Nutzung von Mobilfunkdaten für Verkehrsplanungszwecke

DVWG Vortrag, Universität Wuppertal, SVPT, 19.11.2015

Prof. Dr.-Ing. Martin FELLENDORF

Technische Universität Graz
Institut für Straßen- u. Verkehrswesen
Rechbauerstraße 12/II
A-8010 Graz
Email: martin.fellendorf@tugraz.at
birgit.kohla@tugraz.at
http://www.isv.tugraz.at/

▶ www.isv.tugraz.at

Mobilfunkdaten für die Verkehrsplanung

Definitionen u. Grundannahmen

- Verkehr entsteht durch Raumnutzung
- Verkehrsplanung sorgt für eine zweckmäßige Raumerschließung

▪ Aufgabe der Verkehrsplanung ist die zielorientierte Vorbereitung von Maßnahmen zur Beeinflussung des Verkehrs, unter Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage und der Anforderungen aller betroffenen Gruppen (Nutzer, Betreiber, Allgemeinheit).

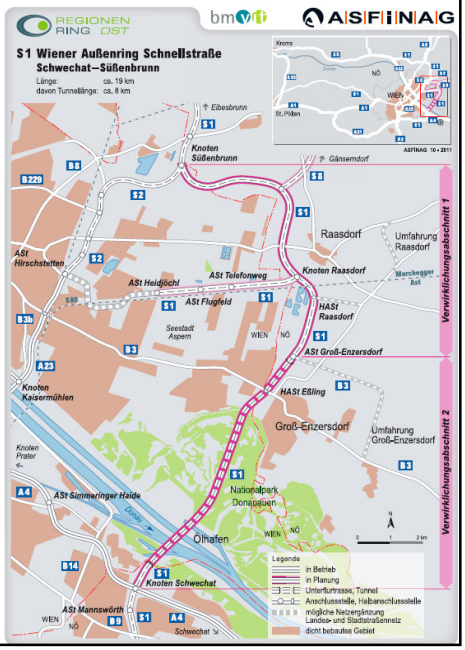
→ **Verkehrsplanung benötigt quantitative Grundlagen zur Beurteilung von Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage**

- Beispiele quantitativer Grundlagen mittels Verkehrsmodellen

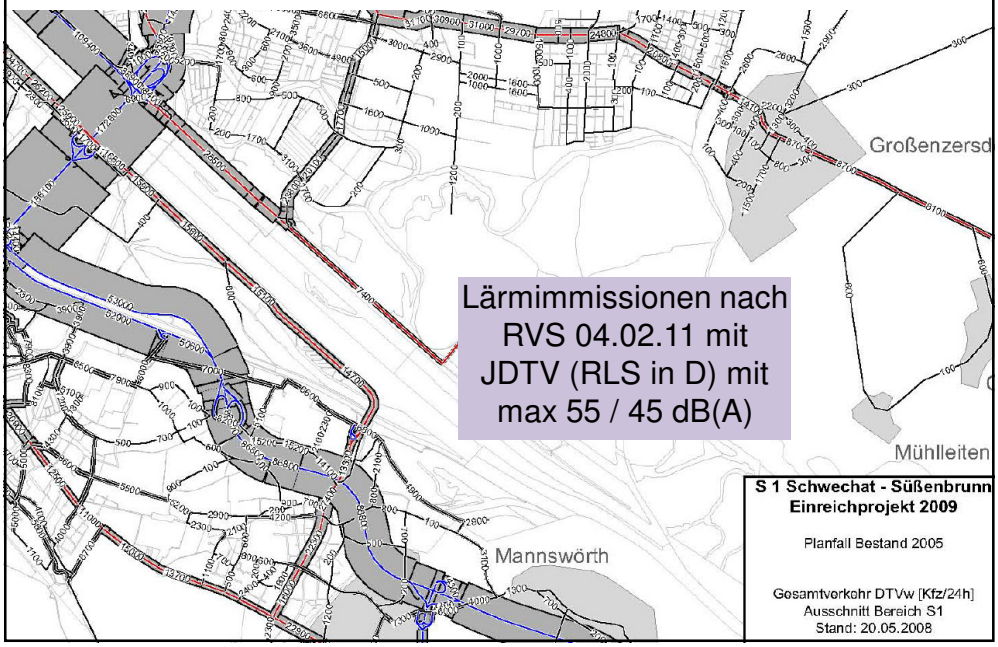
Bsp 1: Verkehrsentwicklungspläne

Bsp 2: Umweltverträglichkeitsprüfung

- laut Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung D: UVPG, 1990 i.d.F. 2010, AT: UVP-G, 2000
- *Maßnahmen prüfen, durch die schädliche, belästigende oder belastende Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt verhindert werden*
- Bsp: S1 Wiener Aussenring 19 km davon 6 km Tunnel, 1,7 Mrd€, Bau 2016-25 DTVw bis 60.000 Kfz/24h



Bsp 2: UVP Verkehrsbelast. für Lärmberechnung



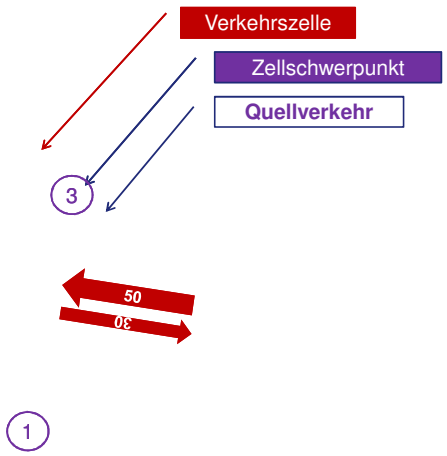
Lärmimmissionen nach RVS 04.02.11 mit JDTV (RLS in D) mit max 55 / 45 dB(A)

Verkehrsnachfrageberechnung

- ein ganz wichtiger Teil quantitativer Verkehrsplanung
- Zustandsbewertung, Prognose und Bewertung 340 von 815 Seiten

Räumliche Aggregation

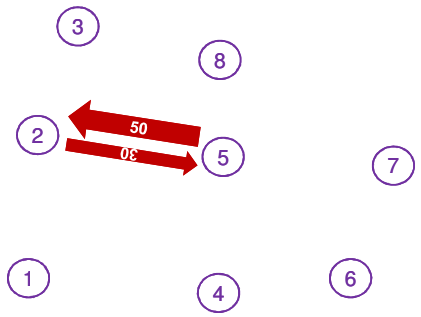
- Verkehrsteilnehmer werden räumlich aggregiert zu Verkehrszellen
- Verkehrszellen nach natürlichen u. statistischen Grenzen (pol. Bezirke, Wahlbezirke, ….)



Räumliche Aggregation

- Fahrten idealisiert zwischen Zellschwerpunkten
- Fahrten in einer Matrix mit Quell- u. Zielzellen in Fahrten/24h; Fahrten/4h; Fahrten/h

	1	**2**	3	4	**5**	6	7	8
1								
2					**30**			
3								
4								
5		**50**						
6								
7								
8								



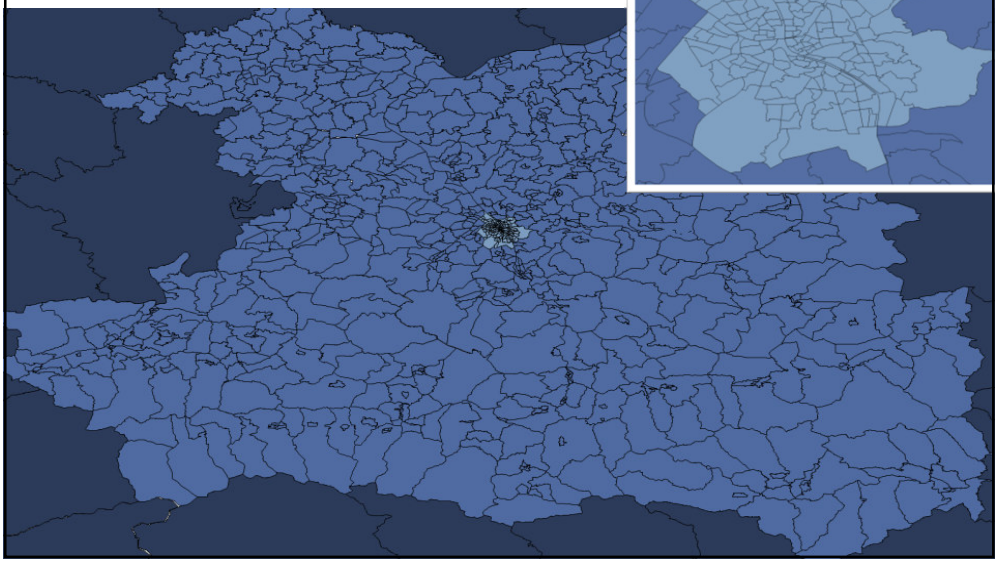
Quelle-Ziel Matrix

- Viele Begriffe für ähnlichen Sachverhalt

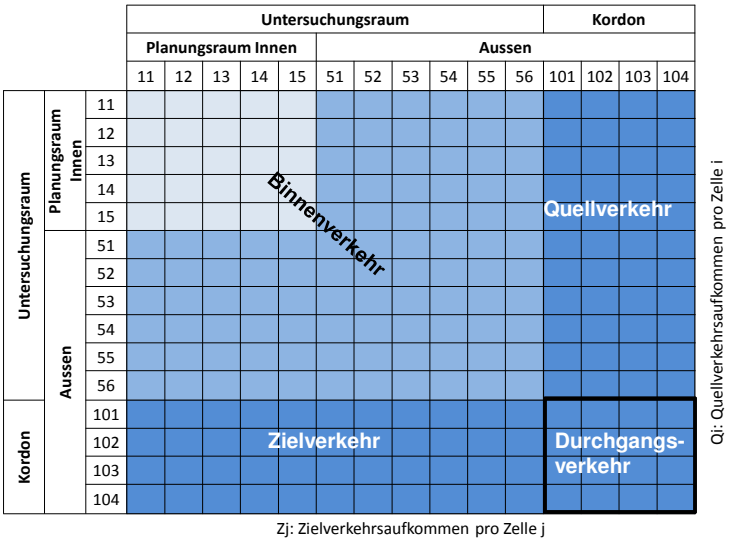
Nachfragematrix	**Travel Demand Matrix**
Quelle-Ziel Matrix QZ	**Origin Destination Matrix** OD
Fahrtenmatrix F_{ij}	**Trip Matrix** T_{ij}
Verkehrsmittelspezifische Fahrtenmatrix $F_{ij}^{Pkw}, F_{ij}^{Lkw}, F_{ij}^{ÖV}, F_{ij}^{Fuss}$	**Mode specific Trip Matrix** $T_{ij}^{car}, T_{ij}^{transit}$

Verkehrszelleneinteilung

- Planungsraum, Untersuchungsraum, Rest



Verkehrsarten der Nachfragematrix



Gewinnung der F_{ij}-Werte – aber wie?

