bei etwa Iteration 40 bis 50 kaum noch steigt, das System also als relaxiert bezeichnet werden kann.

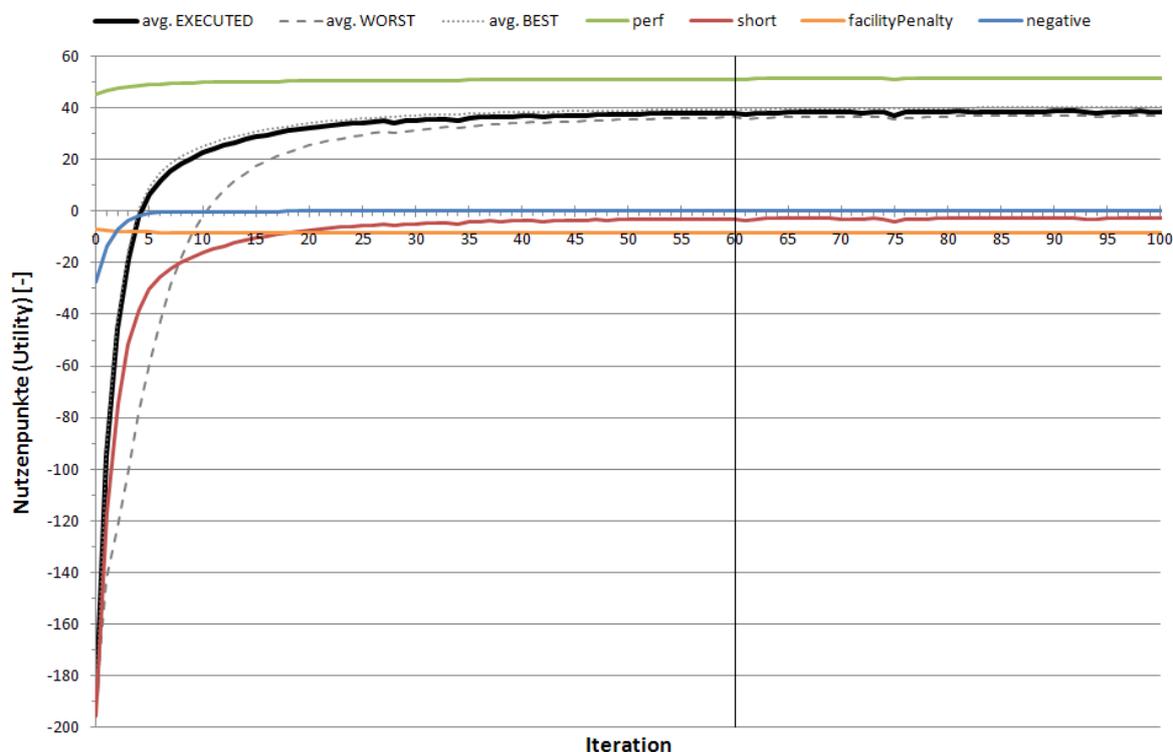
Ein Hinweis auf den Fortschritt der Relaxierung ist die Distanz der Durchschnittsnutzenwerte verschiedener Teilmengen der in der Agentendatenbank vorhandenen Pläne. Der durchschnittliche Nutzen der bis zur aktuellen Iteration höchst bewerteten Nachfrage (gepunktete graue Linie) wie auch derjenige, der tiefst bewerteten Nachfrage (gestrichelte graue Linie) ab ca. Iteration 50 sind sehr nahe beieinander, was wiederum die Relaxierung bestätigt.

Die Betrachtung der verschiedenen Nutzenbestandteile zeigt, dass vor allem die Bestrafung für zu kurze Ausführung von Aktivitäten (U_{short}) bzw. deren Vermeidung für die Entwicklung der Durchschnittsnutzenwerte verantwortlich ist. Weiterhin wird ein technische Strafe, mit der Tagespläne länger als 24 Stunden stark negativ bewertet werden, schnell abgebaut ($U_{negative}$). Solche Pläne können zu Beginn der Simulation auftreten, wenn extrem lange Reisezeiten entstehen. Sie sind ein zusätzlicher Anreiz im Router eine Alternativ-Route zu finden, bzw. durch den *planomat* auf ein anderes Verkehrsmittel zu wechseln. Der Nutzen vom Ausführen der Aktivitäten ist von Beginn an hoch, und steigt in den 60 Iterationen noch um ca. 6 Nutzenpunkte. Der hohe, schon fast Nutzer-optimale Startwert hat seine Ursache in der schon realistisch angenommenen Zeitbudget-Verteilung der initialen Nachfrage (basierend auf dem Mikrozensus 2005). In der Arbeit von Raney (2005) wird gezeigt, dass diese Initialisierung keine Auswirkung auf die resultierende Nachfrage hat, verglichen mit einer unrealistischen initialen Zeitverteilung.

6 Resultate

Im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt wurden die Validierungen und Analysen der relaxierten Nachfrage anhand eines 25% Zufalls-Samples der ursprünglichen Agentenpopulation gewählt. Dies hat mehrere Gründe. Zum Ersten sind anhand einer Versuchsplanung die Parameterwerte der einzelnen Nutzenanteile kalibriert, um ein möglichst realistisches, individuelles Mobilitätsverhalten abzubilden, was mehrere dutzende MATSim Relaxierungen bedeutet. Da das gesamte Szenario 90 GB RAM benötigt, wurde dieses Sample gewählt, um drei Berechnungen gleichzeitig durchzuführen. Jede dieser 25% Sample-Runs benötigen ca. vier Tage (statt der 2 Wochen) bis ein stabiler Zustand erreicht ist. Des Weiteren wurde in verschiedenen Zusammenhängen schon gezeigt, dass ein zufällig gewähltes (nicht zu kleines) Sample der Agenten-Population gleiche Verkehrsdynamiken und Resultate produziert, solange man entsprechend die Infrastruktur im gleichen Masse reduziert (zum Beispiel, Strassenkapazitäten, Strassenlängen, etc.). Beispiele für solche Samples findet man unter anderen in Raney und Nagel (2004); Raney (2005); Raney und Nagel (2006); Rieser *et al.* (2008) und Gao *et al.* (2010).

Abbildung 4: Relaxierung des Verkehrsmodells (25% Sample Run)



Zum Schluss war ein weiterer Aspekt, dass die mikroskopischen Informationen die aus der relaxierten Nachfrage extrahiert werden, in den Produkten der Datapuls, resp. der Axon Active AG in aggregierter Form für demographische und sozio-demographische Frequenz-Anteile verwendet wird, und somit ein 100% Runs (zumindest für die nächste Zeit) nicht notwendig ist. Nichtsdestotrotz wurde oben schon bewiesen, dass es technisch keinerlei Probleme gibt, die gesamte Agenten-Population zu simulieren.

Die Qualität der Simulationsresultate wird durch Vergleiche mit dem Mikrozensus Verkehrsverhalten vom Jahr 2005 geprüft (Bundesamt für Statistik, 2006). Ausserdem dient ein Vergleich mit Zählraten der Validierung der Verkehrsmengen auf Strassenabschnitten. Die Simulationsresultate stammen jeweils aus Iteration 60 des 25% Sample Runs. In dieser Phase ist das Verkehrsmodell fast vollständig relaxiert (siehe Abbildung 4).

6.1 Verkehrsmittelwahl

Da der Relaxierungsprozess gegenüber frühen Berechnungen auch die Verkehrsmittelwahl auf Subtour-Basis berechnen kann (planomat Replanning Module, siehe Abschnitt 4) ist dies der erste und wichtigste Aspekt der Validierung, da man hier das integrierte Verhaltensmodell sehr sensitiv reagiert. Tabelle 1 zeigt den Vergleich zum Mikrozensus 2005 für die Werktags-

Tabelle 1: Modal-Split der Gesamt-Nachfrage (Weg-basiert)

Verkehrsmittel	MZ 2005	MATSim
MIV	43.3 %	44.9 %
Mitfahren	4.4 %	0.9 %
OeV	13.4 %	15.3 %
Fahrrad	7.6 %	6.6 %
zu Fuss	31.3 %	32.2 %

befragten Personen und dem relaxierten Zustand. Zu erkennen ist der zu geringe Mitfahrer-Anteil. Dies ist ein Resultat der Konfiguration des planomat Modules. Man hat sich dazu entschieden, dass bei Neuplanung der Verkehrsmittel die Agenten das Verkehrsmittel “Mitfahren” nicht zur Verfügung haben. Dieser Entscheid wurde gefällt, weil die Simulation von Mitfahren in MATSim nicht wirklich erprobt ist. Da der Mitfahrer-Anteil sowiso schon sehr niedrig ist, wurde dieser Fehler absichtlich in Kauf genommen. Zusammenfassend kann man sagen, dass der Modal-Split äusserst präzise reproduziert werden konnte.

