
Visuelle Analyse von Mobilfunkdaten zur Charakterisierung Urbaner Mobilität

Günther SAGL¹, Martin LOIDL² und Bernd RESCH¹

¹Geographisches Institut – Lehrstuhl GIScience · Universität Heidelberg
Berliner Straße 48 D69120 Heidelberg

E-Mail: guenther.sagl@geog.uni-heidelberg.de; bernd.resch@geog.uni-heidelberg.de

²Fachbereich Geoinformatik – Z_GIS Universität Salzburg Hellbrunner Straße 34 · A5020 Salzburg
E-Mail: martin.loidl@sbg.ac.at

1 Einleitung

Wo sich Menschenmassen in Raum und Zeit typischerweise aufhalten bzw. bewegen ist für viele Anwendungsgebiete relevant – speziell wenn signifikante Abweichungen von einem bekannten raum-zeitlichen Verhalten auftreten. Anwendungsgebiete für die derlei Information von Relevanz ist, umfassen Notfall- und Gefahrenmanagement, öffentliche Sicherheit, Standortbewertung und Standortfindung für Geschäftslokale, bis hin zu einem effizienteren Verkehrsmanagement.

Bei all diesen Anwendungsbeispielen ist die Erhebung, Verfügbarkeit und Zusammenführung der notwendigen Daten ein umfangreiches, mitunter kostenintensives Unterfangen. Ansätze bestehen zum Beispiel im Kontext von Großveranstaltungen (*Common Operational Picture*) (vgl. REHRL et al. 2007) – diese haben jedoch nur selten den Weg zur Anwendung gefunden. Während der letzten Jahre hat sich, bedingt durch einen rasanten technologischen Wandel (Stichwort *Ubiquitous Computing*), die Verfügbarkeit von Daten gravierend geändert. Sensoren verschiedenster Art tragen zu einem kontinuierlichen Aufbau riesiger Datenmengen bei (Stichwort *Big Data*). Beispiele hierfür sind flächendeckende Sensornetzwerke aus dem Umweltbereich (RESCH 2012), aber auch Personen, die als menschliche „Sensoren“ subjektive Statusinformationen der Umwelt via mobiler Endgeräte im Internet bereitstellen um auf diese Weise Informationslücken zu füllen (HAYES & STEPHENSON 2011; RESCH 2013) – Stichwort *Volunteered Geographic Information* (GOODCHILD 2007).

Die Herausforderung, die sich aus dieser Entwicklung unter anderem stellt, ist, relevante Information aus einer rasant wachsenden Datenflut zu extrahieren. Dabei hat sich die Verwendung visueller Schnittstellen als besonders effektiv erwiesen. Zusammengefasst unter der Disziplinbezeichnung „Visual Analytics“ (KEIM et al. 2008) steht ein breites Spektrum an Methoden und Werkzeugen zur Verfügung, die es erlauben mit den Daten zu interagieren. Dabei wird die Rechenleistung des Computers mit der Interpretationsfähigkeit des Menschen kombiniert, wobei die Visualisierung als zentrale Schnittstelle dient (THOMAS & COOK 2006; KEIM et al. 2010).

Anhand konkreter Beispiele versucht dieser Beitrag das Potential visueller Analysemethoden bei der Extraktion relevanter, mobilitätsbezogener Information aus großen Datenmengen zu zeigen. Dabei wird deutlich, dass „Visual Analytics“ viel mehr als nur eine Weiterentwicklung von Methoden aus der Kartographie bzw. Geovisualisierung ist. Als effektives Werkzeug in einem interaktiven Explorationsprozess eingesetzt, kann es wesentlich zu

einem besseren Verständnis komplexer dynamischer Vorgänge, wie es zum Beispiel in urbanen Räumen der Fall ist, beitragen.

2 Mobilfunkdaten als Indikator für Mobilität

Für die meisten Personen ist das Mobiltelefon mittlerweile ein alltäglicher Begleiter, der stets in unmittelbarer Nähe des Benutzers mitgeführt wird. Unabhängig davon, ob man sich lediglich von einer Mobilfunkzelle in die nächste begibt, oder das Mobiltelefon in irgendeiner Form aktiv benützt, in jedem Fall wird dabei eine Vielzahl von Daten generiert. Aktiv generierte Daten (z.B. durch Sprachtelefonie, Nutzung von online-Diensten oder SMS), genauso wie Daten die vom Mobilfunkanbieter für den operativen Betrieb des Netzes automatisch erzeugt werden (z.B. Übergabe von Gesprächen zwischen den Mobilfunkzellen, sogenannte *Handovers*), spiegeln Aktivität und Mobilität der jeweiligen Benutzer bis zu einem gewissen Grad wider.