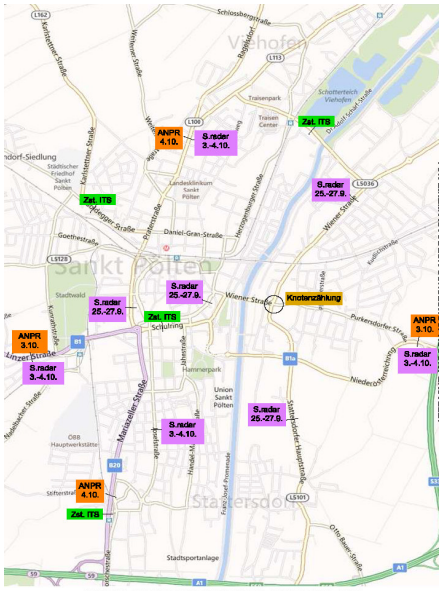
- Binnenmatrix durch Verkehrsnachfragemodell, z.B.

$$F_{ij} = F \cdot \frac{P_i \cdot A_j \cdot f(w_{ij})}{\sum_{i,j} \left(P_i \cdot A_j \cdot f(w_{ij})\right)} \qquad F_{ij} = f \cdot \frac{\left(Q_i \cdot Z_j\right)^{\beta}}{(w_{ij})^{\alpha}}$$

- Quelle-,Ziel-, Durchgangsverkehr durch Kordonbefragung

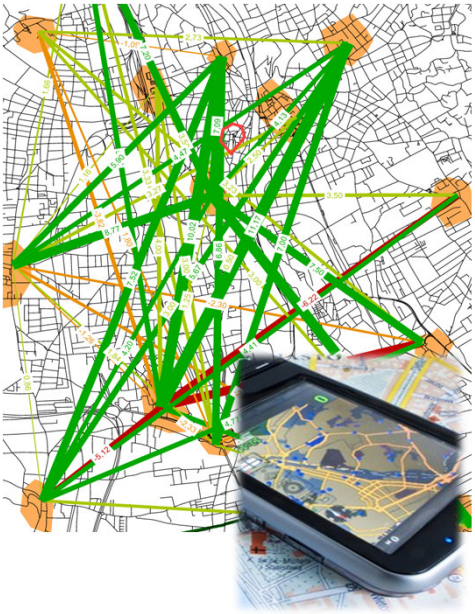
Gewinnung der F_{ij}-Werte – aber wie?

- Neuere Technologie ANPR (Kennzeichenerfassung)



F_{ij} –Werte mittels Mobilfunkdaten - Gliederung

- Datengrundlage
- Dateninhalte
- Datenschutz / Anonymisierung
- Matchen Mobilfunkzelle auf Verkehrszelle
- Matchen auf Schiene und Straße
- Anwendungen für Verkehrsnachfrage in NÖ
- Anwendungen bei Großveranstaltungen



Verwendete Daten

- an der TU Graz seit Ende 2012 mit Unterbrechungen
- A1 Mobile Traffic Data Stream A1MTDS
  spezieller Datenstrom mit anonymisierten Daten
- 50 – 70 GB Daten pro Tag eingehend
- gespeichert auf einem Hadoop System an TU/Know Center
- Jede ID → mehrere Events pro Tag → ca. 500.000.000 Events pro Tag (2G und 3G-Technologie)

Acronyms der Telekommunikation

- LTE: seit 2012 4. Mobilfunkgeneration Long Term Evolution
- UMTS seit 1999 3. Mobilfunkgeneration
  Universal Mobile Telecommunications System u.
  seit 2006 mit High-Speed-Downlink Packet Access (HSPDA)
- EDGE seit 2003 2.5 Mobilfunkgeneration mit
  Enhanced Data rates for GSM Evolution
- GSM: seit 1991 2. Mobilfunkgeneration (digital statt analog)
  System for Mobile Communications

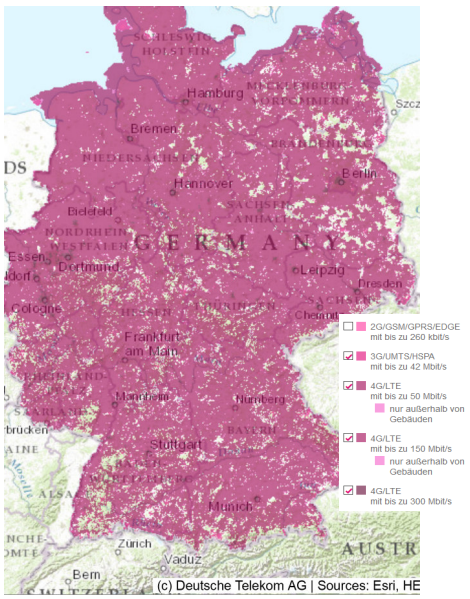
Mobilfunkmarkt in Österreich

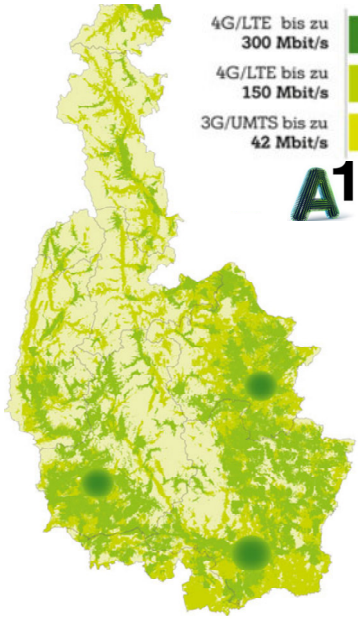
- hart umkämpft, Marktsättigung (156% SIM-Karten pro EW) 9,2 Mio Verträge + 4.1 Prepaid-SIM´s (bei 8,7 Mio EW)
- trotz Topographie sehr gute Netzabdeckung

	A1 Telekom Austria	Deutsche Telekom	Hutchison Drei
Frequenz	**A1, YESSS!, bob,**	T-Mobile, HoferTelkom, VOLmobil, tele.ring	Drei, UPC mobile,
Marktanteil (1.Q/2015)	**40,5%**	29,8%	28,1%
800 MHz	LTE (150 MBit/s)	LTE (75 MBit/s)	
900 MHz	GSM (236 KBit/s)	GSM (236 KBit/s)	
1800 MHz	GSM	LTE (75 MBit/s)	LTE (150 MBit/s)
2100 MHz	UMTS (42 MBit/s)	UMTS (42 MBit/s)	UMTS (42 MBit/s)
2600 MHz	LTE (150 MBit/s)	LTE (150 MBit/s)	LTE (150 MBit/s)
800/2600 MHz	LTE (300 MBit/s)		

Datengrundlage: RTR, Rundfunk & Telekom Regulierungs GmbH, Okt 2015

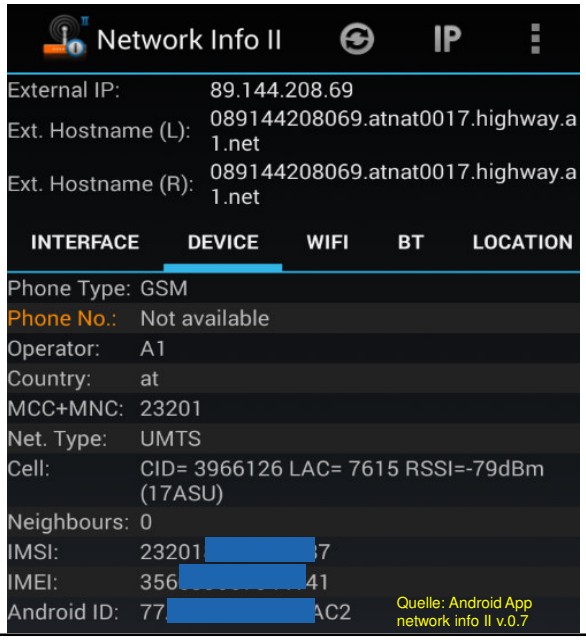
in Österreich LTE 150/300 MBit/s stark





Was könnte gespeichert werden

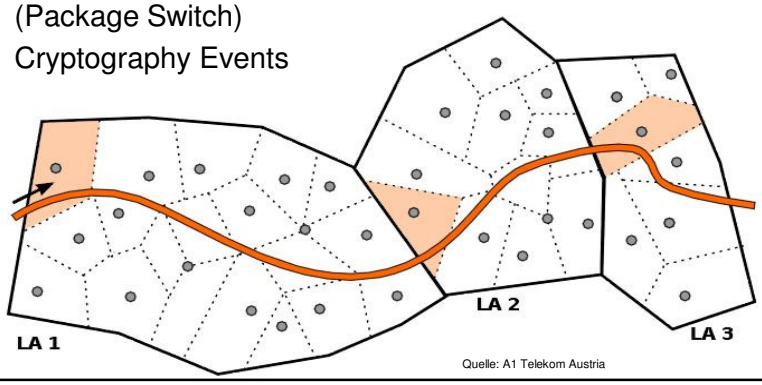
- A1 speichert für mehrere Wochen Rohdaten (CDRs) und Verrechnungsdaten (TDR)
- Keine Standort-information (GPS) sondern angemeldete Antenne
- Antenneninformation abrufbar opencellid.org
- Für Verbrechens-bekämpfung greift Polizei auf andere Datenquellen zu



Quelle: Android App network info II v.0.7

A1 Mobile Traffic Data Stream A1MTDS

- Eventtypen nur 2G/3G
  - Mobile Orginating Call
  - Mobile Terminating Call
  - Short Message Service
  - Location Update
  - Handover Cell Update
  - (Package Switch)
  - Cryptography Events
- Bisher nicht
  - LTE (4G)
  - Roaming Information
  - (Package Switch)



Quelle: A1 Telekom Austria

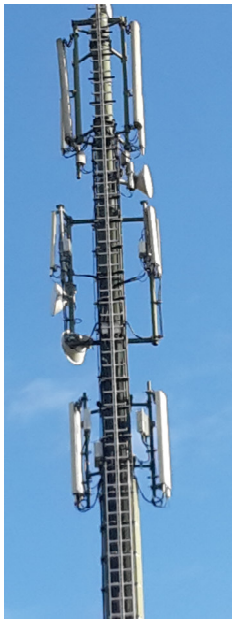
Dürfen die Daten verwendet werden?