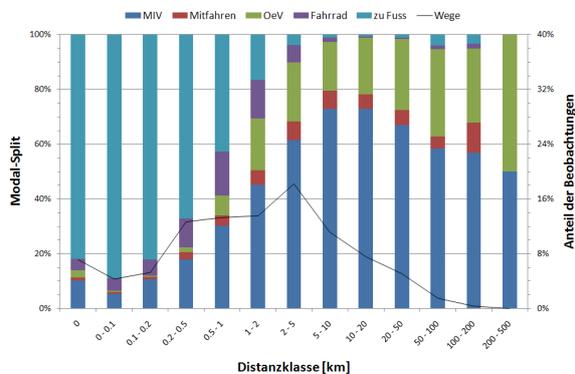
6.2 Fahrtweitenverteilungen

Ein weiterer Aspekt zur Validierung der Simulationsresultate sind Analysen der Fahrtweitenverteilungen im Zusammenhang mit der Verkehrsmittelwahl. Dazu werden die Verkehrsmittelanteile pro Distanzklasse (Abbildungen 5(a) und 5(b)) und die kumulativen Verkehrsmittelanteile nach Distanzen (Abbildungen 5(c) und 5(d)) aus dem Mikrozensus und den Simulationsresultaten gegenübergestellt. Ersteres ist einfacher zu vergleichen, wobei Letzteres auch die unterschiedlichen Gesamtanteile der Wege mit in Betracht zieht. Diese Anteile (schwarze Linie in Abbildungen 5(a) und 5(b), resp. Gesamtentwicklung der Balken in Abbildungen 5(c) und 5(d)) zeigen folgende Abweichungen auf: (i) Die Simulation produziert zu wenig Wege kurzer Distanzen ($\leq 1km$). (ii) Bei den Distanzklassen $0m$ und $\geq 50km$ sind die Verkehrsmittelanteile pro Distanzklasse sehr unterschiedlich. (iii) “Mitfahren” ist verschwindend klein bei der MATSim Relaxierung.

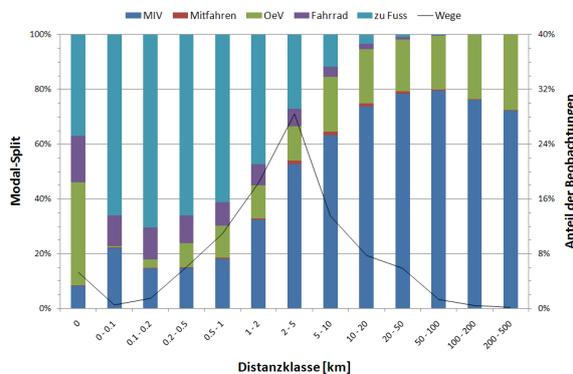
Während bei (iii) der Fehler in Kauf genommen wurde (siehe oben), sind die anderen “Abweichungen” genauer zu betrachten. Distanzklassen ab ca. $50km$ treten in beiden Zählungen äusserst selten auf (weniger 1% aller Wege) und geben keine Mobilitätsaussage (weder für den Mikrozensus noch für die Simulation). Sie sind rein der Vollständigkeit halber aufgeführt. Distanzklasse $0m$ ist ebenfalls mit Vorsicht zu betrachten. Einerseits werden berichtete Wege erst bei der Nachbearbeitung durch das Geo-Kodieren zu 0-Meter-Wege, wobei solche Wege in der Mikrosimulation per Definition ein Gebäudewechsel (zwei “facilities” an der gleichen Koodinate) verlangt. Da Verkehrsmittel auf Subtour-Ebene gewählt werden, müssen bei sol-

Abbildung 5: Vergleich Mikrozensus 2005 - MATSim: Fahrtweitenverteilungen

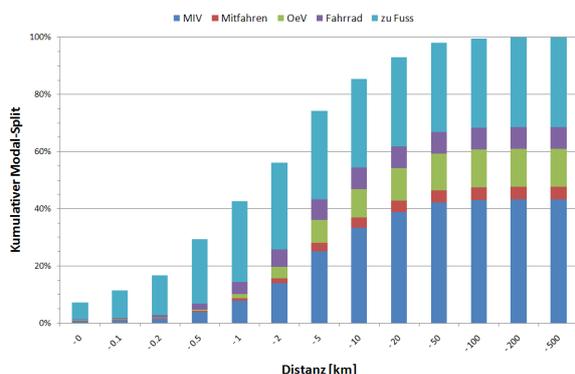
(a) MZ2005: Verkehrsmittel-Anteil der Wege pro Distanzklasse



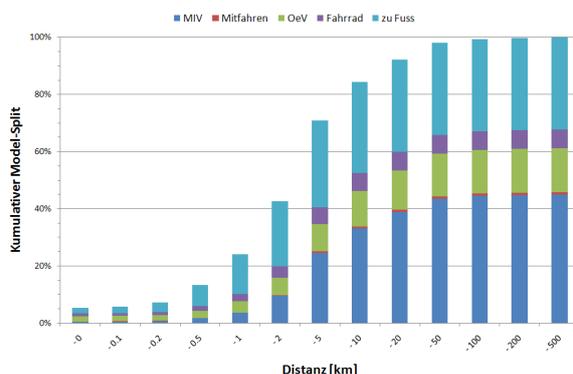
(b) MATSim: Verkehrsmittel-Anteil der Wege pro Distanzklasse



(c) MZ2005: Kumulative Verkehrsmittel-Anteile der Wege nach Distanz



(d) MATSim: Kumulative Verkehrsmittel-Anteile der Wege nach Distanz



chen Wegen gegebenenfalls auch das zuvor gewählte Verkehrsmittel “mitgenommen” werden. Aus diesem Grund sind diese Wege in der Simulation nicht ausschliesslich “zu Fuss”-Wege.

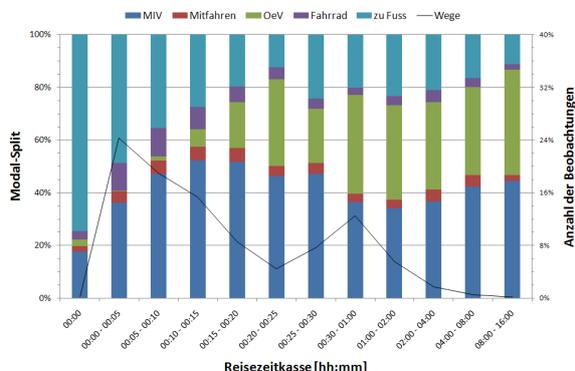
6.3 Reisezeitenverteilungen

Bei den Reisezeitenverteilungen widerspiegelt sich, ob das Simulationsmodell realistische Verkehrsdynamiken produziert. Bei den Abbildungen 6 gilt wieder das Gleiche wie oben: Die Reisezeitklasse 00:00 und $\geq 02:00$ sind statistisch irrelevant und sind nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Die prozentualen Gesamtanteile der Beobachtungen (schwarze Linie in Abbildungen 6(a) und 6(b), resp. Gesamtentwicklung der Balken in Abbildungen 6(c) und 6(d)) zeigen ein ähnliches Abbild und die grösseren Abweichungen zeigen sich wiederum in den kleineren Reisezeitklassen.

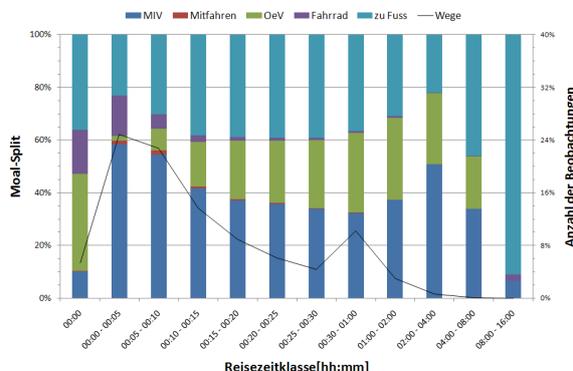
Bei beiden Vergleichen (Distanz und Reisezeit) zeigen die Entwicklungsmuster der Abbildungen ähnliches Verhalten auf, wie beim Mikrozensus 2005.