Anonymisierte und aggregierte, nutzergenerierte Daten aus Mobilfunknetzen bieten speziell in urbanen Gebieten mit dichter Mobilfunkinfrastruktur eine ausreichende räumliche und zeitliche Auflösung, um für die Analyse globaler Aktivität und/oder Mobilität herangezogen werden zu können (CALABRESE et al. 2011). Daten aus Mobilfunknetzen können also als Indikator für menschliche Aktivitäts- und Mobilitätsmuster herangezogen werden und folglich zur Detektion und Exploration charakteristischer als auch außergewöhnlicher Muster und Zusammenhänge beitragen (YUAN et al. 2012).

Für die raum-zeitliche Untersuchung von Mobilität werden in den meisten Fällen statistische oder probabilistische Verfahren und eine Reihe quantitativer Analysemethoden eingesetzt (vgl. LONG & NELSON 2012; SIMINI et al. 2012); Visualisierungen dienen hauptsächlich der Kommunikation von Analyseergebnissen. Im Gegensatz dazu kommen im hier vorgestellten Ansatz für die Untersuchung von Mobilfunkdaten hauptsächlich visuelle Analysemethoden (ANDRIENKO & ANDRIENKO 2007) zum Einsatz. Ausgehend von kürzlich publizierten Arbeiten (SAGL et al. 2012a; SAGL et al. 2012b) werden in diesem Artikel Beispiele charakteristischer urbaner Mobilität vorgestellt.

Dabei wird schnell ersichtlich, dass die Visualisierung räumlicher Daten längst nicht mehr nur der Kommunikation von Analyseergebnissen dient. Vielmehr wird die visuelle Darstellung zur zentralen Plattform für die interaktive Exploration und Analyse der Daten, vor allem im Fall von großen Datenmengen (*Big Data*). Vereinfacht kann zusammengefasst werden, dass in diesem Kontext die (Geo-)Visualisierung nicht das Produkt, sondern ein mächtiges, höchst intuitives und dynamisches Werkzeug zur explorativen Datenanalyse ist.

3 Analyseansätze zur Informationsextraktion

Um aus den zur Verfügung gestellten Mobilfunkdaten in einem textbasierten Rohformat multi-dimensionale Informationsschichten zu erstellen, wurde ein vollautomatisierter Arbeitsablauf entwickelt, der aus vier aufeinanderfolgenden Schritten besteht (SAGL et al. 2012b):

1. *Rohdatenaufbereitung*
Umwandlung der bereits aggregierten und als Text codierten Vektor- bzw. Rasterdaten in entsprechende Datenstrukturen mit korrekten geometrischen Ausprägungen (ebenfalls Raster- und Vektordaten).
2. *Datenmanagement*
Datenverwaltung mittels eines Geographischer Informationssystem (GIS) für Rasterdaten (ESRI ArcGIS) und eines räumlichen Datenbanksystems für Vektordaten (PostgreSQL und PostGIS)
3. *Datenintegration*
Integration der Mobilfunkdaten in GIS sowie in spezielle Visual Analytics Software (z.B. Tableau).
4. *Modellierung & Analyse*
Extraktion von zeitlicher und räumlicher Information zu Mobilität aus Mobilfunkdaten

Die Schritte 1 Rohdatenaufbereitung und 2 Datenmanagement sind eng miteinander verknüpft und dienen zur Erstellung eines geometrisch und geographisch korrekten Datensatzes für die weiterführende Integration in Analyse Software.

Die Schritte 3 Datenintegration und 4 Modellierung & Analyse wurden in zwei unterschiedliche Analyseabläufe umgesetzt um die Extraktion von relevanter Information jeweils zu optimieren:

- *Unidirektionaler Analyseansatz*
automatisierte Erstellung von Bewegungs- u. Aktivitätsmustern aus vordefinierten räumlichen Gebieten und Zeitintervallen.
- *Visuell-explorativer Analyseansatz*
intuitive und sich über verschiedene räumliche und zeitliche Maßstäbe wiederholende Durchforstung des gesamte Datenbestand. Diese iterative Vorgehensweise unterstützt den explorative Analyseansatz und ermöglicht dadurch die Identifikation typischer und außergewöhnlicher Mobilitätsmuster.