- TGK Telekommunikationsgesetz untersagt Datenverwendung
- Zwei Varianten für Zulässigkeit .....

wurde von Schweighofer, Hötzendorfer, Universität Wien im KIRAS-Projekt AGETOR untersucht. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse wird erst im Jahr 2016 erfolgen

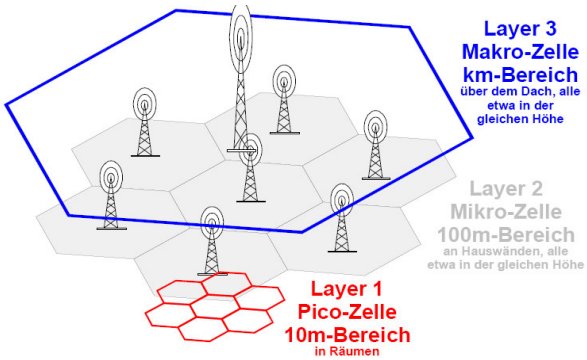
Mobilfunknetz: BTS Basisstationen

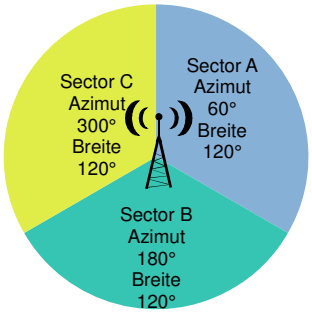
- BTS Basisstationen Sendeleistung bis zu 35 km aber
- begrenzte Anzahl gleichzeitig angemeldeter SIM-Karten
  - in Innenstädten nur einige 100m
  - in Wohngebieten ca 3-5 km
  - ländliche Gebiete ca 15 km; Sendeleistung 1-2 W des Endgeräts begrenzt Abstand zwischen BTS
- In Österreich 20.089 Antennen auf Masten u. Dächern + 9.327 auf gemeinsam genutzt Infrastruktur (2014, Statista)



Multilayer - Netzstruktur

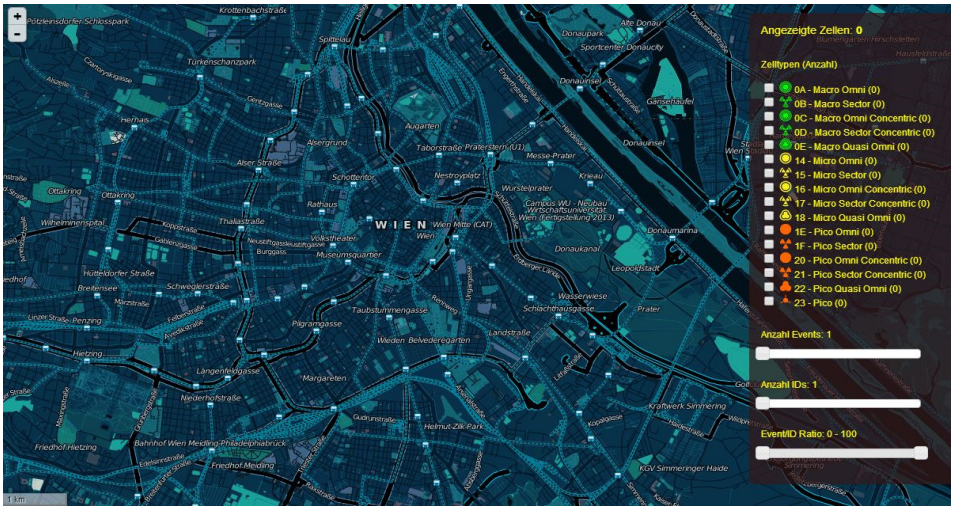
- Pico-Zellen Sendebereich 10-150m
- Micro-Zellen Sendebereich 100m – 1km
- Macro-Zellen Sendebereich 1km – 15km



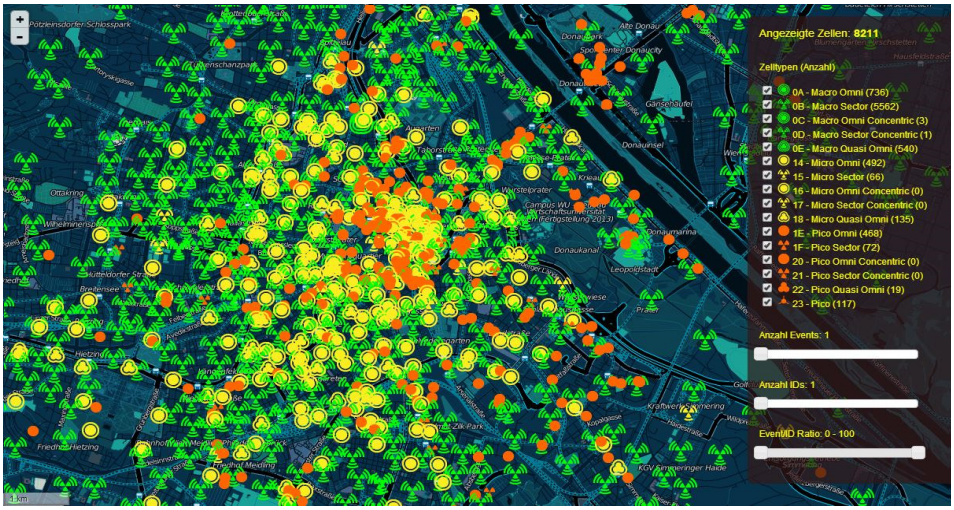


Quelle: Poel, Telekommuikation, 2007

Antennenstandorte in Wien



Antennenstandorte in Wien

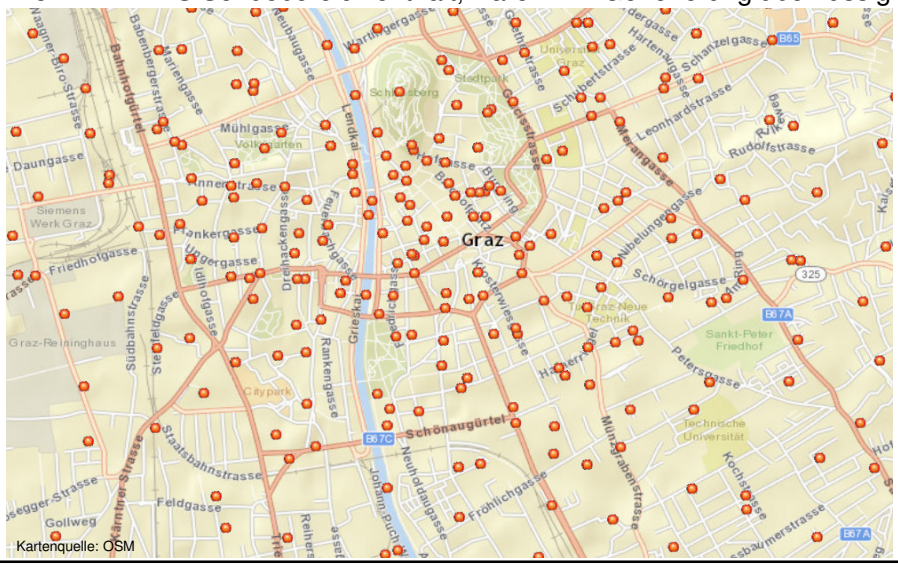


Systemskizze Mobilfunkdatenauswertung

Datenaufbereitung & Filterung	**Aufbereitung A1MTDS** **Filterung Mobilfunkantennen-Standorte** • Sektorantennen • Rundstrahler
Generierung Mobilfunkzellen (MFZ)	**Verfahren** • Delauny-Triangulation • Voronoi-Tessellation
Ermittlung MFZ-Übergänge	**Anwendung QZ-Tool** • Zellübergänge zwischen Mobilfunkzellen (ID, Quelle, Ziel, Event, Zeit)
ID-Einzelanalyse	• Filterung der Zellübergänge nach ID • Definition min. Aufenthaltsdauer & max. Reisezeit • Generierung korrigierter Zellübergänge nach ID • QZ-Matrix der Mobilfunkzellen
Verschneidung MFZ & Verkehrszelle (VZ)	• Berechnung Flächenanteil VZ an MFZ • Ermittlung mobilfunkbasierte QZ-Matrix der VZ
Statistische Analyse	Vergleich: verkehrsbasierte vs. mobilfunkbasierte QZ-Matrix

Generierung Mobilfunkzellen (MFZ)

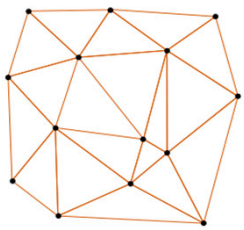
- Antennenstandorte in Graz
- Wenn A1MTDS Sendebereich enthält, wäre MFZ-Generierung überflüssig



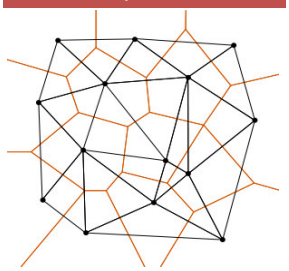
Nachbildung von Mobilfunkzellen (MFZ)

- Delauny-Triangulation & Voronoi-Tessellation
- Koordinaten der Masten bzw. Keulen
- Delaunay-Triangulation
  - Erstellung Dreiecksnetz
  - Umkreisbedingung
- Umkreismittelpunkte aller Dreiecke zwischen angrenzenden Dreiecke verbinden → Kanten der Voronoi Polygone

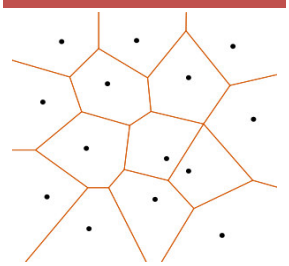
Delauny-Triangulation



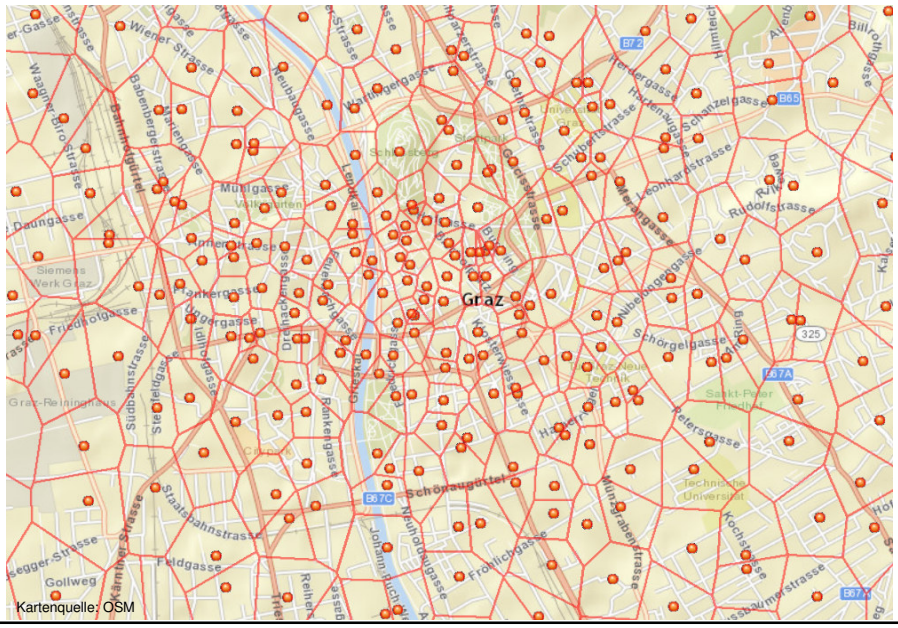
Delauny & Voronoi



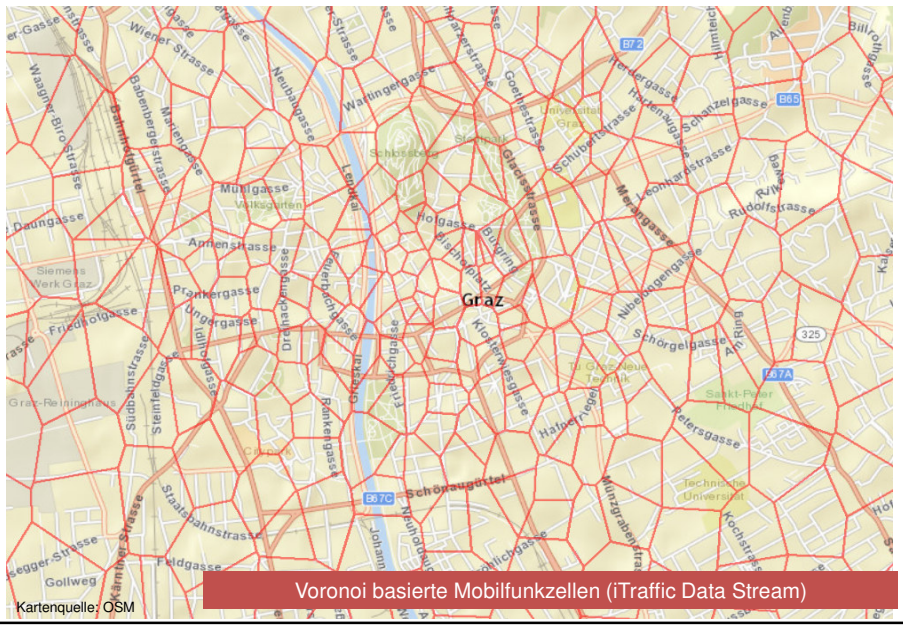
Voronoi Tesselation



Generierung Voronoi-Zellen



Generierung Voronoi-Zellen



Voronoi basierte Mobilfunkzellen (iTraffic Data Stream)

