Flächennutzungsmonitoring IX
Nachhaltigkeit der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung?

IÖR Schriften Band 73 · 2017

ISBN: 978-3-944101-73-6

# „Big Data“ aus der Erdbeobachtung – Weltweites Siedlungsmonitoring am Beispiel des Global Urban Footprint

*Annekatrin Metz-Marconcini, Thomas Esch*

Metz-Marconcini, A.; Esch, T. (2017): „Big Data“ aus der Erdbeobachtung – Weltweites Siedlungsmonitoring am Beispiel des Global Urban Footprint. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Schwarz, S.; Richter, B. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring IX. Nachhaltigkeit der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung? Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 73, S. 293-301.

# „Big Data“ aus der Erdbeobachtung – Weltweites Siedlungsmonitoring am Beispiel des Global Urban Footprint

*Annekatrin Metz-Marconcini, Thomas Esch*

## Zusammenfassung

Das Bevölkerungswachstum und die damit verbundene globale Urbanisierung stellen eine der größten Herausforderungen für eine nachhaltige Zukunft dar. Um die Auswirkungen der menschlichen Siedlungsentwicklung zu verstehen, ist die Verfügbarkeit einer aktuellen und räumlich einheitlichen Geodatenbasis zur Lage und Verteilung der Siedlungen essentiell. Hier leistet der Global Urban Footprint (GUF) einen wertvollen Beitrag, denn er zeigt in einer bisher noch nie dagewesenen räumlichen Auflösung von 0,4 Bogensekunden (12 m) – zum ersten Mal – die Gesamtheit städtischer und ländlicher Siedlungen in der Welt. Der GUF wird offen und frei für jede wissenschaftliche Nutzung in vollem Umfang zur Verfügung gestellt und für alle nicht-kommerziellen Anwendungen in einer generalisierten Version von 2,8 Bogensekunden (84 m). Damit wird der GUF wegweisend in Bezug auf die Analyse der globalen Urbanisierung und Peri-Urbanisierungsmuster, der Bevölkerungsschätzung, der Vulnerabilitätsbewertung oder der Modellierung von Krankheiten und Phänomenen der globalen Veränderung sein.

## 1 Einführung

Eine der dringlichsten Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft ist die anhaltende globale Urbanisierung, die mit dem stetigen Bevölkerungswachstum von derzeit 7,2 Milliarden auf prognostizierte neun Milliarden Menschen bis 2050 einhergeht. Um die wirkliche Dimension dieses Phänomens zu verstehen, bedarf es präziser weltweiter Informationen über den Standort und die Verteilung von Siedlungen in städtischen und ländlichen Gebieten. Der Global Urban Footprint (GUF) soll diese gegenwärtige Informationslücke schließen. Er stellt ein Abbild der menschlichen Präsenz auf der Erde in Form einer Rasterkarte (Esch et al. 2017) dar und zeigt das Siedlungsmuster in einer bisher einzigartigen räumlichen Auflösung von 12 m.

Gegenwärtig gibt es stichhaltige Hinweise dafür, dass die globale Urbanisierung das gesamte Spektrum der menschlichen und natürlichen Systeme, insbesondere in Bezug auf Energie, Wasser, Nahrung, Biodiversität, Klima oder menschliche Gesundheit, beeinflusst (Grimm et al. 2008; Kaufmann et al. 2007; Moore et al. 2003; Tilman et al. 2011; Zhou et al. 2004). Allerdings konnten viele grundlegende Fragen über die räumliche Dimension der Urbanisierung noch nicht zufriedenstellend beantwortet werden: Wie

groß ist der Anteil bebauter Fläche an der globalen Landoberfläche? Wie ist das Verhältnis von städtischem zu ländlichem Siedlungsgebiet? Wie viele Städte bzw. Siedlungen gibt es auf der Erde?