Abbildung 6: Vergleich Mikrozensus 2005 - MATSim: Reisezeitenverteilungen

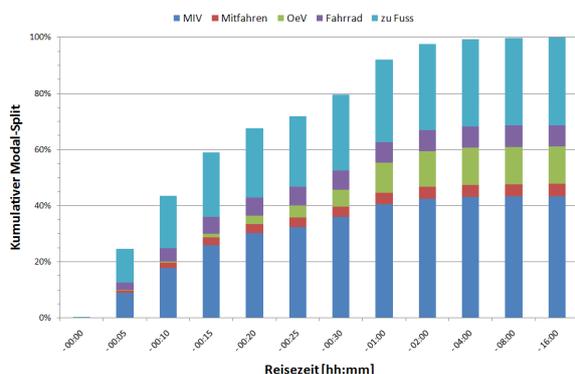
(a) MZ2005: Verkehrsmittel-Anteil der Wege pro Reisezeitklasse



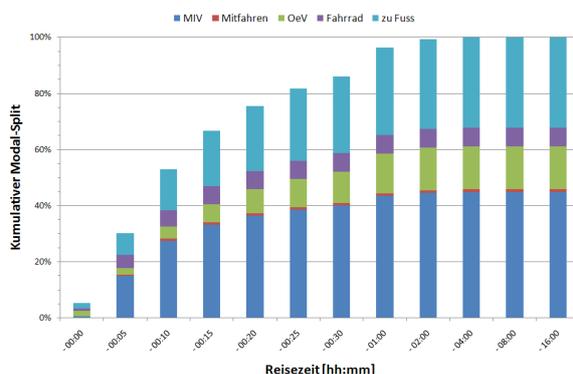
(b) MATSim: Verkehrsmittel-Anteil der Wege pro Reisezeitklasse



(c) MZ2005: Kumulative Verkehrsmittel-Anteile der Wege nach Reisezeit



(d) MATSim: Kumulative Verkehrsmittel-Anteile der Wege nach Reisezeit



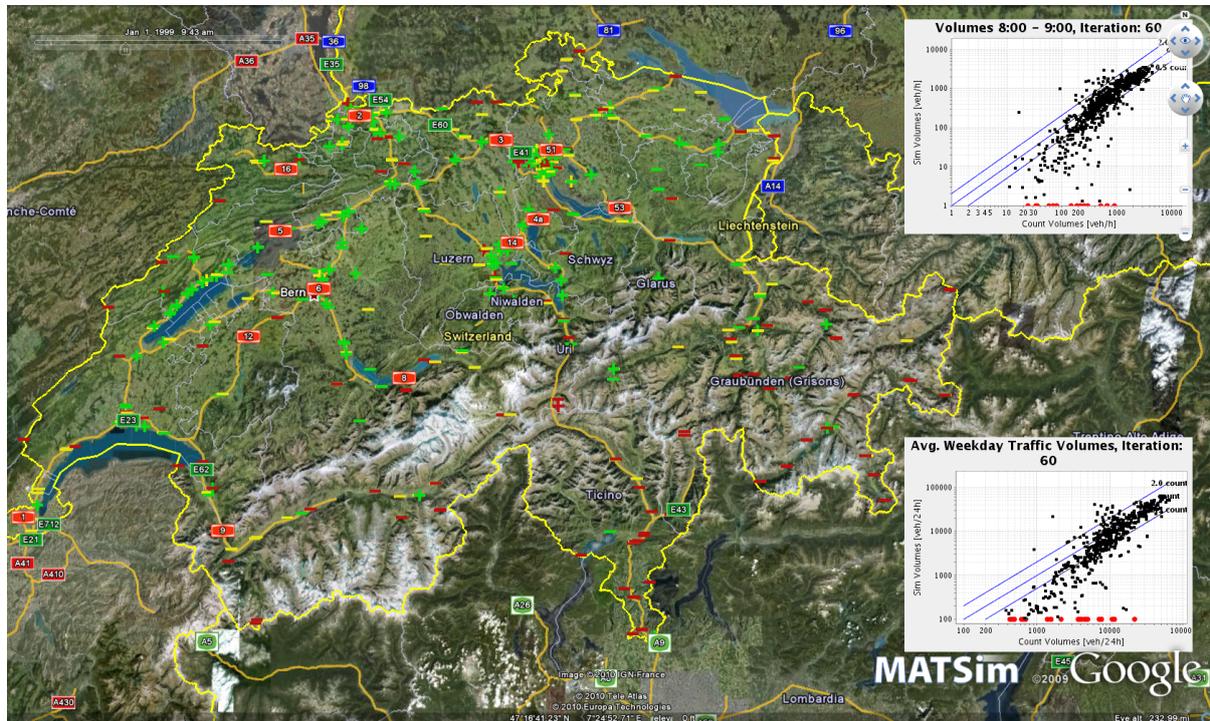
6.4 Strassen-Verkehrszählungen

Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden für dieses Projekt nationale, kantonale und städtische Zählungen verwendet (siehe Abschnitt 3.2). Der Vergleich zwischen den simulierten Werten und den gemessenen Zählungen wird in MATSim vollautomatisch noch während der Simulation des Verkehrsflusses produziert. MATSim bietet dabei die Möglichkeit, Ausgaben in einfachem Text Format, als eigenständige Grafiken oder als interaktive *Keyhole-Markup-Language*-Datei KML (2008), die mittels der Software Google Earth (2006) dargestellt werden, auszugeben.

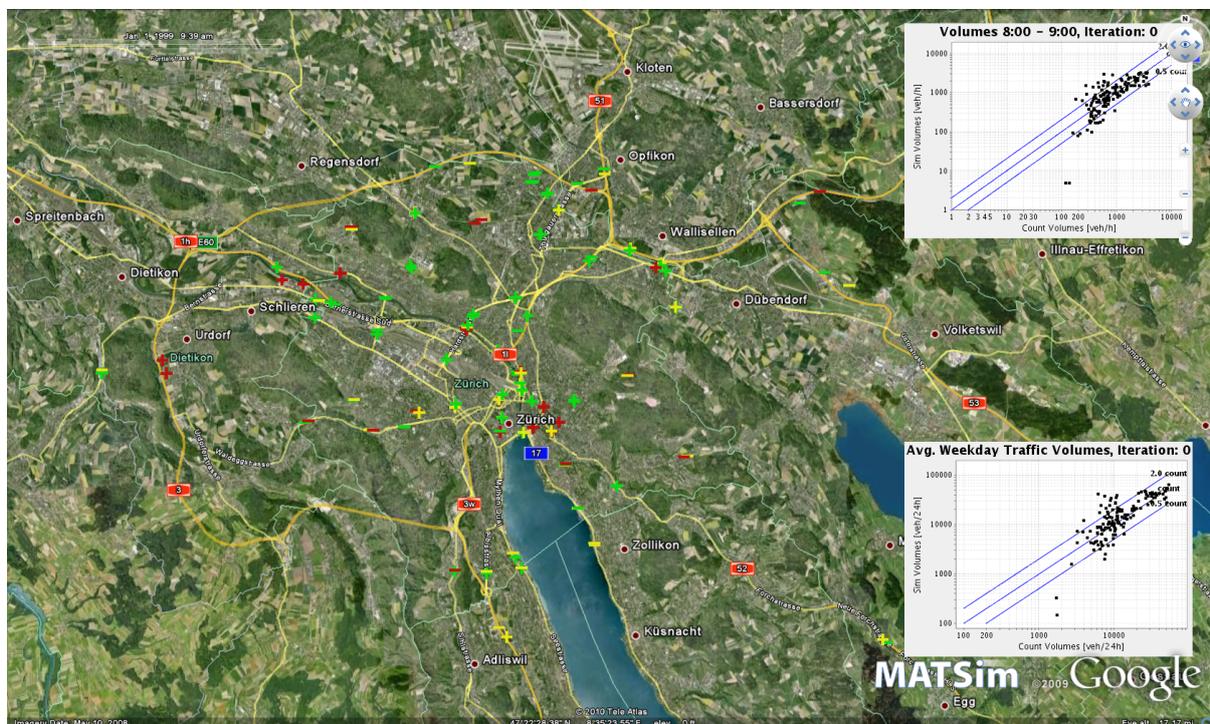
Die Aufgabe des Projektes besteht darin, dass die Mobilität der Schweizer Bevölkerung modelliert wird. Dementsprechend liefert die Simulation keine Information zum grenzüberschreitenden Verkehr und Güterverkehr. Damit ist es schwierig, einen direkten, quantitativen Vergleich der Zählungen mit der Simulation zu erzielen, da die Zählstationen nur die Information des gesamten Verkehrs widerspiegeln. Darum beschränkt man sich hier auf qualitative Vergleiche mit

