



Flächennutzungsmonitoring IX Nachhaltigkeit der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung?

IÖR Schriften Band 73 · 2017

ISBN: 978-3-944101-73-6

Satellitengestützte Charakterisierung der Stadtmorphologie in Kigali (Ruanda) und Verknüpfung mit einer transsektoralen Verbrauchsanalyse

*Felix Bachofer, Sheetal D. Marathe, Ludger Eltrop,
Volker Hochschild*

Bachofer, F.; Marathe, S. D.; Eltrop, L.; Hochschild, V. (2017): Satellitengestützte Charakterisierung der Stadtmorphologie in Kigali (Ruanda) und Verknüpfung mit einer transsektoralen Verbrauchsanalyse. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Schwarz, S.; Richter, B. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring IX. Nachhaltigkeit der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung? Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 73, S. 149-157.

Satellitengestützte Charakterisierung der Stadtmorphologie in Kigali (Ruanda) und Verknüpfung mit einer transsektoralen Verbrauchsanalyse

Felix Bachofer, Sheetal D. Marathe, Ludger Eltrop, Volker Hochschild

Zusammenfassung

Basisdaten zur Stadtmorphologie sowie Daten über die spezifischen Bedarfe und Verbräuche der Sektoren wie Energie, Wasser und Abwasser, sind für die Stadtplanung und die Planung von Infrastruktur wichtig. Gerade in sich dynamisch entwickelnden urbanen Regionen des Globalen Südens liegen diese Daten zumeist nicht vor. Die vorliegende Studie zeigt, dass mittels Satelliten-Fernerkundung und Haushaltsbefragungen diese Informationslücken geschlossen werden können. Mittels Pléiades- und RapidEye-Aufnahmen konnten für die Stadt Kigali die Stadtmorphologie und die Anzahl von Gebäuden erhoben sowie eine Typisierung der Gebäude durchgeführt werden. Die Haushaltsbefragung zeigt einen direkten Zusammenhang zwischen Stadtstruktur/Gebäudetyp und nutzerspezifischen Verbrauchs- und Bedarfswerten.

1 Einführung

1.1 Motivation

Urbane Agglomerationen in den Ländern des Globalen Südens sind mit dynamischen Entwicklungen ihrer städtischen Strukturen konfrontiert. Die Gründe liegen an einem hohen Bevölkerungswachstum und an Migrationsströmen, welche oftmals unkontrolliert stattfinden, sowie an sozioökonomischen Entwicklungen. Gleichzeitig stehen die Städte vor der Herausforderung, sich an die Auswirkungen des Klimawandels anzupassen (UN-HABITAT 2016, 16 ff.). Dabei sind für die Stadtplanung sowie für den Erhalt und die Planung von kritischen Infrastrukturen räumliche Basisdaten notwendig. Zur Erhebung dieser Daten bieten sich Fernerkundungsanalysen sowie Fragebogenumfragen an, um Bedarfe zu erfassen. Grundannahme der hier vorgestellten Untersuchung ist, dass ein Zusammenhang zwischen der Wohnsituation (Gebäudetyp und Stadtstrukturtyp) und der sozioökonomischen Situation der Bewohner und damit auch ihrer personenspezifischen Bedarfs- und Verbrauchsmuster besteht (Kramer 2013; Jones et al. 2015). Die vorgeschlagene Methodik wird derzeit in drei Untersuchungsstädten Asyut (Ägypten), DaNang (Vietnam) und Kigali (Ruanda) entwickelt und geprüft, um die Übertragbarkeit zu gewährleisten. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Stadt Kigali dargestellt.