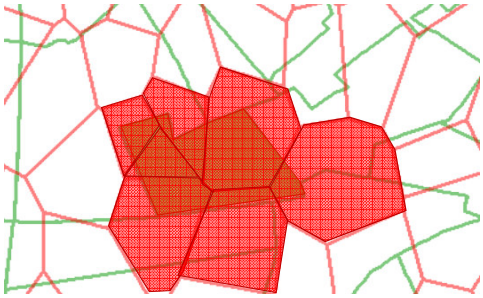
Systemskizze Mobilfunkdatenauswertung

Datenaufbereitung & Filterung	**Aufbereitung A1MTDS** **Filterung Mobilfunkantennen-Standorte** • Sektorantennen • Rundstrahler
Generierung Mobilfunkzellen (MFZ)	**Verfahren** • Delauny-Triangulation • Voronoi-Tessellation
Ermittlung MFZ-Übergänge	**Anwendung QZ-Tool** • Zellübergänge zwischen Mobilfunkzellen (ID, Quelle, Ziel, Event, Zeit)
ID-Einzelanalyse	• Filterung der Zellübergänge nach ID • Definition min. Aufenthaltsdauer & max. Reisezeit • Generierung korrigierter Zellübergänge nach ID • QZ-Matrix der Mobilfunkzellen
Verschneidung MFZ & Verkehrszelle (VZ)	• Berechnung Flächenanteil VZ an MFZ • Ermittlung mobilfunkbasierte QZ-Matrix der VZ
Statistische Analyse	Vergleich: verkehrsbasierte vs. mobilfunkbasierte QZ-Matrix

Verschneidung Mobilfunk- & Verkehrszelle

- Berechnung des prozentuellen Flächenanteils einer VZ an einer MFZ

$$A_B \cap A_Z = \begin{bmatrix} A_{B_1} \cap \begin{pmatrix} A_{Z_1} \\ \vdots \\ A_{Z_j} \end{pmatrix} \\ \vdots \\ A_{B_i} \cap \begin{pmatrix} A_{Z_1} \\ \vdots \\ A_{Z_j} \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$



A_B ... Fläche des Verkehrsbezirks in p[%]

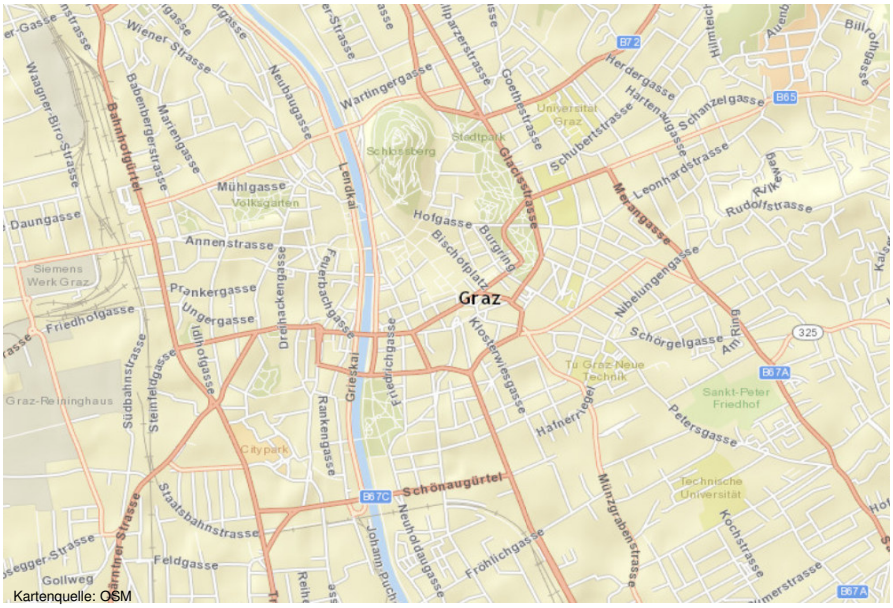
A_Z ... Fläche der Mobilfunkzelle in p[%]

Bezirke $i = 1\ bis\ n$

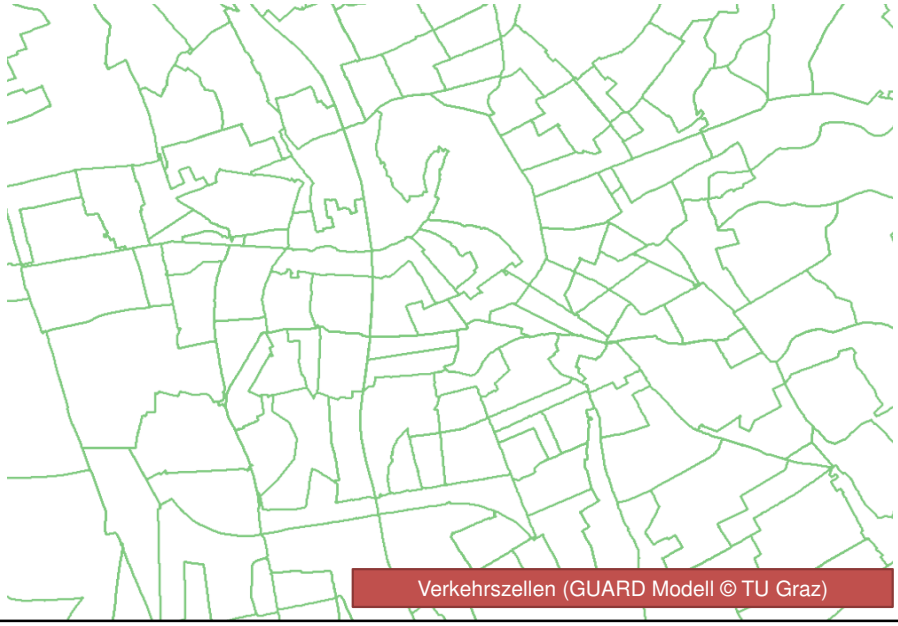
Zellen $j = 1\ bis\ m$

$m, n\ \in N$

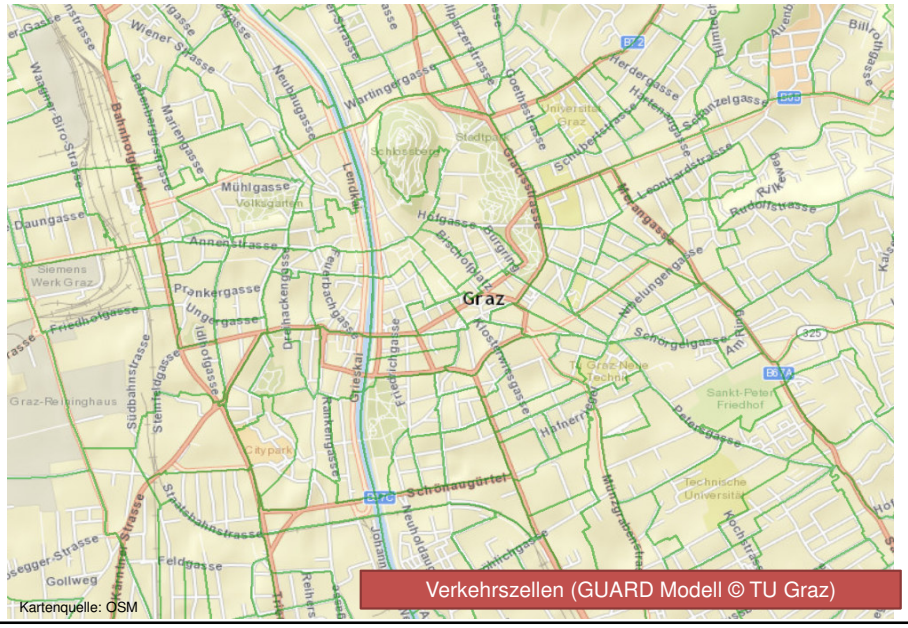
Verschneidung Mobilfunk- & Verkehrszelle



Verschneidung Mobilfunk- & Verkehrszelle

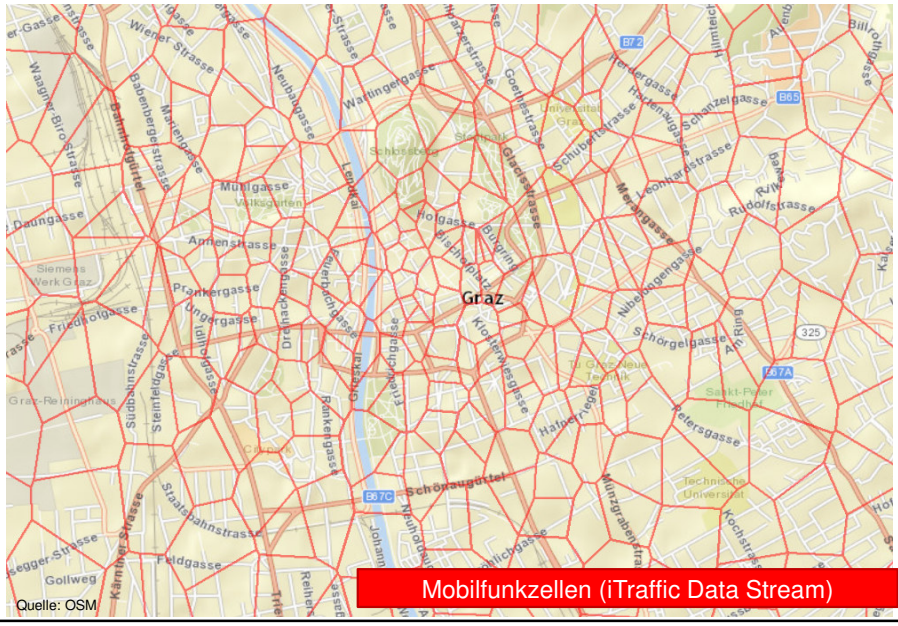


Verschneidung Mobilfunk- & Verkehrszelle



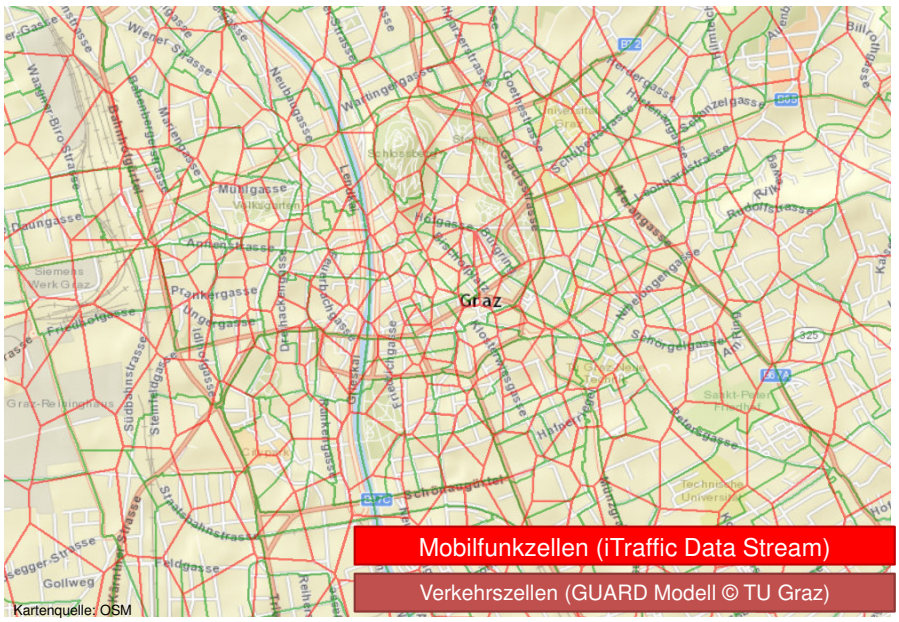
Verkehrszellen (GUARD Modell © TU Graz)