Abbildung 7: Übersicht verwendeter Zählstationen (Stunde 8–9)

(a) Gesamte Schweiz



(b) Ausschnitt Zürich

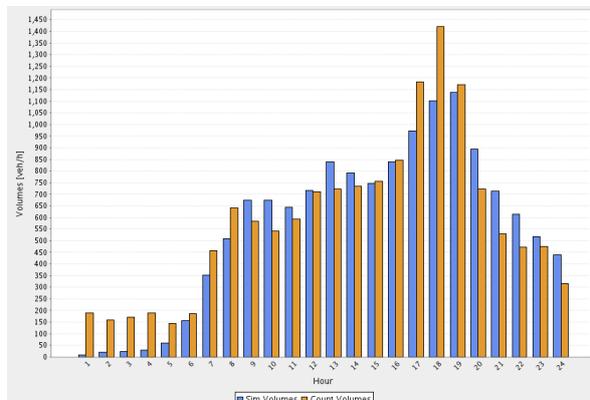
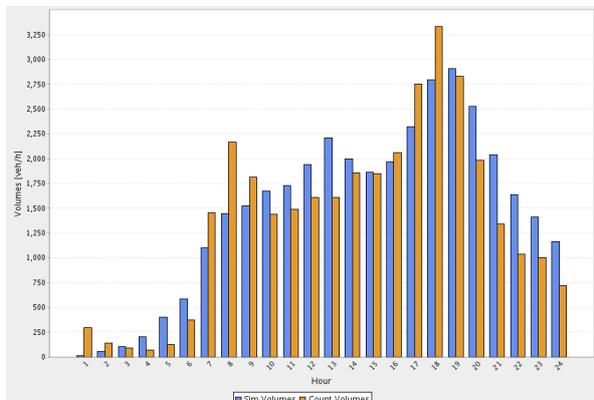


den Messwerten.

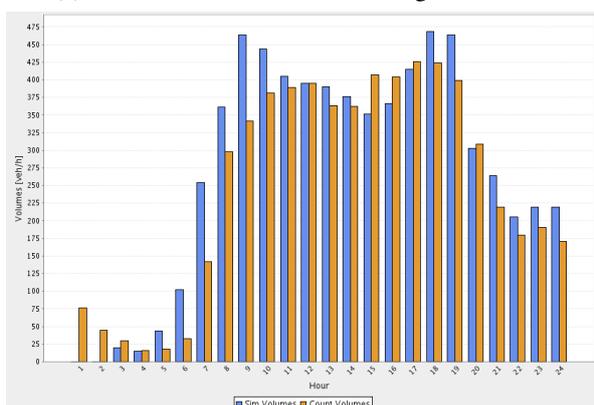
Die Abbildungen 7 zeigen eine Übersicht der Vergleiche aller Zählstationen der Schweiz zur

Abbildung 8: Ganglinien ausgewählter Zählstationen

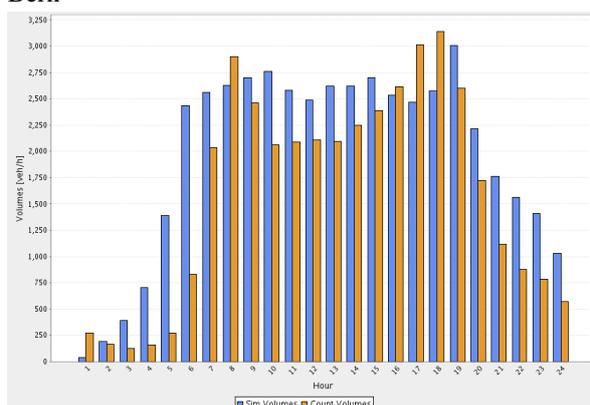
(a) Pendlerstecke: Autobahn A53 von Brütisellen nach Uster (b) Zubringerstrecke: Wehntalerstrasse von Affoltern nach Regensdorf



(c) Innenstadt: Talstrasse Richtung Nord-West



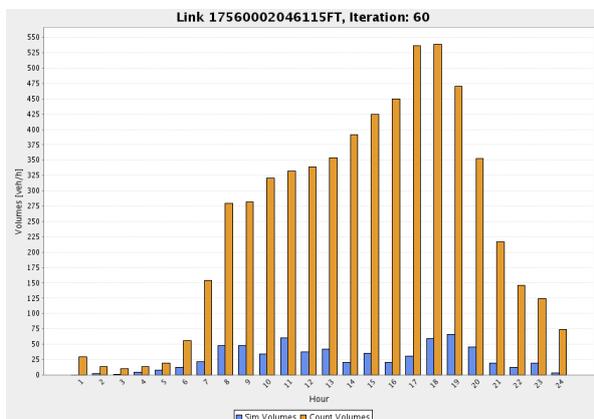
(d) Hauptachsen: Autobahn A1 bei Härkingen Richtung Bern



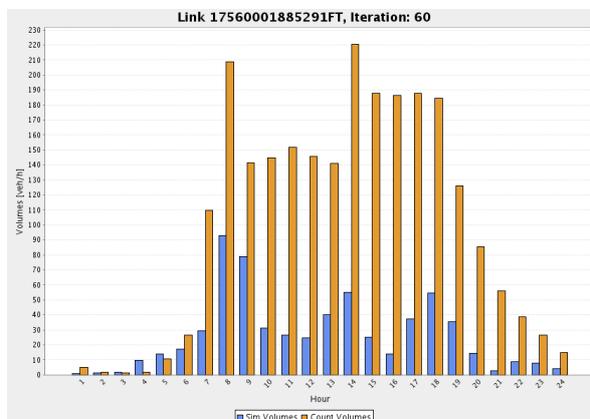
Stunde 8–9. Auf der rechten, oberen Seite sind zudem die Log-Plot Vergleiche zur entsprechenden Stunde, rechts unten die Log-Plot Vergleiche für den gesamten Tag (0–24 Uhr). Die Abbildung 7(b) zeigt zudem die Vergleiche, wenn man nur einen Ausschnitt um Zürich (Kreis mit 12 km um den Bellevue Platz) betrachtet. Allgemein kann man erkennen, dass ein Grossteil der Zählwerte mit höheren Verkehrsaufkommen gut abgebildet werden, wobei ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Zählungen klar unterschätzt wird. Betrachtet man die geographischen Verteilungen dieser schlecht eingeschätzten Zählstationen, erkennt man, dass diese typischerweise Nahe der Grenze der Schweiz zu finden sind. Dies ist zu erwarten, da der grenzquerende Verkehr nicht abgebildet wird. Weitere Unterschätzungen findet man in Randregionen, wie zum Beispiel Graubünden oder Tessin. Dies vor allem bei Strassen mit niedrigem Verkehrsaufkommen. Dies ist ein typisches Verhalten bei solchen stochastischen Modellen, da die absolute Abweichung bei untergeordneten Strassen kaum ins Gewicht fällt, jedoch der relative Fehler schnell mehreren hundert Prozent entsprechen kann. Überschätzungen des Verkehrs geschehen nur in seltenen Fällen und sind fast ausschliesslich in städtischen Regionen festzustellen (siehe

Abbildung 9: Beispiele der Fehlerquellen anhand ausgewählter Zählstationen

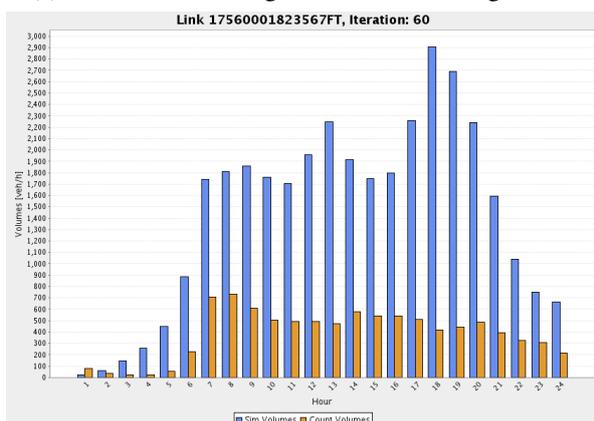
(a) Grenze: Grenzstrasse bei Thayngen nach Deutschland