1.2 Stand der Forschung

Die letzten flächendeckenden Orthobilder einer Befliegungskampagne wurden in den Jahren 2008 und 2009 für Ruanda aufgenommen (Sagashya 2014). Die raschen Veränderungen des städtischen Raumes erfordern jedoch aktuellere Informationen. Satellitenbasierte Fernerkundungsaufnahmen bieten die Möglichkeit einer großen räumlichen sowie temporalen Abdeckung. Effiziente (semi-) automatische Klassifizierungsmethoden sind erforderlich, um kontinuierliche und zuverlässige Informationen über städtische Landnutzung und urbane Strukturen zu erhalten. Verschiedene Studien befassten sich mit der Extraktion von Informationen über städtische Umgebungen aus hochauflösenden optischen Satellitendaten. Aytekin et al. (2012) verwendeten spektrale und räumliche Eigenschaften von Bildsegmenten, um Straßen und Gebäude in komplexen städtischen Umgebungen automatisch abzuleiten. Die Extraktion von einzelnen Gebäuden aus Satellitendaten ist ebenso Thema verschiedener Arbeiten (Wang et al. 2016; Chen et al. 2017). Comber et al. (2012) und Singh et al. (2015) verwendeten Schatten in Fernerkundungsbildern, um Gebäude zu extrahieren und Gebäudehöhen zu bestimmen.

Als Stadtstruktur wird die Anordnung der Landnutzung – insbesondere der Gebäude – in städtischen Gebieten bezeichnet. Stadtstrukturtypen können dazu genutzt werden, um Fragestellungen auf einer räumlich differenzierten Ebene auszuwerten Wurm et al. (2010). Sie werden aus räumlichen quantifizierbaren Indikatoren gebildet, welche bebaute und nicht bebaute Flächen durch funktionale, morphologische, physikalische und energetische Parameter abgrenzen und klassifizieren (Höfer et al. 2009). Als Datengrundlage können topographische Karten, Geobasisdaten und Fernerkundungsdaten dienen (Meinel et al. 2009; Heiden et al. 2012; Hecht et al. 2015).

In Ruanda erhebt das National Institute of Statistics Rwanda (NISR) umfangreiche Daten über Lebensbedingungen (NISR, 2014; NISR, MINECOFIN 2015). Die Erhebungen enthalten aber nur wenige verbrauchsrelevante Fragen, wie den Anteil der Haushalte mit Stromzugang, die Art der Beleuchtungsmittel oder den Zugang zum sauberen Wasser.

Ein genereller Zusammenhang zwischen kombinierten Parametern Gebäudetyp/Stadtstruktur und Verbrauchs- und Bedarfswerten konnte in verschiedenen Studien nachgewiesen werden (Kramer 2013; Jones et al. 2015).

2 Untersuchungsgebiet, Daten und Methoden

Für die Ableitung und Identifikation von Gebäude- und Stadtstrukturtypen aus Satellitendaten wurden moderne Bildverarbeitungsmethoden sowie räumliche Analysefunktionen angewendet. Die Erhebung der Verbrauchsmuster erfolgte durch face-to-face-Fragebogenerhebung vor Ort.