Viele Studien stimmen darin überein, dass die Schätzungen der Auswirkungen der menschlichen Präsenz auf der Erde stark differieren (Potere, Schneider 2007; Potere et al. 2009) und dass die Dynamik des städtischen Wachstums und seine wirtschaftlichen und sozialen Effekte schlecht verstanden werden (Batty 2008). Das Fehlen einer gemeinsamen Definition von städtischen im Gegensatz zu ländlichen Gebieten sowie eine fehlende räumlich detaillierte und aktuelle Bestandsaufnahme aller städtischen und ländlichen Siedlungen auf der Erde erschwert diese Analyse. Diese Informationslücke wird nun durch den Global Urban Footprint (GUF) geschlossen, der im Folgenden beschrieben wird.

## 2 Methodische Grundlagen – Global Urban Footprint

### 2.1 Globale Kartierung des urbanen Raums mit Hilfe der Fernerkundung

Die Erdbeobachtung (EO) ist ein wirksamer Ansatz, um objektive räumliche Informationen über die Struktur und räumlich-zeitliche Entwicklung von Siedlungen auf der Erde zu erfassen (Esch et al. 2010). Die globale Klassifikation von Siedlungen stellt eine ganz besondere Herausforderung in der städtischen Fernerkundung dar, da ein Kompromiss zwischen der räumlichen Auflösung der verfügbaren EO-Daten und der Fähigkeit, eine globale Abdeckung innerhalb einer angemessenen Zeitspanne zu sammeln, eingegangen werden muss. Ein umfassender Überblick über die verfügbaren EO-basierten globalen Geoinformationsprodukte zu menschlichen Siedlungen wird von Potere et al. (2009), Gamba & Herold (2009) und Ban et al. (2015a) gegeben. Der Großteil dieser Datensätze wird aus optischen EO-Daten mittlerer Auflösung (MR) generiert, wie zum Beispiel die etablierten Landbedeckungskarten MODIS 500 (Schneider et al. 2010) und GlobCover 2009 (Bontemps et al. 2011) mit einer räumlichen Auflösung von 500 m bzw. 300 m. Allerdings ist ihr Potential begrenzt, kleine und zerstreute Dörfer und Städte genau zu erkennen und abzugrenzen. Neuere Initiativen zielen darauf ab, räumlich genauere Karten der Verteilung menschlicher Siedlungen auf der Basis von hochauflösenden (HR) EO-Daten bereitzustellen (NASA 2012; Gamba, Lisini 2012; Miyazaki et al. 2013; Ban et al. 2015b; Pesaresi et al. 2016; Wieland, Pittore 2016).

### 2.2 Von TanDEM-X Daten zum Global Urban Footprint

In den Jahren 2007 und 2010 startete das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) die EO-Radarsatelliten TerraSAR-X bzw. TanDEM-X (Krieger et al. 2007;

Werninghaus, Buckreuss 2010). Weil die beiden Missionen innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeitspanne eine globale Abdeckung von sehr hochauflösenden SAR-Bildern sammeln, können sie globale Umweltüberwachungsaktivitäten optimal unterstützen. Ermutigt durch die vielversprechenden Ergebnisse früherer Studien (Esch et al. 2011; Esch et al. 2010) startete das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR die interne Initiative „Global Urban Footprint". Das Ziel dieser Aktivität war die Entwicklung einer vollautomatischen Verarbeitungskette zur Erstellung einer weltweiten Karte von menschlichen Siedlungen in einem bis dahin einzigartigen räumlichen Detail durch die Analyse der globalen Abdeckung von TerraSAR-X- und TanDEM-X-Aufnahmen (Esch et al. 2012).