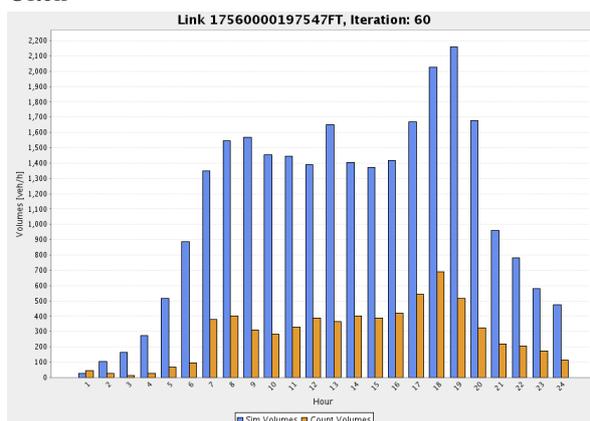
(b) Geringe Nachfrage: Oberalpstrasse bei Rueun Richtung Illanz



(c) Zeitraum: Westring bei Urdorf Richtung Süden



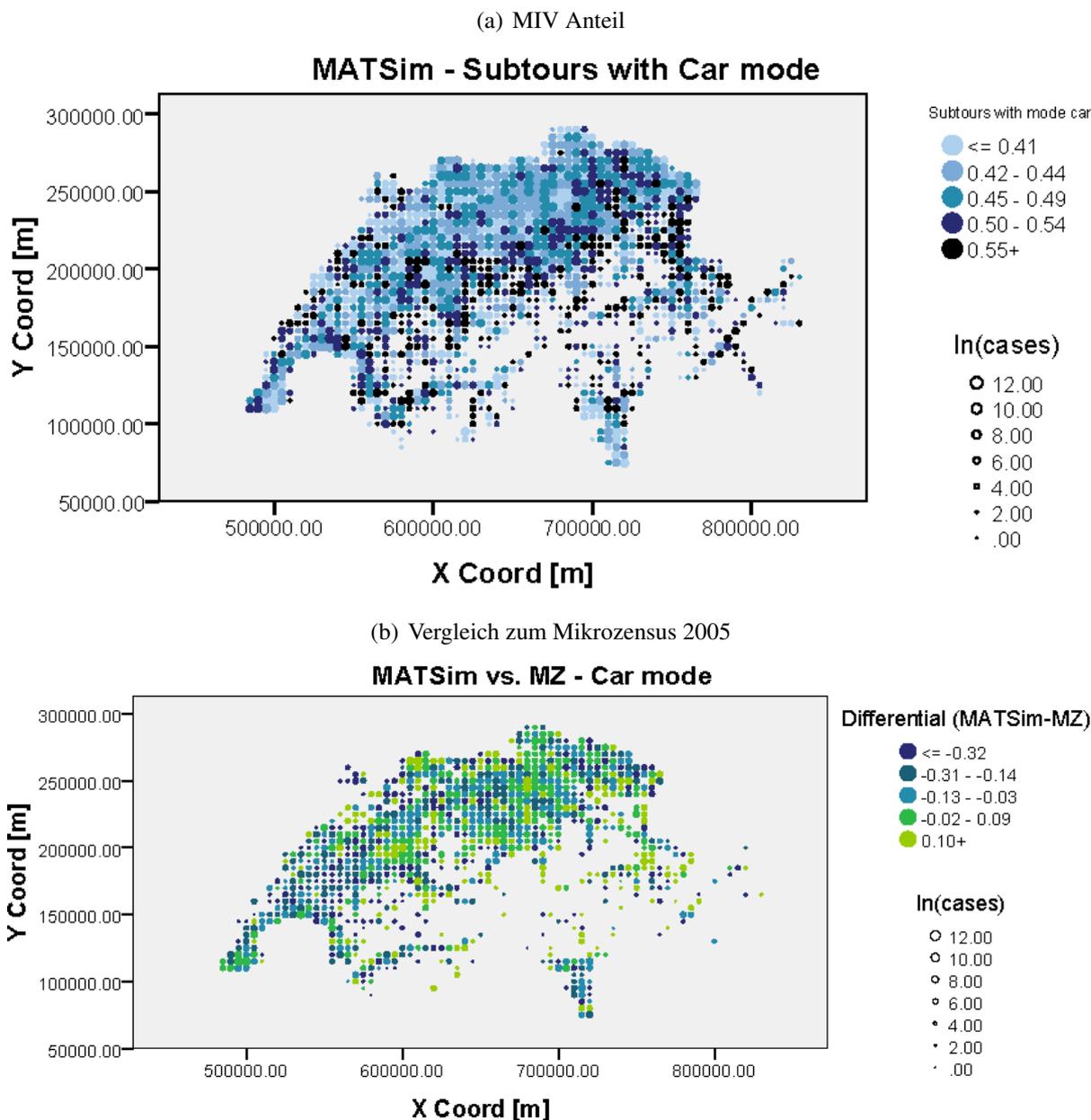
(d) Mapping: Autobahn A2 bei Rothenburg Richtung Olten



Log-Plots in Abbildung 7(b)).

Um die oben genannten Ähnlichkeiten, resp. Unterschiede besser qualitativ erfassen zu können, werden exemplarisch einzelne Zählstationen betrachtet. In Abbildung 8 sind 4 typische Strassentypen (Pendler, Zubringer, innerorts und Hauptachsen) in ihrem zeitlichen Verlauf im Vergleich dargestellt. Es zeigt sich, dass das dynamische Abbild solcher Strassen qualitativ, wie auch quantitativ ziemlich gut widerspiegeln wird. Auf der anderen Seite, zeigen die Abbildungen 9 Beispiele für Ausreisser. Dazu gehören (a) grenznahe Zählstationen, die auf Grund der rein schweizerischen Nachfrage unterschätzt werden müssen, (b) geringe Verkehrsnachfrage, dessen Werte typischerweise klar unterschätzt werden, im Zusammenhang mit der Gesamtnachfrage aber ein zu vernachlässigende Rolle spielen, (c) Diskrepanzen in Zeitraum der Datenerfassung (hier: Zählwerte von 2006, jedoch Strassennetz inklusive Westumfahrung von 2009) und (d) Fehler beim Mapping der Zählstation auf das Strassennetz (hier: Landstrasse verwechselt mit Autobahn).

Abbildung 10: Räumliche Verteilung der Wahl der Verkehrsmittel auf Subtour Ebene: MIV