Verschneidung Mobilfunk- & Verkehrszelle

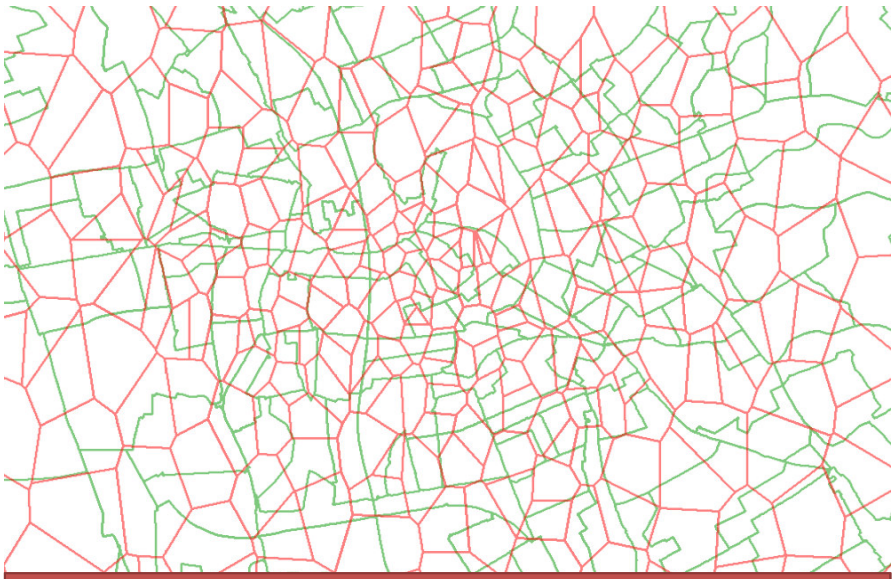


Mobilfunkzellen (iTraffic Data Stream)

Verschneidung Mobilfunk- & Verkehrszelle



Verschneidung Mobilfunk- & Verkehrszelle



Ausgabe: mobilfunkbasierte QZ-Matrix der Verkehrszellen (absolut)

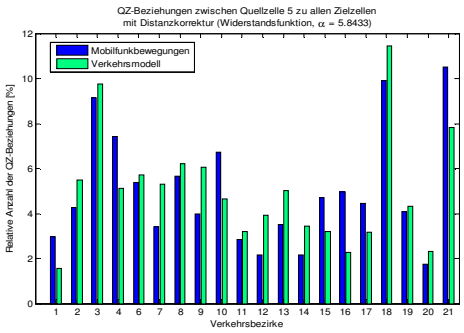
Systemskizze Mobilfunkdatenauswertung

Datenaufbereitung & Filterung	**Aufbereitung A1MTDS** **Filterung Mobilfunkantennen-Standorte** • Sektorantennen • Rundstrahler
Generierung Mobilfunkzellen (MFZ)	**Verfahren** • Delauny-Triangulation • Voronoi-Tessellation
Ermittlung MFZ-Übergänge	**Anwendung QZ-Tool** • Zellübergänge zwischen Mobilfunkzellen (ID, Quelle, Ziel, Event, Zeit)
ID-Einzelanalyse	• Filterung der Zellübergänge nach ID • Definition min. Aufenthaltsdauer & max. Reisezeit • Generierung korrigierter Zellübergänge nach ID • QZ-Matrix der Mobilfunkzellen
Verschneidung MFZ & Verkehrszelle (VZ)	• Berechnung Flächenanteil VZ an MFZ • Ermittlung mobilfunkbasierte QZ-Matrix der VZ
Statistische Analyse	Vergleich: verkehrsbasierte vs. mobilfunkbasierte QZ-Matrix

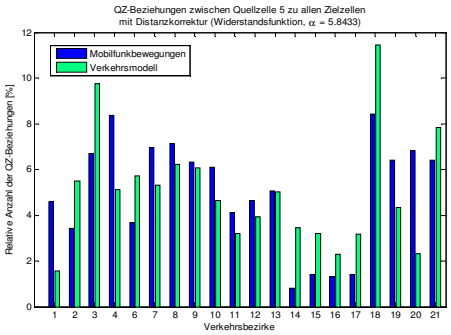
Ergebnis der Vergleichsanalyse

- Verkehrsmodellbasierte vs. mobilfunkbasierte QZ-Matrix
- Graz (urbanes Gebiet)

Montag 3. Juni 2013



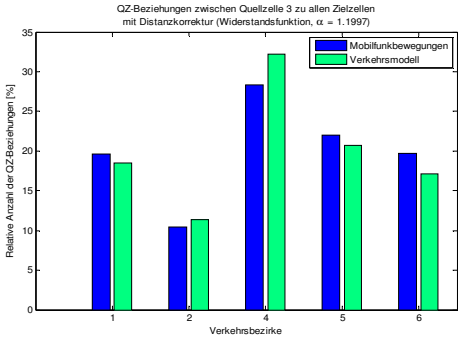
Donnerstag 6. Juni 2013



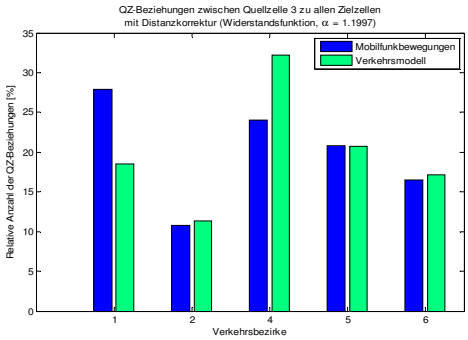
Ergebnis der Vergleichsanalyse

- Verkehrsmodellbasierte vs. mobilfunkbasierte QZ-Matrix
- Leibnitz (ländliches Gebiet)

Montag 3. Juni 2013



Donnerstag 6. Juni 2013



Weiterentwicklung Mobilfunkdatenanalyse

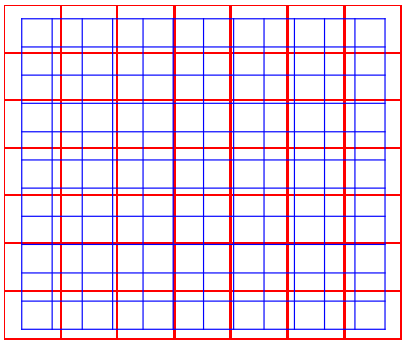
Analyse einzelner ID´s verbessert

ID-Einzelanalyse

1. Filterung der Zellübergänge nach ID
2. Filterung der Ausreißer (z. B. Kalman Filter)
3. MapMatching
4. Verkehrsmittelerkennung (IV & ÖV)
5. Hochrechnung der Mobilfunkdaten auf Basis von Verkehrszähldaten

Zuordnung Trajektorie zu Verkehrszelle

- Lsg 1: Mobilfunkzellen zuordnen zu Verkehrszellen
- Gegeben
  Mobilfunkzellen M
  Verkehrszellen V



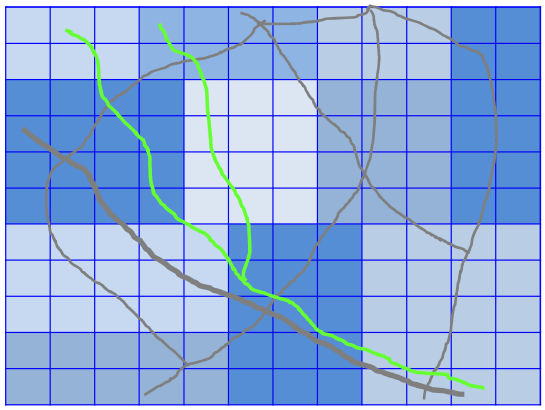
- Problem
  - $\mathbf{V} \not\subset \mathbf{M}$
  - dh. Gebiete sind keine echten Teilmengen;
    kein Aggregieren möglich
  - Zuordnen von Gebietsanteilen schwierig
    → Ansatz verworfen

Zuordnung Trajektorie zu Verkehrszelle

- Lsg 2: Direkte Zuordnung der Trajektorie auf die Strecke
  - Mobilfunkzellen nur indirekt nutzen
  - Ereignisse direkt auf Schienen- oder Straßennetz matchen
  - Zuordnung von Bahn- oder Kfz-Verkehr auf aggregierte Verkehrszellen

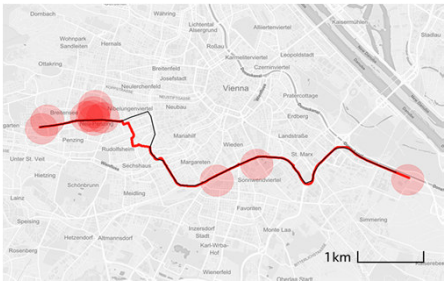
Verkehrszelle
Straße
Schiene

red. Anzahl
Oberbezirke



Map-Matching

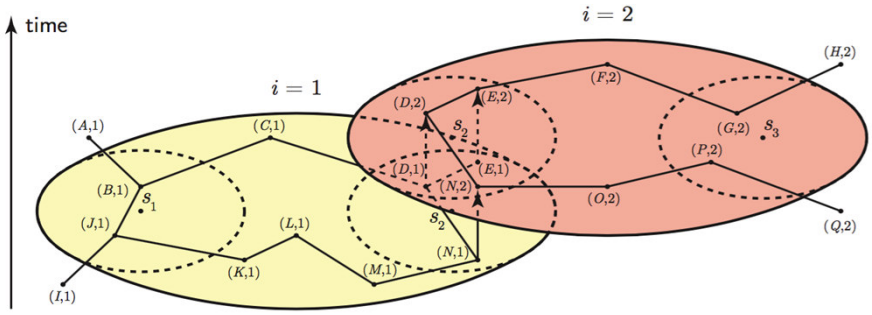
- Matchen von Trajektorie auf Netz
- Gegeben:
  - Mobilfunktrajektorie T von Signalevents
  - Strassennetz G = (V, E)
- Gesucht
  - Pfad P in G der zu den Beobachtungen in T geführt hat