Die Produktion des GUF-Layers basiert auf dem Urban Footprint Processor (UFP). Dieser ist eine vollautomatische, generische und autonome Verarbeitungsumgebung, die eine umfangreiche Suite von Verarbeitungs- und Analysemodulen orchestriert. Dieses System sorgt für eine effektive Verarbeitung der 182 249 TerraSAR-X und TanDEM-X Single Look Complex (SSC) Bildprodukte, die in den Jahren 2011 und 2012 (93 %) im Stripmap-Modus mit 3 m räumlicher Auflösung aufgenommen wurden. Um Datenlücken zu füllen, wurden auch einzelne Szenen in den Jahren 2013 und 2014 aufgenommen. Abbildung 1 zeigt einen schematischen Überblick über die UFP-Verarbeitungsumgebung. Der UFP besteht aus fünf technischen Hauptmodulen, die Funktionalitäten für Datenmanagement, Feature-Extraktion, unüberwachte Klassifizierung, Mosaikierung und automatische Nachbearbeitung beinhalten.

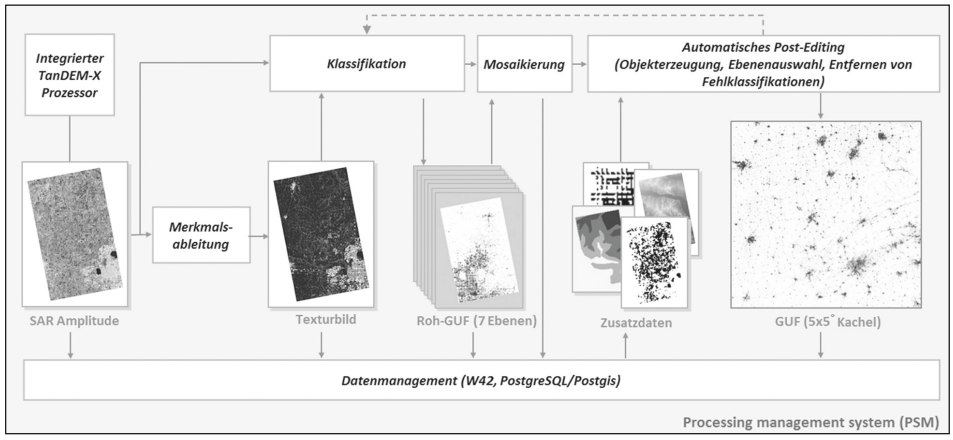


*Abb. 1: Prozessierungsumgebung des Urban Footprint Prozessors (UFP) zur Erzeugung des Global Urban Footprint (Quelle: Esch et al. 2017 (verändert))*

## 3 Der GUF-Datensatz

Abbildung 2 zeigt den Global Urban Footprint in einem Ausschnitt von Europa. Wegen der hohen räumlichen Detailliertheit können nicht nur die Großstädte wie beispielsweise Moskau, Paris und London, sondern auch die Siedlungen im ländlichen Raum sehr gut erkannt werden.

Der GUF wird als binärer Rasterdatensatz im 8-Bit-, LZW-komprimierten GeoTiff-Format mit den Werten 255 für die bebauten und 0 für die unbebauten Gebiete als Geographisches Koordinatensystem (Lat, Long) bereitgestellt. Die geometrische Auflösung der GUF-Daten beträgt 0,4 Bogensekunden, was 12 m nahe dem Äquator entspricht. Auf regionaler Ebene wurden die thematische Genauigkeit sowie die Stärken und Schwächen des GUF bereits im Detail durch Vergleiche mit Referenzdaten in mehreren Studien und Projekten dokumentiert, wie z. B. in Esch et al. (2013), Felbier et al. (2014), Gessner et al. (2015). Klotz et al. (2016) führte einen detaillierten multiskaligen Kreuzvergleich zwischen dem GUF und den bestehenden, niedriger aufgelösten (MODIS 500, GlobCover) und hochauflösenden, aus EO-Daten abgeleiteten Siedlungsmasken durch (z. B. GHSL-SPOT 2.5 m). Ein statistischer Vergleich von MODIS 500, GlobCover, GHSL und GUF auf lokaler und globaler Ebene wird in Esch et al. (2017) präsentiert.