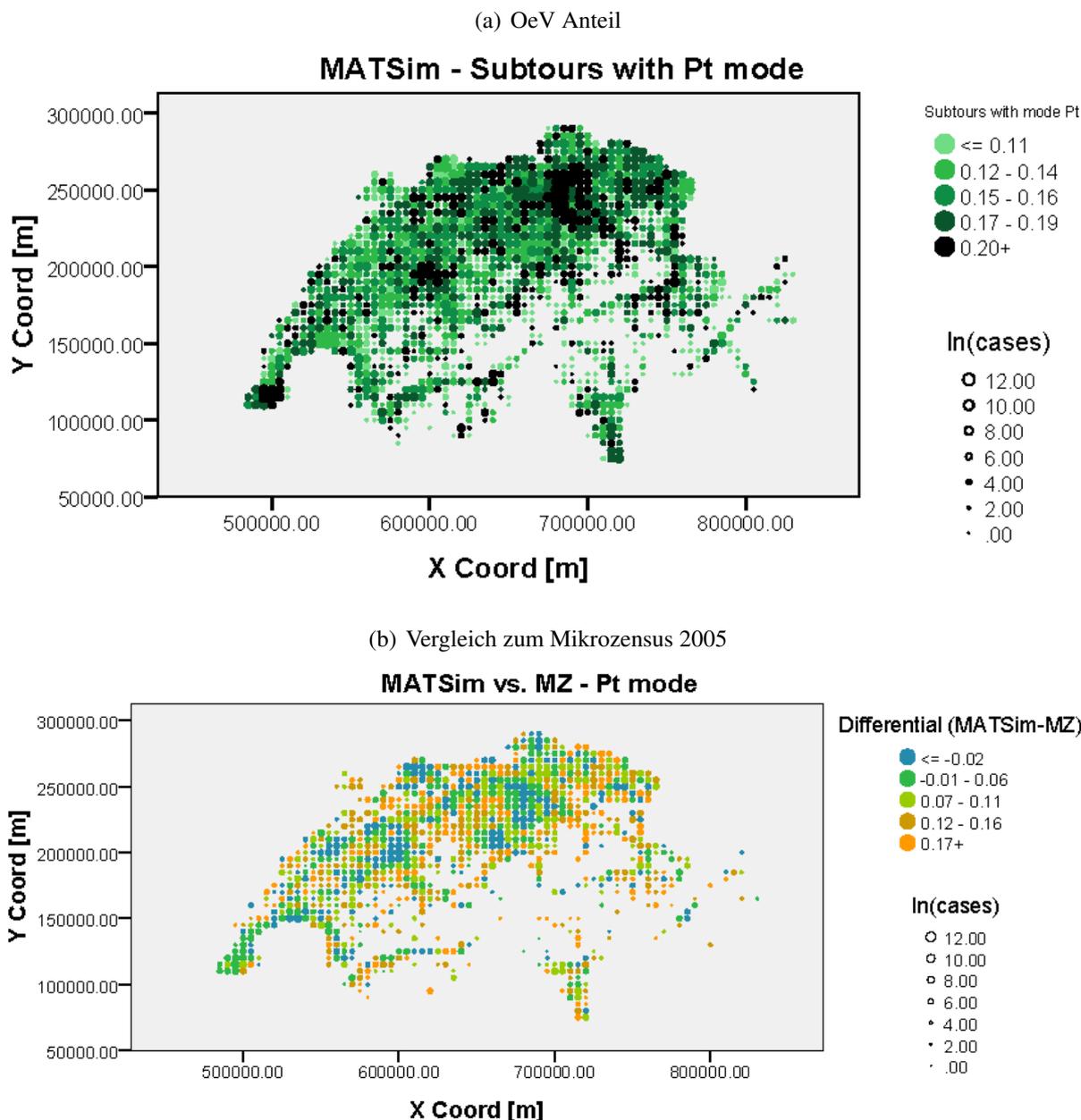


Aufgrund der begrenzten Ressourcen war es nicht möglich, alle Eingangs- und Validierungsdaten im Detail zu prüfen. Aus diesem Grund wurden hier die möglichen Ursachen exemplarisch dargestellt.

6.5 Räumliche Verteilung der Verkehrsmittelwahl

Die Resultate für die Verkehrsmittelwahl bei den motorisierten Verkehrsmitteln ist in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt. Grundsätzlich stimmen die üblichen räumlichen Muster: Der Anteil von pt ist in den städtischen Gebieten höher als in den ländlichen Gebieten. Umgekehrt

Abbildung 11: Räumliche Verteilung der Wahl der Verkehrsmittel auf Subtour Ebene: OeV



verhält es sich für den Anteil des Verkehrsmittels *car*. Besonders ausgeprägt ist dieser Unterschied in den Regionen Zürich, Bern, Genf und Basel. Die Vergleiche mit dem Mikrozensus zeigen ein überaus ähnliches Muster. Die Abweichungen sind äusserst gering und es sind kaum erkennbare strukturelle Fehler auszumachen (ausser vielleicht im Ansatz im französisch und italienisch sprechenden Teil der Schweiz).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die hier präsentierten Resultate überaus akkurat sind. Dies vor allem dann, wenn man zusätzlich in Betracht zieht, dass das hier verwendete Modell ein vollständig integriertes, mikroskopisches, komplett Zeit-dynamisches, Aktivitäten-basiertes

Verkehrsnachfrage- und Umlegungmodell ist, welches gleichzeitig Routen, Abfahrtszeiten und Dauern von Aktivitäten, Verkehrsmittel und Orte sekundärer Aktivitäten relaxiert.

7 Zusammenfassung

Die hier präsentierte Arbeit hat aufgezeigt, dass die Generierung von zeit-dynamischen, individualisierten Frequenzdaten in der Auflösung von Navigationsnetzen für die gesamte Schweiz technisch umgesetzt werden kann und — was noch wichtiger ist — die Qualität der Resultate akkurat und robust sind. Ein wichtiger Aspekt bei Verwendung von Mikrosimulationen ist die Korrektheit der Input-Daten, da diese Modelle typischerweise sensitiv auf Fehler in den Eingangsdaten reagieren. Hier liegt noch eindeutig Potential zur qualitativen Verbesserung der Frequenzen. Dieser Aspekt war nicht Teil des Projektes, jedoch liegt hier eine starke Fachkompetenz des Wirtschaftspartners. Es hat sich ausserdem gezeigt, dass der durch die Simulation entstandenen Mehrwert, Kunden des Wirtschaftspartners schon überzeugt hat. Das Projekt hat zudem schon jetzt drei neue Arbeitsplätze bei der Axon Active produziert, da durch den Mehrnutzen wiederum neue Ansprüche entstanden sind. Die wichtigsten davon sind (i) Mikromodellierung aller definierten Verkehrsmittel, im Speziellen für den öffentlichen Verkehr, (ii) Modellierung longitudinaler Mobilitätsmuster und (iii) Instanzierung eines operationellen Systems zur automatischen Frequenzgenerierung bei Inputdaten-Updates, sowie auch bei neuen Szenarien.

Zu guter Letzt ist die mikroskopische Mobilitätsmodellierung die Basis, auf dem verschiedenste Interessengruppen ihre Modelle und Analyse aufbauen können (Beispiele dafür sind Lärmdatenbank des BAFU, pandemische Modelle des UNS/NSSI, ETH Zürich, Standortplanung im Detail-/Einzelhandel, etc.).

8 Danksagung

Der Dank geht an die Förderagentur für Innovation KTI, im Speziellen an Barbara Schläfli, die Axon Active, resp. Mappuls und Datapuls AG und an Stefan Muff und Roman Oberli, die ETH Zürich, das Bundesamt für Statistik, das Bundesamt für Raumentwicklung und alle, die mit ihrem Fachwissen und Effort das Projekt vorangetrieben haben.

Literatur

- Arendt, M. und M. Vrtic (2006) Nationales Personenverkehrsmodell des Bundes als verkehrsplanerische Grundlage, in T. Bieger, C. Lässer und R. Maggi (Hg.) *Jahrbuch 2005/2006 Schweizerische Verkehrswirtschaft*, Schweizerische Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft (SVWG), St. Gallen.
- 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.
- ASTRA (2006) Bundesamt für Strassen, Webseite, <http://www.astra.admin.ch/>.
- Balmer, M., A. Horni, K. Meister, F. Ciari, D. Charypar und K. W. Axhausen (2009) Wirkungen der Westumfahrung Zürich: Eine Analyse mit einer Agenten-basierten Mikrosimulation, *Endbericht*, Baudirektion Kanton Zürich, IVT, ETH Zürich, Zürich, Februar 2009, <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab550.pdf>.
- Balmer, M., M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre, K. Nagel und K. W. Axhausen (2008) MATSim-T: Architektur und Rechenzeiten, Paper Präsentation *Heureka '08*, Stuttgart, März 2008.
- Bundesamt für Statistik (2001) *Eidgenössische Betriebszählung 2001 - Sektoren 2 und 3, GEO-STAT Datenbeschreibung*, Bundesamt für Statistik, GEOSTAT, Neuchâtel, <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/betriebszaehlung05.Document.111424.pdf>.
- Bundesamt für Statistik (2006) *Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten*, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- Cetin, N. (2005) Large-scale parallel graph-based simulations, Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- Charypar, D., M. Balmer und K. W. Axhausen (2009) A high-performance traffic flow microsimulation for large problems, Paper Präsentation *the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Januar 2009.
- Charypar, D. und K. Nagel (2005) Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms, *Transportation*, **32** (4) 369–397.
- Ciari, F., M. Balmer und K. W. Axhausen (2008) A new mode choice model for a multi-agent transport simulation, Paper Präsentation *the 8th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Oktober 2008.
- Fröhlich, P., M. Tschopp und K. W. Axhausen (2005) Netzmodelle und Erreichbarkeit in der Schweiz: 1950-2000, in K. W. Axhausen und L. Hurni (Hg.) *Zeitkarten Schweiz 1950 - 2000*,