4 Beispiele charakteristischer urbaner Mobilität

Die Ergebnisse des unidirektionalen (Abbildung 1 und 2) und des explorativen Analyseansatzes (Abbildung 3 und 4), basierend auf der visuellen Schnittstelle, zeigen charakteristische Aktivitäts- und Mobilitätsmuster von Menschenmassen in Udine (Friaul - Julisch Venetien, Nord-Italien).

4.1 Ergebnisse des Unidirektionalen Analyseansatzes

Abbildung 1 zeigt die räumliche und zeitliche Entwicklung verschiedener „Mobilitäts-Häufungen“ im Stadtzentrum und an der Peripherie am Morgen eines typischen Wochentages.

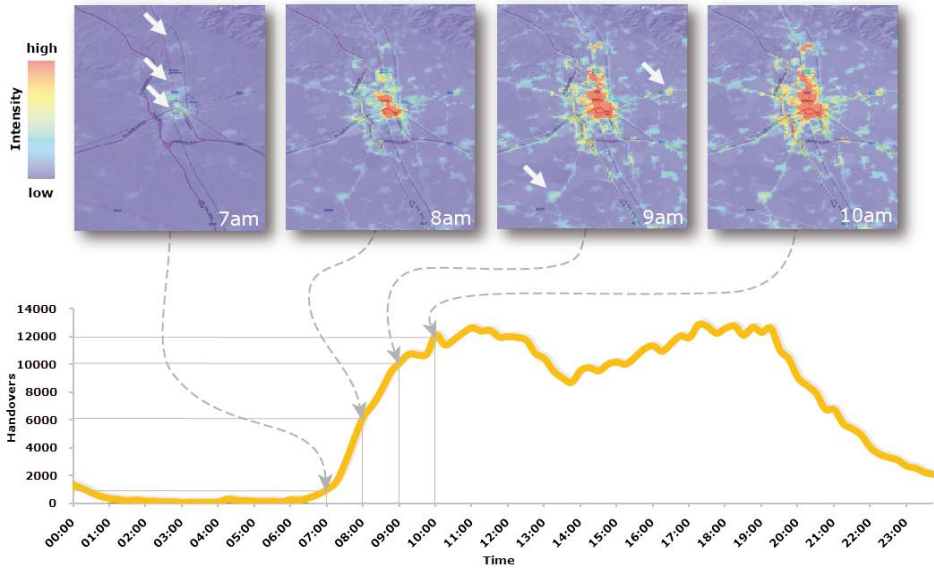


Abb. 1: Aktivität: durchschnittliche Amplitude der *Handovers* in und um Udine – eine Region „erwacht“.

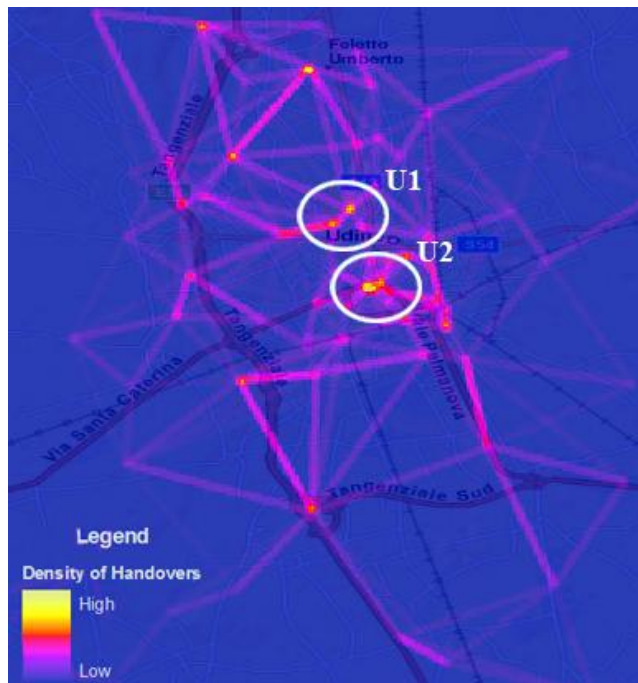


Abb. 2: Mobilität: durchschnittliche Dichte von *Handovers* über einen Zeitraum von 24 Stunden im Stadtzentrum (Bildmitte) und der Peripherie von Udine (U1 und U2 beziehen sich auf die „Mobility-Gateways“ in Abbildung 3).