2.1 Untersuchungsgebiet Kigali

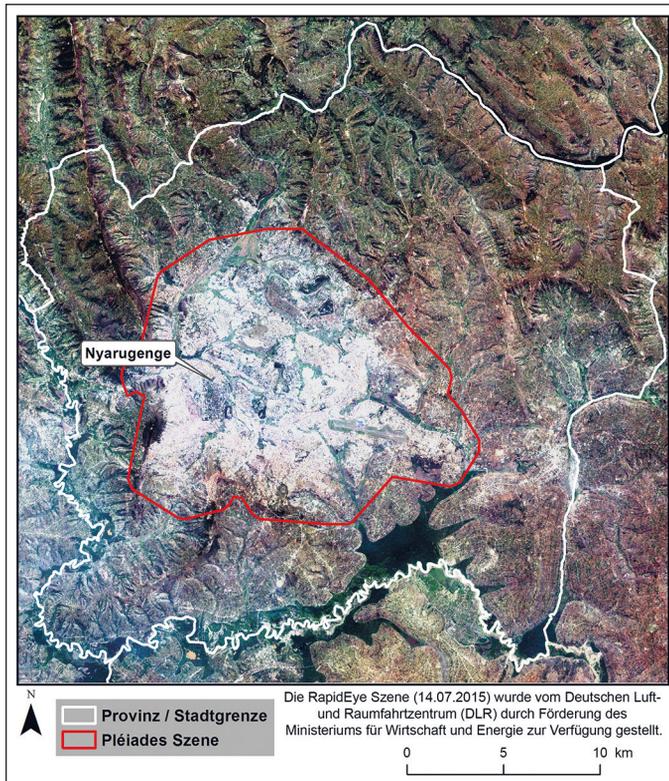


Abb. 1: Kigali und Abdeckung durch Satellitenaufnahmen (Quelle: eigene Abbildung)

Kigali ist die Hauptstadt von Ruanda. Es ist eine sich dynamisch entwickelnde Stadt mit einer Bevölkerung von 1 132 686 (2012) (NISR, MINECOFIN 2015). Die Struktur der Stadt ist heterogen. Das zentrale Geschäftsviertel befindet sich auf einem Plateau im Nyarugenge-Sektor (Abb. 1). Neue mittel- bis hochklassige Wohngebiete entstehen in der ganzen Stadt. Ungeplante Siedlungen verdichten sich weiter und dehnen sich in die ländlichen Gebiete der Stadt aus. Bewohner der ungeplanten Siedlungen ergänzen selbständig auch höherwertige Gebäude.

2.2 Datengrundlagen

Für den dicht bebauten, zentralen Teil der Stadt Kigali liegt eine Pléiades-Satellitenaufnahme vor (2015-08-09) (Abb. 1). Pléiades bietet Aufnahmen mit einer Auflösung von 70 cm im panchromatischen Kanal und 2,8 m für die 4 multispektralen Kanäle. Die physikalische Auflösung wird auf 50 cm bzw. 2 m umgerechnet (Gleyzes et al. 2012, 541). Für den umliegenden eher ländlich geprägten Raum war eine RapidEye-Szene (2015-07-14) verfügbar.

Um zur Kalibrierung und zur Validierung der Ergebnisse beizutragen, wurden in den Jahren 2014 bis 2016 Referenzinformationen für 1 074 Gebäude gesammelt. Die Referenzdatenerfassung beinhaltet Angaben zu: GPS-Position, Gebäudetyp, Gebäudehöhe, Dachmaterial, -farbe und -art. Die Auswertung erfolgt auf Blockebene, welche aus einem kombinierten Straßendatensatz der Stadtverwaltung und OpenStreetMap-Daten abgeleitet wurde.

2.3 Bildauswertung

Mehrere unabhängige Prozessierungsschritte waren notwendig, um aus den Pléiades- und RapidEye-Szenen die Landnutzung und Landbedeckung (LULC) abzuleiten, um Stadtstrukturen abzugrenzen.

2.3.1 Landnutzung und Landbedeckung

Eine objektbasierte Bildanalyse (OBIA) wurde ausgewählt, um LULC aus den Pléiades- und RapidEye-Szenen zu klassifizieren. Für die hochauflösende Pléiades-Szene wurde der Segmentierungsprozess durch einen Canny-Kantenoperator unterstützt. Die daraus resultierenden Bildsegmente wurden mit einem regelbasierten Ansatz klassifiziert. Als Eingangsparameter dienten Spektralinformationen, spektrale Indizes, topologische Regeln und es wurde ein thematischer Straßendatensatz in die Analyse miteinbezogen. Parallel dazu wurde die RapidEye-Szene ebenfalls durch einen regelbasierten Ansatz klassifiziert und zusätzlich mit einem Template-Matching-Ansatz kombiniert, der die charakteristische Wertverteilung von Einzelhäusern identifiziert.