- 29–40, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme and Institut für Kartografie, ETH Zürich, Zürich.
- Gao, S., M. Balmer und E. J. Miller (2010) Comparisons between MATSim and EMME/2 on the greater toronto and hamilton area network, Paper Präsentation *the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Januar 2010.
- Google Earth (2006) Google earth - explore, search and discover, Software, <http://earth.google.com>.
- Hackney, J. K. (2005) Speed of transit in Zurich, Paper Präsentation *the 5th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, März 2005, <https://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/index/edit/ab284.pdf>.
- Horni, A., D. M. Scott, M. Balmer und K. W. Axhausen (2009) Location choice modeling for shopping and leisure activities with MATSim: Combining micro-simulation and time geography, Paper Präsentation *the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Januar 2009.
- Kickhöfer, B. (2009) Die Methodik der ökonomischen Bewertung von Verkehrsmaßnahmen in Multiagentensimulationen, Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin, <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2009/09-10/DAKickhoefer19aug09.pdf>.
- KML (2008) Keyhole markup language - google code, Webseite, Dezember 2008, <http://code.google.com/apis/kml>.
- Lefebvre, N. und M. Balmer (2007) Fast shortest path computation in time-dependent traffic networks, Paper Präsentation *the 7th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, September 2007, http://www.strc.ch/conferences/2007/2007_lefebvre.pdf.
- MATSim-T (2008) Multi Agent Transportation Simulation Toolkit, Webseite, <http://www.matsim.org>.
- Meister, K. (2008) Erstellung von MATSim Facilities für das Schweiz-Szenario, *Arbeitsbericht, 541*, IVT, ETH Zürich, Zürich, Dezember 2008, <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab541.pdf>.
- Meister, K., M. Balmer, K. W. Axhausen und K. Nagel (2006) planomat: A comprehensive scheduler for a large-scale multi-agent transportation simulation, Paper Präsentation *the 11th International Conference on Travel Behaviour Research (IATBR)*, Kyoto, August 2006, <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab388.pdf>.
- Nagel, K. und M. Schreckenberg (1992) A cellular automaton for freeway traffic, *Journal de Physique I*, **2** (1992) 2221–2229.

- Raney, B. (2005) Learning framework for large-scale multi-agent simulations, Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- Raney, B. und K. Nagel (2004) Iterative route planning for large-scale modular transportation simulations, *Future Generation Computer Systems*, **20** (7) 1101–1118.
- 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.
- Rieser, M. (2008) Modal split under the influence of road pricing measures, Interner Vortrag, IVT, ETH Zürich, Zürich, Mai.
- Rieser, M., U. Beuck, M. Balmer und K. Nagel (2008) Modelling and simulation of a morning reaction to an evening toll, Paper Präsentation *Innovations in Travel Modeling (ITM'08)*, Portland, Juni 2008, <http://www.trb-forecasting.org/innovationsConference2008.html>.
- Rieser, M., U. Beuck, D. Grether, A. Chen, 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>.
- Simon, P. M., J. Esser und K. Nagel (1999) Simple queueing model applied to the city of Portland, *International Journal of Modern Physics C (IJMPC)*, **10** (5) 941–960.
- Tele Atlas MultiNet (2010) MultiNet: The most powerful map database ever built, Webseite, Januar 2010, <http://www.teleatlas.com/OurProducts/MapData/Multinet/index.htm>.
- Vickrey, W. S. (1969) Congestion theory and transport investment, *The American Economic Review*, **59** (2) 251–260.
- Vrtic, M. und K. W. Axhausen (2003) Experiment mit einem dynamischen Umlegungsverfahren, *Straßenverkehrstechnik*, **47** (3) 121–126.
- Vrtic, M., P. Fröhlich, N. Schüssler, S. Dasen, S. Erne, B. Singer, K. W. Axhausen und D. Lohse (2005) Erstellung des nationalen Personenverkehrsmodells für den öffentlichen und privaten Verkehr, *Forschungsbericht*, Bundesamt für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Raumentwicklung, Bundesamt für Strassen und Bundesamt für Verkehr, IVT, ETH Zürich, Emch und Berger and Institut für Verkehrsplanung und Strassenverkehr, Technische Universität Dresden, Zürich.

Waraich, R. A., D. Charypar, M. Balmer und K. W. Axhausen (2009) Performance improvements for large scale traffic simulation in matsim, *Arbeitsbericht*, **565**, IVT, ETH Zürich, Zürich, August 2009, <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab565.pdf>.

Wiedemann, R. (1974) Simulation des Verkehrsflusses, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

A Weiterentwickelte Nutzenfunktion

Der Nutzen U_{plan} eines Aktivitätenplans $plan$ beträgt

$$U_{plan} = \sum_{i=1}^n (U_{act,i} + U_{travel,i}) \quad (1)$$

mit Anzahl Aktivitäten n , dem generalisierten Nutzen des Ausführens der Aktivität i (siehe Abschnitt A.1) als $U_{act,i}$ und dem generalisierten Nutzen der Reise von Aktivität $i - 1$ zu Aktivität i (siehe Abschnitt A.2) als $U_{travel,i}$.

A.1 Ausführen einer Aktivität

Der generalisierte Nutzen des Ausführens der Aktivität i , $U_{act,i}$ beträgt

$$U_{act,i} = (U_{cum,j} - U_{cum,j-1}) \cdot f_p + U_{wait,i} + U_{short,i} \quad (2)$$

mit f_p gleich dem Nutzen-beeinflussendem Faktor zur Berücksichtigung des Füllungsgrades einer Aktivitätengelegenheit, $U_{wait,i}$ gleich dem generalisierten Nutzen der Wartezeit in Aktivität i , $U_{short,i}$ gleich dem generalisierter Nutzen des zu kurzen Ausführens von Aktivität i und $U_{cum,j}$ gleich dem kumulierten, generalisierten Nutzen aller Aktivitäten vom gleichen Typ wie Aktivität i , bis zur j ten Aktivität in zeitlicher Reihenfolge, wobei

$$U_{cum,j} = \begin{cases} \max \left(0, \beta_{perf} \cdot t^* \cdot \ln \left(\frac{\sum_{k=1}^j t_{perf,k}}{t_0} \right) \right) & j > 0 \\ 0 & j = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ist. β_{perf} definiert den Grenznutzen einer zusätzlichen Zeiteinheit zum Ausführen einer Aktivität und t^* ist der gewünschter Anteil dem für Aktivitäten gesamthaft zur Verfügung stehenden Zeitbudget, der in Aktivitäten des gleichen Typs wie von Aktivität act verbraucht werden soll. Des Weiteren definiert $t_{perf,k}$ in der k ten Instanz aller Aktivitäten vom gleichen Typ wie Aktivität act verbrachte Zeit und t_0 die Nullstelle der logarithmischen Funktion. Diese Nutzenfunktion baut auf einer ähnlichen, grenznutzenbasierten Funktion für tägliche Aktivitätenpläne auf (Charypar und Nagel, 2005).

Bei Aktivitäten der Typen *shop* und *leisure* beeinflusst der Füllungsgrad der Aktivitätengelegenheit den Nutzen des Ausführens einer Aktivität (für Details siehe Horni *et al.*, 2009).

$$f_p = \begin{cases} \min \left(\beta_{load,1} \cdot \left(\frac{load}{capacity} \right)^{\beta_{load,2}}, 0.5 \right) & , \text{ if activity type } \in \{shop, leisure\} \\ 1.0 & \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

mit

$\beta_{load,1}$ Skalierungsfaktor der Widerstandsfunktion [dimensionslos]

$\beta_{load,2}$ Skalierungsfaktor der Widerstandsfunktion [-]

$load$ mittlere Belegung der Aktivitätenelegenheit [Anzahl Agenten, die die gleiche Aktivität ausführen]

$capacity$ Fassungsvermögen der Aktivitätenelegenheit [Anzahl Agenten, die die gleiche Aktivität ausführen]

Zwei direkte Bestrafungen bezüglich in unerwünschter Art und Weise verbrachter Zeit werden angewandt. Wartezeit entsteht wenn der Agent geplant hat eine Aktivität auszuführen, die entsprechende Aktivitätenelegenheit aber nicht geöffnet ist (z.B. Warten an einem Shop). Der generalisierte Nutzen der Wartezeit von Aktivität i , $U_{wait,i}$ beträgt $U_{wait,i} = \beta_{wait} \cdot t_{wait}$, mit β_{wait} als Grenznutzen einer zusätzlichen Zeiteinheit, die mit Warten verbracht wird und t_{wait} als Wartezeit.

Die Bestrafung für zu kurze Aktivitätendauer von Aktivität i beträgt $U_{short,i} = \beta_{short} \cdot \max(0, (0.5h - t_{perf,i}))$ mit β_{short} als Grenznutzen einer zusätzlichen Zeiteinheit, die zur Mindestaktivitätendauer fehlt und $t_{perf,i}$ als verbrachte Zeit in Aktivität i (Details siehe Charypar und Nagel, 2005).