Eindeutig erkennbar sind drei Cluster um 7 Uhr, zwei weitere Cluster um 9 Uhr (jeweils durch weiße Pfeile markiert), sowie linienhafte Ausprägungen – in diesem Fall speziell die Autobahn westlich von Udine welche in Nord-Süd Richtung verläuft.

Zusätzlich zu den Aktivitäts-Clustern (Abbildung 1) zeigt Abbildung 2 die typische Mobilität eines gesamten Tages (abgeleitet von *Handovers*) im Stadtzentrum und in der Peripherie in Form einer Dichte-Karte. Dabei wird die Anzahl an *Handovers* zwischen zwei Zellen für einen Tag aggregiert. In der dadurch sichtbaren Struktur repräsentieren die „Knoten“ die Schwerpunkte – nicht notwendigerweise die Position der Antennen – der Mobilfunkzellen und die „Kanten“ die Ausrichtung der Mobilität. Dadurch entsteht ein Bild der Intensität, das vor allem im Stadtzentrum und entlang hochfrequenzierter Verkehrswege besonders ausgeprägt ist.

4.2 Ergebnisse des visuell-explorativen Analyseansatzes

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen Ergebnisse der ausschließlich visuellen Analyse der Häufigkeit von *Handovers* zwischen zwei beteiligten Mobilfunkzellen für das gesamte Untersuchungsgebiet wie in Abbildung 2 dargestellt (Udine inkl. der unmittelbaren Peripherie). Die direkten Verbindungen (*cell-links*) zwischen den beiden Zellen sind räumlich referenziert und in den Abbildungen durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet.

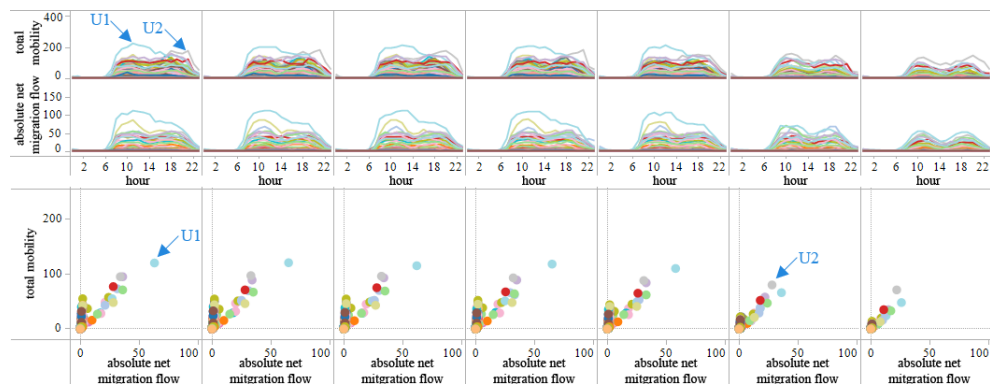


Abb. 3: typische zeitliche Muster der Gesamtmobilität und der absoluten netto Bewegung zwischen Mobilfunkzellen pro Wochentag (Montag bis Sonntag, vlnr.) in Udine. U1 und U2 zeigen sehr aktive „Mobility Gateways“ (vgl. Abbildung 2).

Abbildung 3 zeigt zwei Darstellungen der Mobilität. Der obere Teil von Abbildung 3 zeigt die Gesamtmobilität (*total mobility* entspricht der Summe aller *Handovers* pro *cell-link*) sowie die absolute netto Bewegung (*absolute net migration flow* entspricht der Differenz der *Handovers* von Zelle A nach B und B nach A) zwischen Mobilfunkzellen. Im unteren Teil von Abbildung 3 wird die Gesamtmobilität der absoluten netto Bewegung gegenüber gestellt. Durch diese kombinierte Darstellung sind zwei signifikante *cell-links* in Udine erkennbar: U1 weist unter der Woche auf eine hohe Mobilität am Morgen hin, U2 hingegen am Abend. Am Wochenende ist dieses zeitversetzte Muster zwischen morgens und abends ausbalanciert; U1 und U2 weisen eine hohen absolute *net migration flow* auf und können daher als sehr aktive „Mobility Gateways“ angesehen werden (SAGL et al. 2012a).