- **Schwarzer Pfad:**
  - Route des Mobilfunkbenutzers
- **Rote Kreise:**
  - Signalevents mit geschätzer Reichweite
- **Roter Pfad:**
  - Gematchte Trajektorie

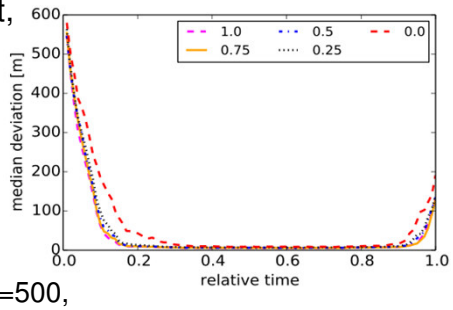
Map-Matching: Suchgraphkonstruktion

- **Schattierter Bereich:** Übergangsbereich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Beobachtungen mit Übergangsgraphen
- **A-Q:** Knoten des darunterliegenden Straßennetzes
- **Vertikale Pfeile:** Verbindungskanten zwischen den zwei Übergangsgraphen

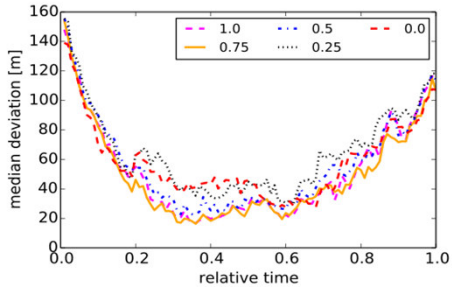


Map-Matching: Evaluierung

- Genauigkeit im ländlichen Gebiet, r=500, N=498



- Genauigkeit im städtischen Gebiet, r=500, N=498

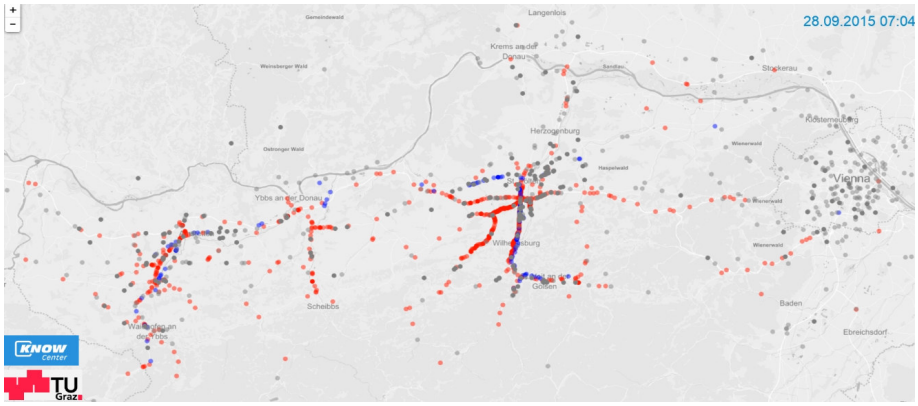


Verkehrsmittelerkennung

- Gegeben:
  - Straßennetz (V,E)
  - ÖV-Schienennetz (V,E)
  - ÖV-Fahrplan
- Verfahren („Feature Extraction“)
  - Distanz zur nächsten ÖV- und IV-Strecke nach Map-Matching
  - Aufenthaltszeiten an Bahnhöfen
  - Beginn- und Endzeitpunkt mit Fahrplan abgleichen

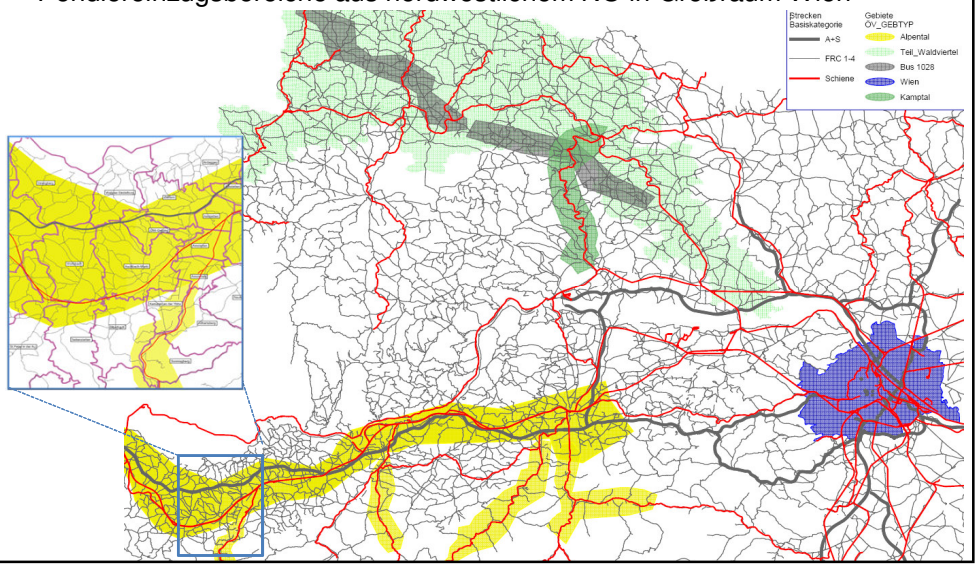
Verkehrsmittelerkennung – das Ergebnis

- Erkannte Verkehrsträger **Schiene** **Straße** (unbekannt)
- Alle Mobilfunkteilnehmer mit Quelle oder Ziel im Untersuchungsraum (**grau derzeit nicht mobil**)

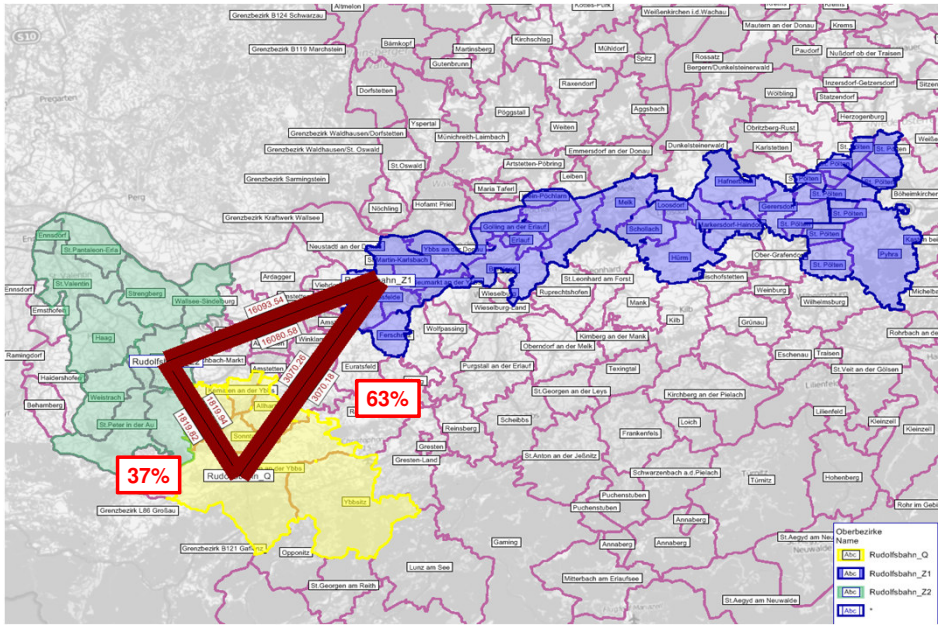


Planerische Fragestellung

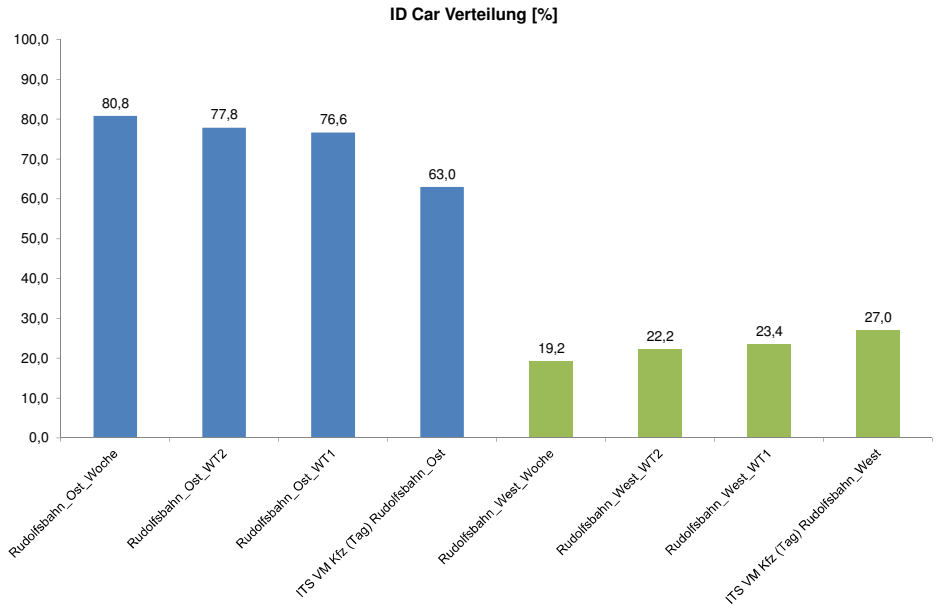
- Anwendung in der Ostregion von Österreich (NÖ, Wien)
- Pendlereinzugsbereiche aus nordwestlichem NÖ in Großraum Wien