A.2 Reisen

Der generalisierte Nutzen der Reise von Aktivität $i - 1$ zu Aktivität i mit Verkehrsmittel $mode$, $U_{travel,i,mode}$ beträgt

$$\begin{aligned}
 U_{travel,i,car} &= const_{car} && + \beta_{tt,car} \cdot t_{car} && + \beta_{cost,car} \cdot c_{car} \\
 U_{travel,i,pt} &= \beta_{tt,walk} \cdot (t_{access} + t_{egress}) && + \beta_{tt,pt} \cdot t_{pt} && + \beta_{cost,pt} \cdot c_{pt} \\
 U_{travel,i,bike} &= const_{bike} && + \beta_{tt,bike} \cdot t_{bike} && \\
 U_{travel,i,walk} &= && \beta_{tt,walk} \cdot t_{walk} &&
 \end{aligned} \tag{5}$$

mit

$\beta_{tt,mode}$ Generalisierter Grenznutzen einer zusätzlichen Zeiteinheit die der Agent mit Reisen mit Verkehrsmittel $mode$ verbringt,

$\beta_{cost,mode}$ Generalisierter Grenznutzen einer zusätzlichen Geldeinheit die der Agent für das Reisen mit Verkehrsmittel $mode$ ausgibt,

t_{mode} Reisezeit mit Verkehrsmittel $mode$ (in-vehicle travel time),

c_{mode} Monetäre Ausgaben bei der Reise mit Verkehrsmittel $mode$,

$t_{access,pt}$ Zugangszeit von Aktivität $i - 1$ zur ihr nächstgelegenen OeV-Haltestelle,

$t_{egress,pt}$ Abgangszeit zu Aktivität i zur ihr nächstgelegenen OeV-Haltestelle und

$const_{mode}$ alternativenspezifische Konstanten für Zu- und Abgang zu Verkehrsmitteln car und $bike$.

Die monetären Kosten c_{car} des Verkehrsmittels car betragen $c_{car} = c_{km,car} \cdot d_{car}$, wobei $c_{km,car}$ die Kosten pro Kilometer Reise mit Verkehrsmittel car sind und d_{car} die Wegdistanz (Summe der Länge aller Strassenabschnitte der Wegroute) ist. Die monetären Kosten des Verkehrsmittels pt , c_{pt} betragen

$$c_{pt} = \begin{cases} d_{pt} \cdot c_{km,pt} & \text{ohne Zeitkarte} \\ d_{pt} \cdot c_{km,pt,travelcard} & \text{mit Zeitkarte} \end{cases}$$

mit $c_{km,pt}$ gleich den Kosten pro Kilometer Reise mit Verkehrsmittel pt ohne Zeitkarte, $c_{km,pt,travelcard}$ gleich den Kosten pro Kilometer Reise mit Verkehrsmittel pt mit Zeitkarte eines unbestimmten Typs und d_{pt} gleich der Wegdistanz. Diese entspricht der Luftliniendistanz zwischen den beiden den Aktivitäten nächstgelegenen OeV-Haltestellen, multipliziert mit 1.5.

Die Reisezeiten mit dem Verkehrsmittel pt , t_{pt} entsprechen den durchschnittlichen Reisezeiten von Gemeinde zu Gemeinde aus dem Nationalen Personenverkehrsmodell (Arendt und Vrtic, 2006). Liegen Start- und Zielhaltestelle in der gleichen Gemeinde, wird die Luftliniendistanz mit einer mittleren Geschwindigkeit von $v_{pt} = 15.7 km/h$ zurückgelegt. Dieser Wert ergibt sich wie folgt:

- Geschwindigkeitsmessungen des öffentlichen Verkehrs im Kanton Zürich ergeben eine Durchschnittsgeschwindigkeit für den gesamten Weg von 11.6 km/h, für die Durchschnittsgeschwindigkeit öffentlicher Verkehrsmittel 19.8 km/h (Hackney, 2005).
- Da Zu- und Abgang explizit modelliert sind (t_{access} und t_{egress}), beinhaltet die Reisezeit t_{pt} die Wartezeit, eventuelle Umsteigevorgänge sowie die tatsächliche Fortbewegung im öffentlichen Verkehrsmittel mit der erhobenen Reisegeschwindigkeit. Daher wird die Geschwindigkeit v_{pt} näherungsweise als Mittel der beiden berichteten Geschwindigkeiten angenommen. Ähnlich wurde bei Schweizer Erreichbarkeitsstudien vorgegangen. (Fröhlich *et al.*, 2005).

Die Details dieser multimodalen Nutzenfunktion sind in Kickhöfer (2009, sec. 5) beschrieben.

Tabelle 2: Werte der Parameter der Nutzenfunktion.

Die mit einem * oder ** gekennzeichneten Werte wurden neu für dieses Projekt hergeleitet.

Parameter	Einheit	Wert	Quelle
β_{perf}	[1/h]	2.26	Kickhöfer (2009)
$\beta_{load,1}$	[1]	0.13	Horni <i>et al.</i> (2009)
$\beta_{load,2}$	[1]	5.0	Horni <i>et al.</i> (2009)
β_{wait}	[1/h]	0.0	Charypar und Nagel (2005)
β_{short}	[1/h]	-180.0	*
$\beta_{tt,car}$	[1/h]	0.0	Kickhöfer (2009)
$\beta_{tt,pt}$	[1/h]	-2.0	**
$\beta_{tt,bike}$	[1/h]	-16.0	**
$\beta_{tt,walk}$	[1/h]	0.0	**
$\beta_{cost,car}$	[1/CHF]	0.0	**
$\beta_{cost,pt}$	[1/CHF]	-0.8	**
$\beta_{cost,walk}$	[1/CHF]	-0.1	**
$t_{access,car,bike}$	[h]	5/60	*
$t_{egress,car,bike}$	[h]	5/60	*
$const_{car}$	[1]	-0.48	*
$const_{bike}$	[1]	-0.48	*
$d_{bike,walk}$	[km]	1.0	*
$c_{km,car}$	[CHF/km]	0.12	Kickhöfer (2009)
$c_{km,pt}$	[CHF/km]	0.28	Kickhöfer (2009)
$c_{km,pt,travelcard}$	[CHF/km]	0.14	Kickhöfer (2009)
v_{walk}	[km/h]	2.8	eigene Annahme
v_{bike}	[km/h]	14.0	eigene Annahme
v_{pt}	[km/h]	15.7	basierend auf Hackney (2005)

A.3 Parameterwerte

Die Werte für die Parameter der Nutzenfunktion sind in Tabelle 2 dargestellt. Mit ** gekennzeichneten Werte sind die Resultate aus der Versuchsplanung. Die Werte für die zusätzlichen, mit * markierten Parameter wurden wie folgt hergeleitet:

β_{short} Um zu verhindern dass bei zwei oder mehr Aktivitäten des gleichen Typs die komplette zur Verfügung stehende Zeit auf eine der Instanzen gelagert wird, bzw. eine oder mehrere Instanzen eine Aktivitätendauer gegen 0s bekommt, wird die zu kurze Ausführung einer Aktivität mit einem sehr hohen Wert bestraft. Könnte der Agent beliebig Instanzen eines Aktivitätentyps hinzufügen oder aus dem Plan entfernen, anstatt sie zu kurz auszuführen, wäre dieser Parameter nicht notwendig. In diesem Projekt wurden die Aktivitätenketten als gegeben und somit fix simuliert.

$t_{access,car,bike}, t_{egress,car,bike}$ Angenommene Zu- bzw. Abgangszeit pro Weg bei den Verkehrs-

mittelalternativen *bike* und *car*.

$const_{car}$, $const_{bike}$ Diese Konstanten repräsentieren die Opportunitätskosten der Zu- und Abgangszeit pro Weg bei den Verkehrsmittelalternativen *bike* und *car*. Er ist also abhängig von β_{perf} .

$$const_{bike} = const_{car} = (\beta_{tt,walk} - \beta_{perf}) \cdot (t_{access,car,bike} + t_{egress,car,bike})$$

Für den mode *walk* gibt es keine solche Konstante. Beim mode *pt* sind Zu- und Abgang zu den nächstgelegenen Haltestellen explizit schon Teil der Route.

$d_{bike,walk}$ Distanz, bei der die generalisierten Kosten eines Weges für die Modi *bike* und *walk* gleich sind.