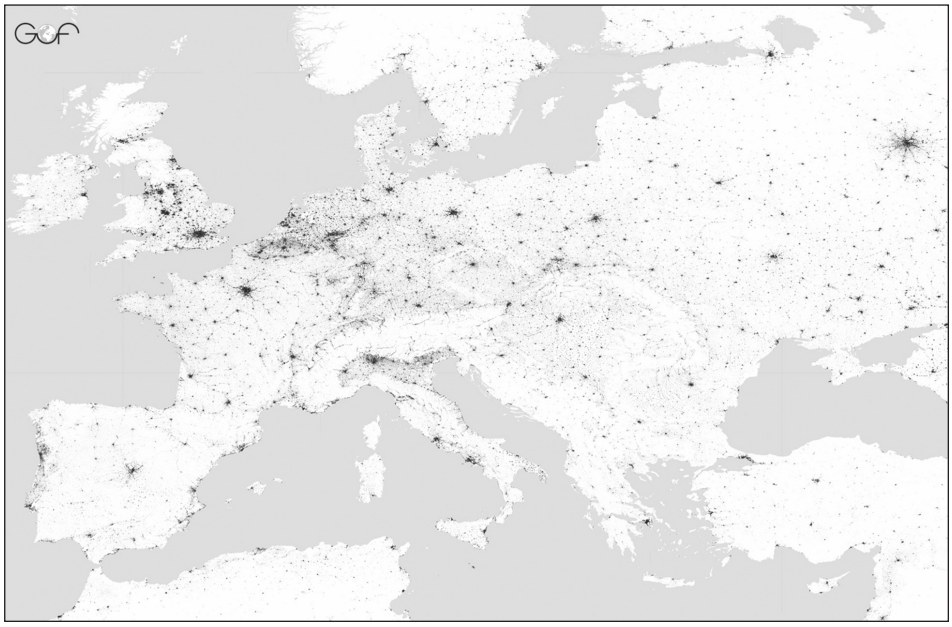


*Abb. 2: Schwerpunkte des Global Urban Footprint von Europa (Quelle: DLR)*

Mit dem GUF-Datensatz können erstmals „urbane Fußabdrücke" global analysiert werden und zur Beantwortung von Fragen über die Gesamtfläche der Stadt, die Urbani-

sierung der Umgebung oder zum Vergleich der Urbanisierung der ländlichen Gebiete beitragen. Die binäre GUF-Maske kann auch verwendet werden, um verschiedene räumliche Metriken abzuleiten, z. B. über die Kompaktheit oder Dispersion der Siedlungen (Esch et al. 2014). Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer solchen Netzwerkanalyse basierend auf dem GUF. Dabei wurde eine lokale Signifikanz abgeleitet, die sich für jede zusammenhängende Siedlungsfläche aus der Größe des Siedlungsobjektes und ihrem mittleren Abstand zu den nächsten Nachbarn errechnet (Esch et al. 2014). Je größer eine Siedlungsfläche ist und je näher die nächsten Nachbarn liegen, desto größer wird die zugewiesene Signifikanz. Dieses Merkmal kann beispielsweise eingesetzt werden, um rurale Siedlungen von städtischen Siedlungen abzugrenzen. Weitere interessante Untersuchungen lassen sich in Verbindung mit zusätzlichen Daten realisieren. Zum Beispiel kann in Kombination mit Bevölkerungsdaten die Populationsdichte berechnet werden. Zusätzliche retrospektive Datensätze (z. B. über die Entwicklung in den vergangenen 30-40 Jahren) zeigen das städtische Wachstum.