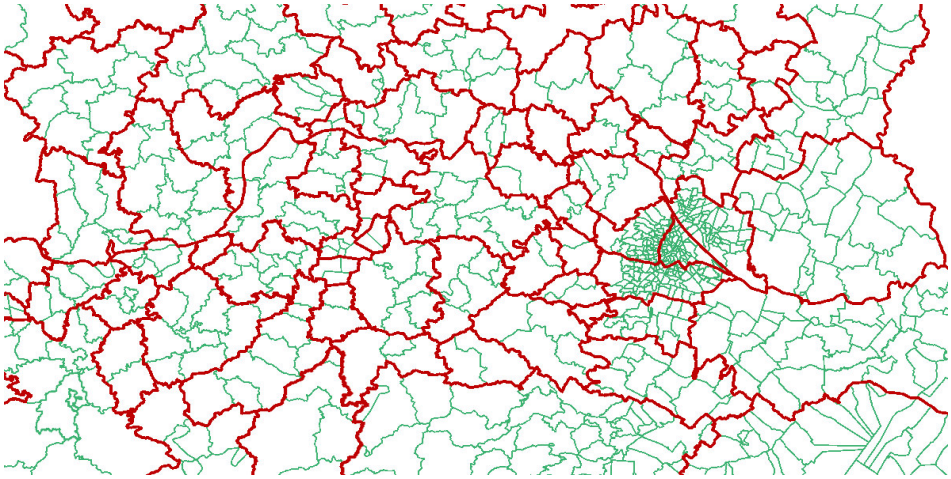
Voralpentäler: Rudolfsbahn Zielwahl



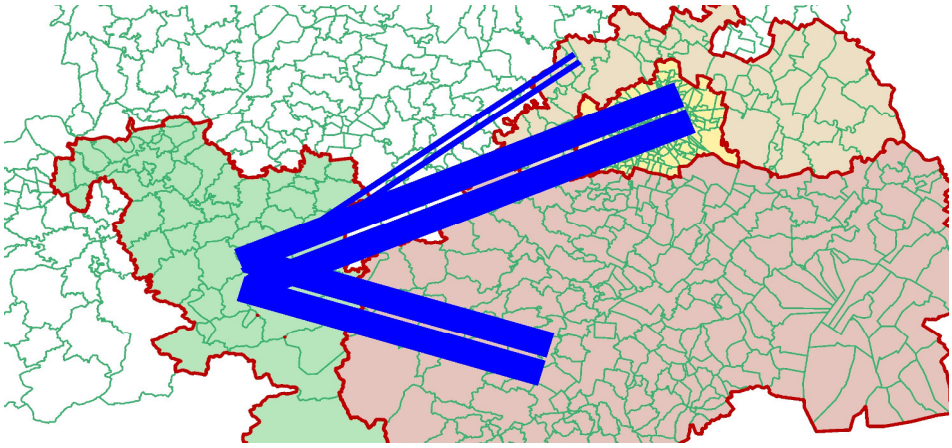
Voralpentäler: Rudolfsbahn Modal-Split



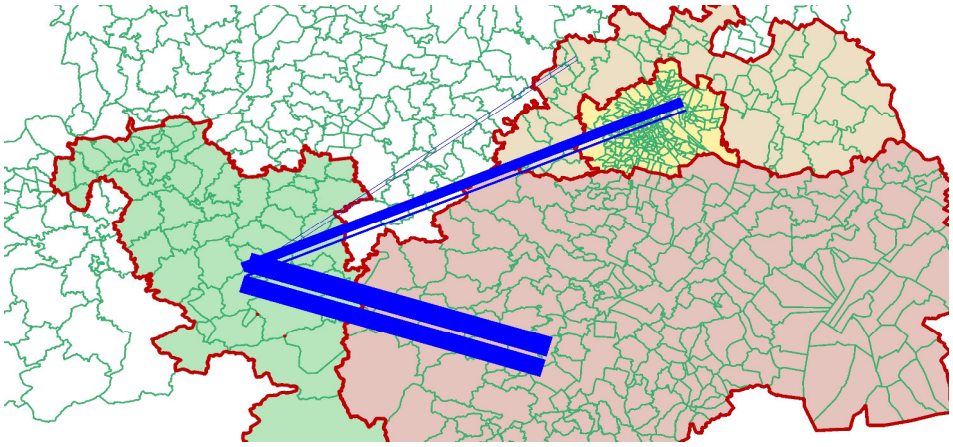
Generierung von Kfz Fij-Matrizen im VOR



Voralpentäler QZ: Sa 00:00-24:00



Voralpentäler QZ: So 00:00-24:00



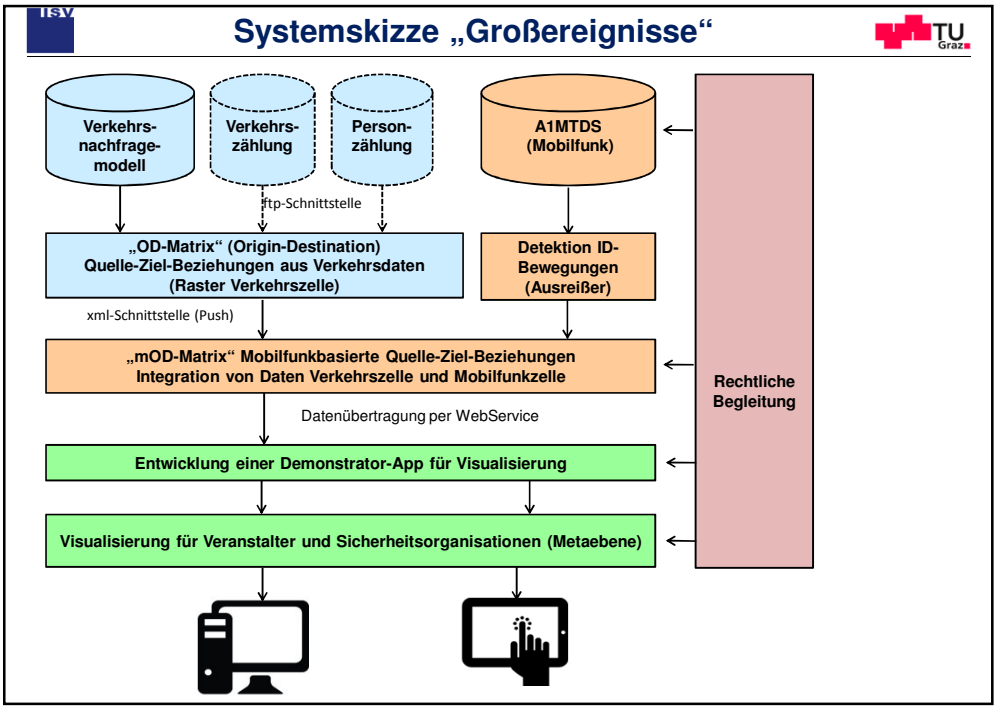
Anwendung Großereignisse

- Bsp Wien „Donauinselfest“ mit ca 3 Mio Besucher noch nicht abgeschlossen

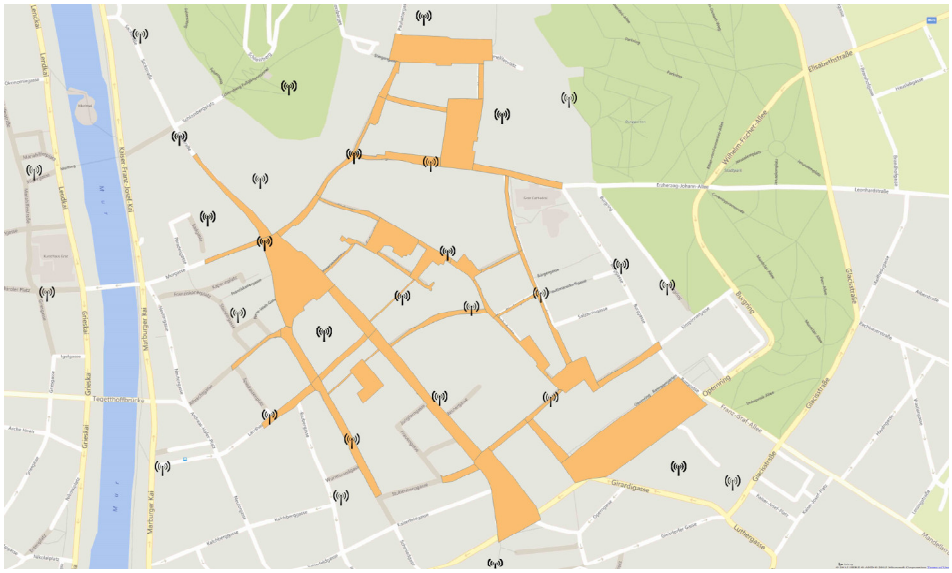
- Bsp Aufsteirern 20.9.2015, steirisches Volkskulturfest, ca 105.000 Besucher

HUMANIC
HUMANIC

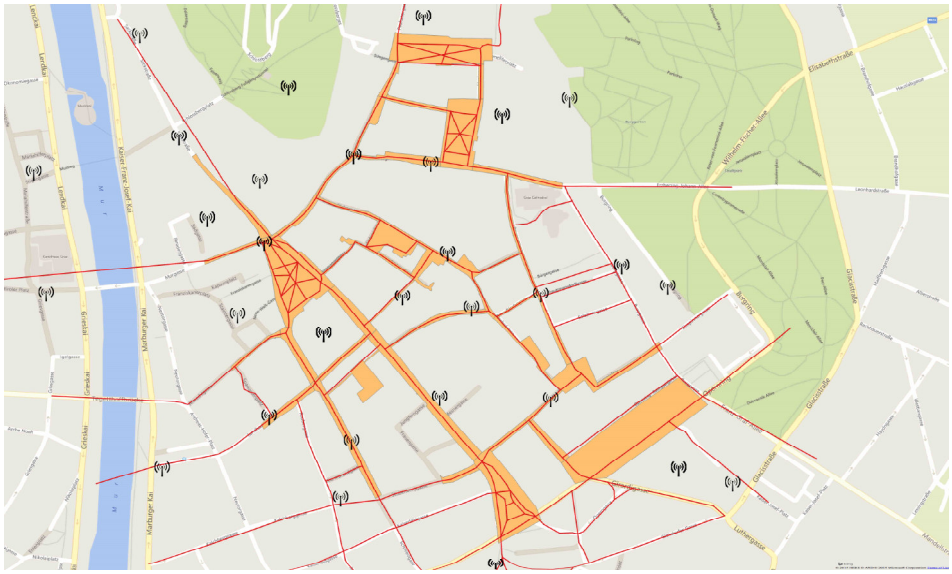
ENTER
Eingang


Systemskizze „Großereignisse“
Verkehrs-nachfrage-modell
Verkehrs-zählung
Person-zählung
A1MTDS (Mobilfunk)
ftp-Schnittstelle
„OD-Matrix“ (Origin-Destination) Quelle-Ziel-Beziehungen aus Verkehrsdaten (Raster Verkehrszelle)
Detektion ID-Bewegungen (Ausreißer)
xml-Schnittstelle (Push)
„mOD-Matrix“ Mobilfunkbasierte Quelle-Ziel-Beziehungen Integration von Daten Verkehrszelle und Mobilfunkzelle
Datenübertragung per WebService
Entwicklung einer Demonstrator-App für Visualisierung
Visualisierung für Veranstalter und Sicherheitsorganisationen (Metaebene)
Rechtliche Begleitung