Die visuelle Analyse der Intensität der absoluten Netto-Bewegung je *cell-link* entlang der Zeitachse eignet sich insbesondere zur Erkennung von un- bzw. außergewöhnlichen Ereignissen. Das Beispiel in Abbildung 4, zeigt die Anzahl der *Handovers* für jeden *cell-link* in Udine an drei Tagen. Der erste und der dritte Tag zeigen das charakteristische Mobilitätsmuster der Stadt an einem Samstag respektive Montag. Durch die unmittelbare visuelle Referenz sind relative Unterschiede im Tagesmuster visuell leicht erkennbar. Die Muster am 22. bzw. 24. August gleichen einem regelmäßigen „Flickenteppich“, das Muster am 23. August hingegen hebt sich visuell ab (siehe Detail in Abbildung 4 rechts).

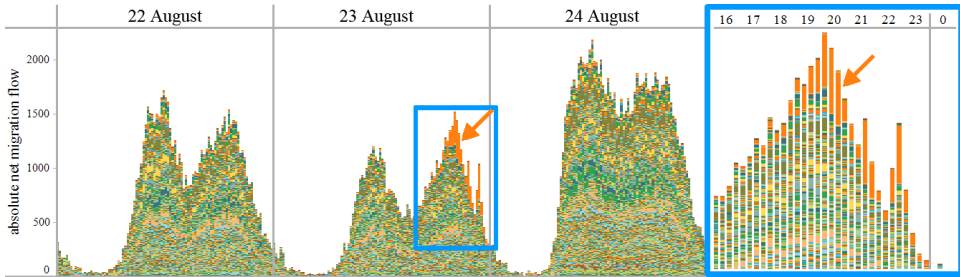


Abb. 4: außergewöhnliche visuelle Muster der absoluten netto Bewegung während eines Fußballspieles im „Stadio Friuli“, Udine (SAGL et al. 2012a)

Der *cell-link*, der im Diagramm mit einem orangenen Pfeil angedeutet wird, weicht sowohl die Frequenz als auch das zeitliche Muster betreffend von den restlichen Verbindungen ab. Durch den räumlichen Bezug aller *cell-links* kann eruiert werden, dass im Stadion von Udine offensichtlich ein außergewöhnliches Ereignis stattfand. Das zeitliche Muster folgt, wie im Detailausschnitt zu sehen ist, einem klaren Muster: kontinuierlicher Anstieg der Anzahl der *Handovers* → signifikanter Rückgang für drei Zeitintervalle à 15 Minuten → Anstieg für einen Zeitschnitt → abermals Rückgang für drei Intervalle → Spitze für zwei Zeitschnitte → „Verschwinden“ im allgemeinen Mobilitätsmuster. Diese charakteristische „Signatur“ ist typisch für die zeitliche Abfolge eines Fußballspieles.

5 Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Artikel haben wir ausgesuchte Beispiele für die visuelle Analyse bzw. Geo-Visualisierung von Mobilfunkdaten zur Charakterisierung urbaner Mobilität gezeigt. Die Interaktion mit einer umfassenden Datengrundlage über eine visuelle Schnittstelle erlaubt die Detektion und Exploration, sowie die raum-zeitliche Charakterisierung von typischen, d.h. vorhersehbaren, als auch von außergewöhnlichen Ereignissen.

Die Analyseergebnisse zeigen auch, dass kontextuelle Information aus den Mobilfunkdaten abgeleitet werden können – wie z.B. dass sich Korridore erhöhter Mobilität entsprechend mit urbaner Infrastruktur decken. Des Weiteren wird deutlich, dass die Kombination der gewählten Analyseansätze eine vielversprechende Möglichkeit darstellt um, erstens, typische Mobilitätsmuster zu verstehen, und, zweitens, außergewöhnliche Mobilitätsmuster eindeutig einem zugrundeliegenden Event zuzuordnen – dies wurde am Beispiel eines Fußballspieles demonstriert (Abbildung 4).

Eine weitere logische Schlussfolgerung ist, dass insbesondere solche außergewöhnlichen Mobilitätsmuster eine Klassifizierung der zugrundeliegenden Events erlauben – z.B. in „kritisch“ oder „unkritisch“ in Hinblick eines zeitnahen Sicherheitsmanagements – und so ein gezieltes Steuern von Menschenmassen ermöglicht.

Die Ergebnisse der zwei sich gegenseitig ergänzenden Analyseansätze (unidirektional bzw. visuell-explorativ) zur Extraktion von Aktivitäts- und Mobilitätsinformation aus Mobilfunkdaten zeigen zusätzliche Einblicke in die räumliche und zeitliche Dynamik urbaner Mobilität und deren charakteristische Muster.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die visuelle Analyse bzw. die Geo-Visualisierung effektive und intuitive Werkzeuge darstellen, um aus großen Datenmengen wertvolle Informationen zu extrahieren. Potentielle zukünftigen Forschungsschwerpunkte im Kontext von „Urban Dynamics“ beinhalten vor allem die Integration alternativer Datenquellen (Social Media Daten), in echtzeitnahen Analyseabläufen.