## 4 Fazit und Ausblick

Mit einer räumlichen Auflösung von 12 m repräsentiert der GUF erstmals eine global hochgenaue Bestandsaufnahme sowohl der großen städtischen Ballungsgebiete als auch der ländlichen Regionen. Er ermöglicht detaillierte quantitative und qualitative Analysen und Vergleiche von Siedlungseigenschaften und -mustern von der kommunalen Ebene bis zur globalen Skala. Städtische Gebiete über den ganzen Globus sind mit der gleichen Methode basierend auf Eingangsdaten, die innerhalb von nur zwei Jahren gesammelt werden konnten, abgebildet. Der GUF-Datensatz kann dazu beitragen, ein besseres Verständnis des Urbanisierungsphänomens zu erlangen und angemessen auf künftige Herausforderungen im Zusammenhang mit weitläufigen Städten, Bevölkerungsexplosion, Armutsbekämpfung, Wirtschaftswachstum, Klimawandel und $CO_2$-Emissionen sowie dem Verlust der Biodiversität zu reagieren. Besonders in abgelegenen und unterentwickelten Regionen der Erde, wo geeignete geographische Daten häufig kaum verfügbar sind, stellt der GUF wertvolle Informationen zur Verfügung.

Das DLR stellt den globalen GUF-Datensatz offen und kostenlos in voller räumlicher Auflösung für wissenschaftliche Anwendungen zur Verfügung (*http://www.dlr.de/guf*). Für alle nicht-kommerziellen Anwendungen ist er in der generalisierten Auflösung von 84 m zugänglich. Außerdem sind die Datensätze auf der Urban Thematic Exploitation Platform (UTEP) der europäischen Raumfahrtagentur ESA (*https://urban-tep.eo.esa.int/*) und über den DLR-EOC Geoservice verfügbar (*https://geoservice.dlr.de/web/maps/eoc:guf:4326*).

Das DLR plant, regelmäßige Updates des GUF basierend auf Sentinel-1/-2- und Landsat-Daten durchzuführen (GUF+). Gleichzeitig wird es eine erweiterte Suite von

GUF+-Produkten geben. Dazu gehört der GUF-Network-Layer, der auf Basis einer räumlichen Netzwerkanalyse (Esch et al. 2014) erstellt wurde und die globalen Siedlungsmuster und -eigenschaften beschreibt. Der GUF-Density-Layer spezifiziert ferner die Dichte der bebauten Fläche und das städtische Grün innerhalb jener Bereiche, die als Siedlungen durch den GUF definiert sind. Dieser Datensatz basiert auf einer Kombination der GUF-Maske und der Versiegelung bzw. Informationen über den Anteil der Vegetation. Beide Merkmale lassen sich aus den von Esch et al. (2016) beschriebenen TimeScan-Daten ableiten. Ein weiteres Produkt der GUF+-Suite ist das GUF-Evolution-Produkt, das auf die Bereitstellung von Informationen über die räumlich-zeitliche Entwicklung der menschlichen Siedlungen auf der Grundlage der Analyse von Landsat- und Envisat-ASAR-Archivdaten abzielt. Schließlich ist die Erzeugung eines GUF-Volumen-Layers geplant, der das durchschnittliche Volumen der bebauten Flächen von TanDEM-X DEM-Daten auf der Grundlage eines von Marconcini et al. (2014) vorgestellten Verfahren beschreibt.

## Danksagung

Die Autoren danken den TerraSAR-X- und TanDEM-X Science Teams für die Bereitstellung der globalen SAR-Daten, die zur Ableitung des GUF verwendet wurden. Wir danken der Weltbank und dem schweizerischen Staatssekretariat für Wirtschaft (SECO) für ihre finanzielle Unterstützung im Rahmen der GUF-Qualitätsbewertung und -erweiterung.