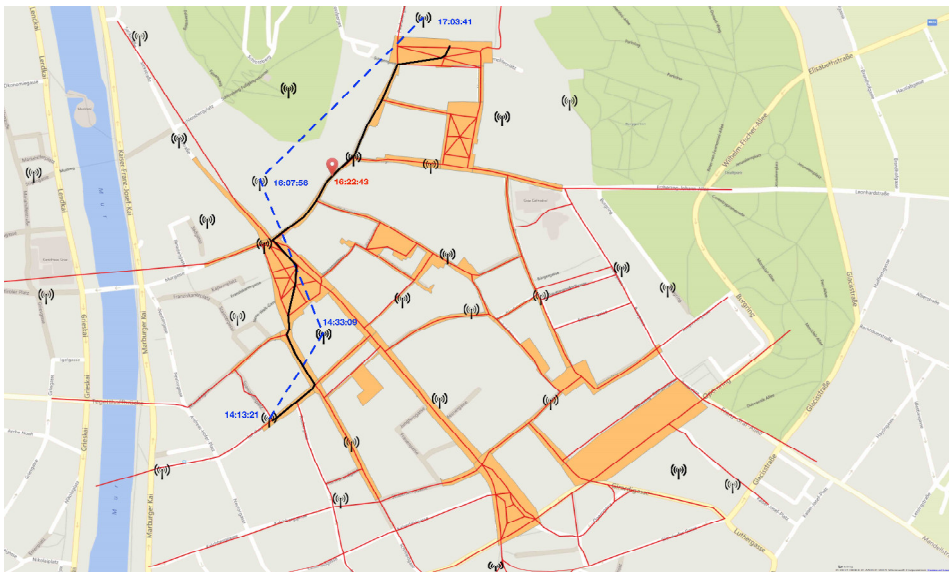
Eventgelände mit Mobilfunkmasten



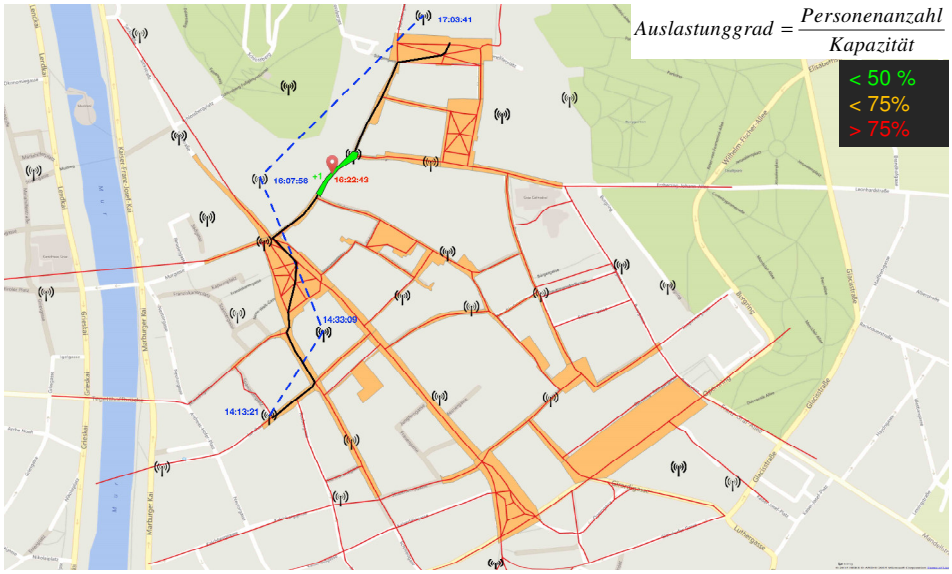
Eventgelände mit Mobilfunkmasten + Netz



Aggregation: Trajektorie



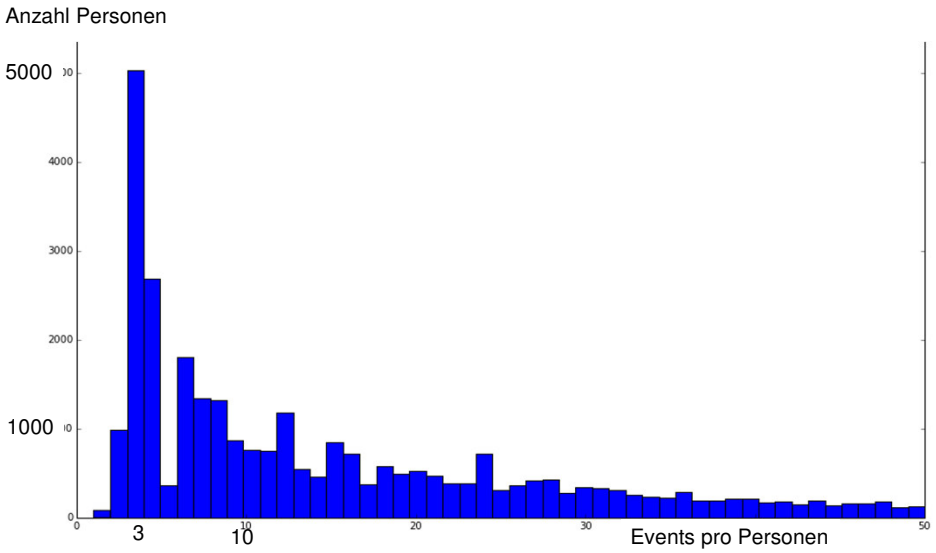
Aggregation: Mapmatching



$$Auslastunggrad = \frac{Personenanzahl}{Kapazität}$$

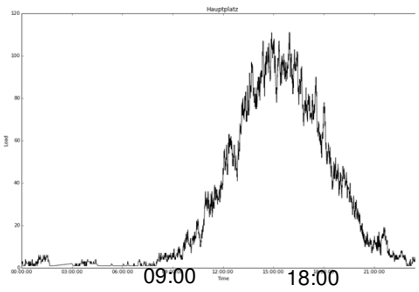
< 50 %
< 75%
> 75%

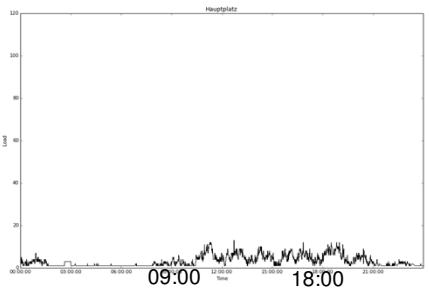
Datenanalyse: Events pro Besucher



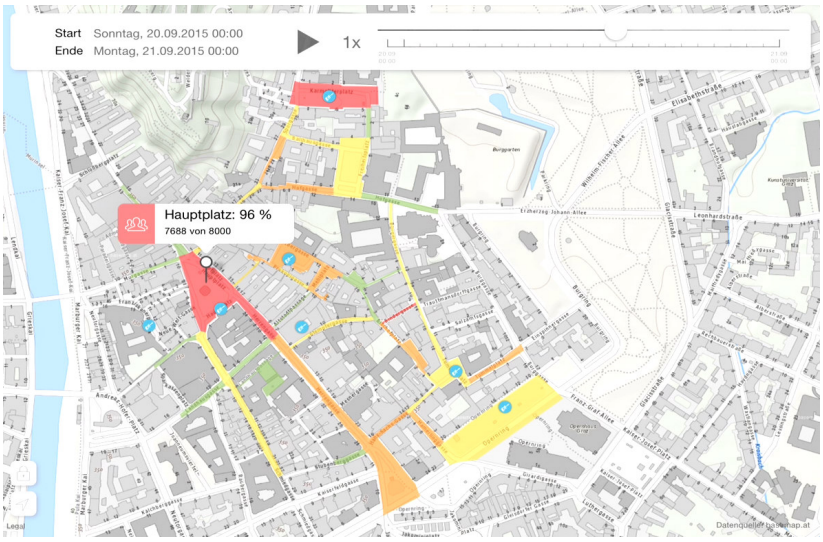
Datenanalyse: Events am Hauptplatz Graz

- Vergleich „Aufsteirern-Sonntag“ mit „Normal-Sonntag“



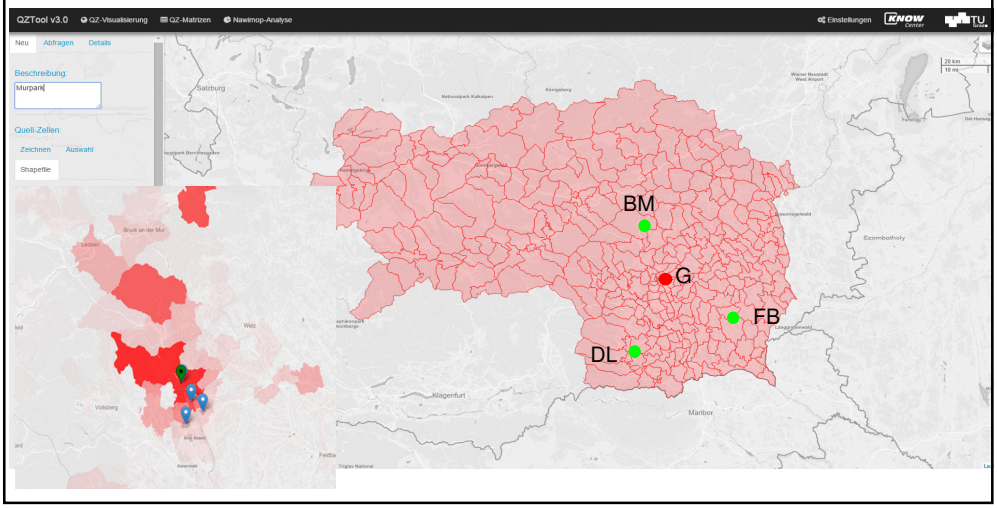


Auslastung des Eventgeländes am 20.9.2015



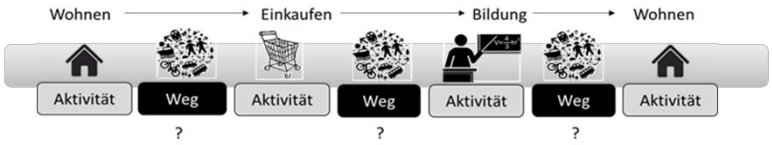
Ausblick 1 Standortanalyse

- QZ-Tool Auswertung Kundenherkunft zu Shopping-Zentren
- 287 Gemeinden der Steiermark bei 1,2 Mio EW

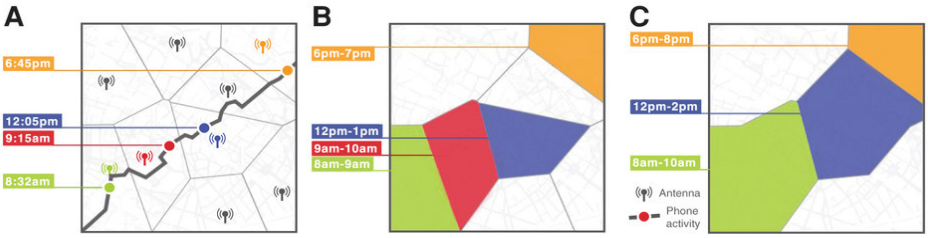


Ausblick 2 Fahrtzweckspezifische Fij-Matrizen

- Agentenbasierte Verkehrsmodelle bauen auf Aktivitätenketten auf → fahrtzweckspezifische Nachfragematrizen



- Künftig: Trajektorien mit angenommener Aktivität verknüpfen



Quelle: Unique in the Crowd: The privacy bounds of human mobility, Montjoye et al., 2013

Danksagung

- Grundlagen erarbeitet durch
  - KIRAS-Forschungsprojekt AGETOR
    (TU Graz, Know Center, Universität Wien, bytepoets) 2014-2015
  - KLIEN-Forschungsprojekt NawiMOP
    (ITS Vienna Region, TU Graz, Know Center) 2014-2016
- Veröffentlichungen
  - Reiter, T; Cik, M; Haberl, M; Breitwieser, C; Scherer, R; Kröll, M; Horn, C; Müller-Putz, G; Lindsta-edt, S; Fellendorf, M: Traffic incident detection with cellular network data. Paper in proceedings of OPTIMUM - International Symposium on Recent Advances in Transport Modelling, Brisbane, Australia, April 21-23, 2013
  - Cik, M.; Fellendorf, M.; Vogel, J.: Mobilfunkbewegungsdaten als Erweiterung der Datengrundlage für Verkehrsmodelle. - in: Straßenverkehrstechnik ; 2014, Heft 11, s. 739-744, Bonn
  - Horn, C.; Klampfl, S.; Cik, M.; Reiter, T.: Detecting Outliers in Cell Phone Data - Correcting Trajectories to Improve Traffic Modeling . - in: Transportation research record 2405 (2014) , S. 49 - 56
  - Schulze, G.; Horn, C.; Kern, R., "Map-Matching Cell Phone Trajectories of Low Spatial and Temporal Accuracy," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on* , pp.2707-2714, 15-18 Sept. 2015