Danksagung

Die Autoren danken Prof. Euro Beinat für spannende Einblicke in die soziale Dimension von alltäglich genutzten digitalen Systemen und Technologien. Die gezeigten Forschungstätigkeiten- und Ergebnisse wurden teilweise durch Mittel aus dem österreichischem Wissenschaftsfonds FWF (Doktoratskolleg GIScience, DK W 1237-N23) sowie dem österreichischen Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung gefördert.

Literatur

- ANDRIENKO, N. & ANDRIENKO, G. (2007) 'Designing Visual Analytics Methods for Massive Collections of Movement Data'. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 42, 117-138.
- CALABRESE, F., COLONNA, M., LOVISOLO, P., PARATA, D. & RATTI, C. (2011) 'Real-Time Urban Monitoring Using Cell Phones: A Case Study in Rome'. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12, 141-151.
- GOODCHILD, M. F. (2007) 'Citizens as Sensors: The World of Volunteered Geography'. *GeoJournal*, 69, 211-221.
- HAYES, J. & STEPHENSON, M. (2011). Bridging the Social and Physical Sensing Worlds: Detecting Coverage Gaps and Improving Sensor Networks. *The First Workshop on Pervasive Urban Applications (PURBA) in conjunction with the Ninth International Conference on Pervasive Computing*. San Francisco, CA, USA.
- KEIM, D., ANDRIENKO, G., FEKETE, J.-D., GÖRG, C., KOHLHAMMER, J. & MELANCON, G. (2008). Visual Analytics: Definition, Process, and Challenges. In: ANDREAS, K., JOHN, T. S., JEAN-DANIEL, F. & CHRIS, N. (eds.) *Information Visualization*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- KEIM, D., KOHLHAMMER, J., ELLIS, G. & MANSMANN, F. (eds.) 2010. *Mastering the Information Age - Solving Problems with Visual Analytics*, Goslar: Eurographics Association.

- LONG, J. A. & NELSON, T. A. (2012) 'A Review of Quantitative Methods for Movement Data'. *International Journal of Geographical Information Science*, 1-27.
- REHRL, K., STEFAN, K., RUDOLF, S. & BERNHARD, Z. (2007). Das Interevent-Modell – Ein Integriertes Modell Zur Verkehrsplanung Und Verkehrslenkung Bei Großveranstaltungen. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (eds.) *Angewandte Geoinformatik Agit 2007*. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- RESCH, B. (2012) 'Live Geography - Standardised Geo-Sensor Webs for Real-Time Monitoring in Urban Environments', Dissertations in Geographic Information Science, Heidelberg, Germany, Akademische Verlagsgesellschaft AKA GmbH.
- RESCH, B. (2013). People as Sensors and Collective Sensing-Contextual Observations Complementing Geo-Sensor Network Measurements. In: KRISP, J. M. (ed.) *Progress in Location-Based Services*. Springer Berlin Heidelberg.
- SAGL, G., LOIDL, M. & BEINAT, E. (2012a) 'A Visual Analytics Approach for Extracting Spatio-Temporal Urban Mobility Information from Mobile Network Traffic'. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1, 256-271.
- SAGL, G., RESCH, B., HAWELKA, B. & BEINAT, E. (2012b). From Social Sensor Data to Collective Human Behaviour Patterns: Analysing and Visualising Spatio-Temporal Dynamics in Urban Environments. In: JEKEL, T., CAR, A., STROBL, J. & GRIESEBNER, G. (eds.) *Gi-Forum 2012: Geovisualization, Society and Learning*. Wichmann Verlag, Berlin.
- SIMINI, F., GONZALEZ, M. C., MARITAN, A. & BARABASI, A.-L. (2012) 'A Universal Model for Mobility and Migration Patterns'. *Nature*, 484, 96-100.
- THOMAS, J. J. & COOK, K. A. (2006) 'A Visual Analytics Agenda'. *Computer Graphics and Applications*, 26, 10-13.
- YUAN, Y., RAUBAL, M. & LIU, Y. (2012) 'Correlating Mobile Phone Usage and Travel Behavior – a Case Study of Harbin, China'. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36, 118-130.