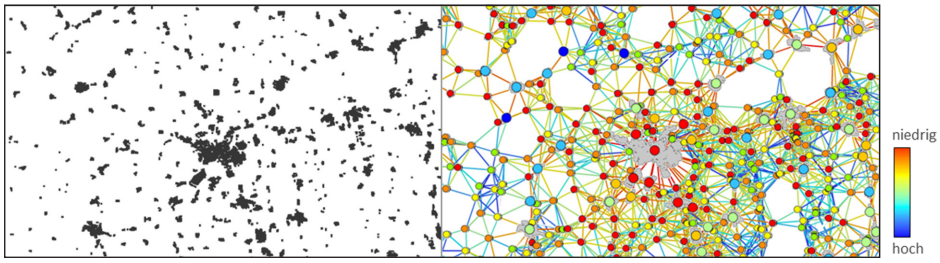


*Abb. 3: Netzwerkanalyse von Ulm und Umgebung; links: GUF-Maske, rechts: Lokale Signifikanz (Quelle: DLR)*

## 5 Literatur

Ban, Y.; Gong, P.; Giri, C. (2015a): Global land cover mapping using Earth observation satellite data: Recent progresses and challenges. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 103: 1-6.

Ban, Y., Jacob, A., Gamba, P., (2015b): Spaceborne SAR data for global urban mapping at 30 m resolution using a robust urban extractor. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 103: 28-37.

Batty, M. (2008): The Size, Scale, and Shape of Cities. In: Science 319 (5864): 769-771.

Bontemps, S.; Defourny, P.; Bogaert, E. V.; Arino, O.; Kalogirou, V.; Perez, J. R. (2011): GLOBCOVER 2009-Products description and validation report.

Esch, T.; Asamer, H.; Boettcher, M.; Brito, F.; Hirner, A.; Marconcini, M.; Mathot, E.; Metz, A.; Permana, H.; Soukup, T.; Stanek, F.; Kuchar, S.; Zeidler, J.; Balhar, J. (2016): Earth Observation-Supported Service Platform for the Development and Provision of Thematic Information on the Built Environment – the TEP-Urban Project. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B8, XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic, 1379-1384.

Esch, T.; Felbier, A.; Heldens, W.; Marconcini, M.; Roth, A.; Taubenbock, H. (2013): Spatially detailed mapping of settlement patterns using SAR data of the TanDEM-X mission, In: Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE): 041-044.

Esch, T.; Heldens, W.; Hirner, A.; Keil, M.; Marconcini, M.; Roth, A.; Zeidler, J.; Dech, S.; Strano, E. (2017): Breaking new ground in mapping human settlements from space. The Global Urban Footprint. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.

Esch, T.; Marconcini, M.; Marmanis, D.; Zeidler, J.; Elsayed, S.; Metz, A.; Müller, A.; Dech, S. (2014): Dimensioning urbanization – An advanced procedure for characterizing human settlement properties and patterns using spatial network analysis. In: Applied Geography 55: 212-228.

Esch, T.; Schenk, A.; Ullmann, T.; Thiel, M.; Roth, A.; Dech, S. (2011): Characterization of Land Cover Types in TerraSAR-X Images by Combined Analysis of Speckle Statistics and Intensity Information. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49: 1911-1925.

Esch, T.; Taubenböck, H.; Roth, A.; Heldens, W.; Felbier, A.; Thiel, M.; Schmidt, M.; Müller, A.; Dech, S. (2012): TanDEM-X mission – new perspectives for the inventory and monitoring of global settlement patterns. In: Journal of Applied Remote Sensing 6 (1): 1-21.

Esch, T.; Thiel, M.; Schenk, A.; Roth, A.; Muller, A.; Dech, S. (2010): Delineation of Urban Footprints From TerraSAR-X Data by Analyzing Speckle Characteristics and Intensity Information. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48 (2): 905-916.

Felbier, A.; Esch, T.; Heldens, W.; Marconcini, M.; Zeidler, J.; Roth, A.; Klotz, M.; Wurm, M.; Taubenböck, H. (2014): The global urban footprint; Processing status and cross comparison to existing human settlement products. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4816-4819.

Gamba, P.; Herold, M. (Eds.) (2009): Global Mapping of Human Settlement: Experiences, Datasets, and Prospects. In: CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Gamba, P.; Lisini, G. (2012): A robust approach to global urban area extent extraction using ASAR Wide Swath Mode data. Tyrrhenian Workshop on Advances in Radar and Remote Sensing (TyWRRS), 12-14 Sept. 2012, 1-5.

Gessner, U.; Esch, T.; Tillack, A.; Naeimi, V.; Kuenzer, C.; Dech, S. (2015): Multi-sensor mapping of West African land cover using MODIS, ASAR and TanDEM-X/Terra-SAR-X data. In: Remote Sensing of Environment 164, 282-297.

Grimm, N. B.; Faeth, S. H.; Golubiewski, N. E.; Redman, C. L.; Wu, J.; Bai, X.; Briggs, J. M. (2008): Global Change and the Ecology of Cities. In: Science 319 (5864): 756-760.

Kaufmann, R. K.; Seto, K. C.; Schneider, A.; Liu, Z.; Zhou, L.; Wang, W. (2007): Climate Response to Rapid Urban Growth: Evidence of a Human-Induced Precipitation Deficit. In: Journal of Climate 20 (10): 2299-2306.

Klotz, M.; Kemper, T.; Geiß, C.; Esch, T.; Taubenböck, H. (2016): How good is the map? A multi-scale cross-comparison framework for global settlement layers: Evidence from Central Europe. In: Remote Sensing of Environment 178: 191-212.

Krieger, G.; Moreira, A.; Fiedler, H.; Hajnsek, I.; Werner, M.; Younis, M.; Zink, M. (2007): TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45 (11): 3317-3341.

Marconcini, M.; Marmanis, D.; Esch, T.; Felbier, A. (2014): A novel method for building height estmation using TanDEM-X data, 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4804-4807.

Miyazaki, H.; Shao, X.; Iwao, K.; Shibasaki, R. (2013): An Automated Method for Global Urban Area Mapping by Integrating ASTER Satellite Images and GIS Data. In: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 6 (2): 1004-1019.

Moore, M.; Gould, P.; Keary, B. S. (2003): Global urbanization and impact on health. In: International Journal of Hygiene and Environmental Health 206 (4-5): 269-278.

NASA – National Aeronautics and Space Administration (2012): Night lights 2012. https://earthobservatory.nasa.gov/Features/IntotheBlack. (Zugriff: 09.06.2017).

Pesaresi, M.; Ehrlich, D.; Ferri, S.; Florczyk, A. J.; Freire, S.; Halkia, M.; Julea, A.; Kemper, T.; Soille, P.; Syrris, V. (2016): Operating procedure for the production of the Global Human Settlement Layer from Landsat data of the epochs 1975, 1990, 2000, and 2014. European Joint Research Center.

Potere, D.; Schneider, A. (2007): A critical look at representations of urban areas in global maps. In: GeoJournal 69 (1): 55-80.

Potere, D.; Schneider, A.; Angel, S.; Civco, D. L. (2009): Mapping urban areas on a global scale: which of the eight maps now available is more accurate? In: International Journal of Remote Sensing 30 (24): 6531-6558.

Schneider, A.; Friedl, M.; Potere, D. (2010): Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on 'urban ecoregions'. In: Remote Sensing of Environment 114 (8): 1733-1746.

Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B. L. (2011): Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 108 (50): 20260-20264.

Werninghaus, R.; Buckreuss, S. (2010): The TerraSAR-X Mission and System Design. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48 (2): 606-614.

Wieland, M.; Pittore, M. (2016): Large-area settlement pattern recognition from Landsat-8 data. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 119: 294-308.

Zhou, L.; Dickinson, R. E.; Tian, Y.; Fang, J.; Li, Q.; Kaufmann, R. K.; Tucker, C. J.; Myneni, R. B. (2004): Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 101 (26): 9540-9544.