2.3.2 Stadtstrukturtypen

Um einen übertragbaren Ansatz zur Ableitung von Stadtstrukturen in verschiedenen Klimazonen und kulturellen Räumen aus Fernerkundungsdaten zu ermöglichen, wurde ein modulares Schema erstellt, welches sich an die Arbeiten von Stewart & Oke (2012) und Bechtel & Daneke (2012) orientiert. Die Parameter für die Abgrenzung der Stadtstrukturtypen auf Blockebene wurden aus der LULC-Klassifikation abgeleitet und beinhalten unter anderem räumliche Indikatoren wie die mittlere Distanz von Gebäuden, die Anzahl der Gebäude pro Flächeneinheit, den Grundflächenindex und den Grünanteil je Flächeneinheit. Die Klassifikation erfolgt über einen Support-Vector-Machine basierten Ansatz, der sich noch über Schwellwerte anpassen lässt.

2.3.3 Gebäudetypen

Aus dem LULC-Ergebnis der Pléiades-Szene wurden die Gebäudegrundrisse extrahiert, generalisiert und Artefakte entfernt. Vorliegende Katasterdaten haben dazu beigetragen,

zwischen adjazenten Gebäuden mit ähnlichem Dachmaterial zu unterscheiden. Ohne die Katasterdaten sind Einzelgebäude in Blockbebauung, Doppelhaushälften und dichter ungeplanter Bebauung mit identischen Dachmaterialien auch visuell nur schwer zu identifizieren. Mittels den Stadtstrukturen sowie regelbasierten Abfragen wurden Gebäude-Archetypen bestimmt. Der Datensatz wurde manuell nachbearbeitet.

2.4 Haushaltsbefragung

Das Ziel der Haushaltsbefragung besteht in der Erhebung von Daten wie der Nachfrage an Energie, Nahrung und Wasser sowie zur Erzeugung von Abwässern und Abfällen auf Haushalts- und Personenebene. Die Befragungen wurden mittels eines digitalen Fragebogens in zwölf repräsentativen Testgebieten durchgeführt, wobei in jedem Testgebiet 60 Haushalte befragt wurden.

3 Ergebnisse

Für Kigali wurden 5 740 Blöcke nach der vorgestellten Methodik klassifiziert. Die Stadtstrukturen bilden die Morphologie der Stadt ab (Abb. 2). Die Klasse „Compact/large“ spiegelt vor allem den Central Business District der Stadt wider. „Compact/small“ dagegen die mit Hütten und einfachen Gebäuden dicht bebauten Blöcke in zentralen Lagen. „Open/small“ zeigt dieselben Gebäude an steilen Hängen oder im peri-urbanen Raum an.

Zusammen mit den Gebäude-Archetypen (Abb. 3) kann so die Stadtmorphologie abgebildet werden. Die Detektion von Gebäuden mit der RapidEye-Aufnahme erreichte eine Genauigkeit von 83,3 % (ohne Typisierung). Für den zentralen Bereich mittels der sehr hoch aufgelösten Pléiades-Aufnahme wurden alle Referenzgebäude erfasst und die Gesamtgenauigkeit der Gebäude-Archetypen-Klassifikation erreichte 91 %.

Die Verschneidung der Gebäudetypologie mit den Ergebnissen der Haushaltsbefragung zeigt, dass der durchschnittliche jährliche Energieverbrauch Gebäudetyp „Rudimentary“ am geringsten ist und 79 kWh pro Kopf und Jahr beträgt (Tab. 1). Im Gegensatz dazu zeigt der „Villa-Type“ einen nahezu 9-fachen Wert. Flüssiggas (LPG) ist mit einer durchschnittlichen jährlichen Nutzung von 2 426 kWh pro Kopf der dominierende Energieträger im „Local Type Apartment“. Ansonsten ist der primäre Energieträger Kohle.

Die Haushalte der Kategorie „Local Type Apartment“ haben mit 341 Litern pro Tag den höchsten täglichen Wasserverbrauch pro Bewohner (Tab. 2). Der Durchschnitt unserer Stichprobe in Kigali liegt bei 132 Liter pro Tag und Bewohner. Die durchschnittlichen Ausgaben liegen bei 2.288 Ruanda-Franc (RWF) pro Monat und Bewohner (entspricht derzeit ca. 2,48 Euro).

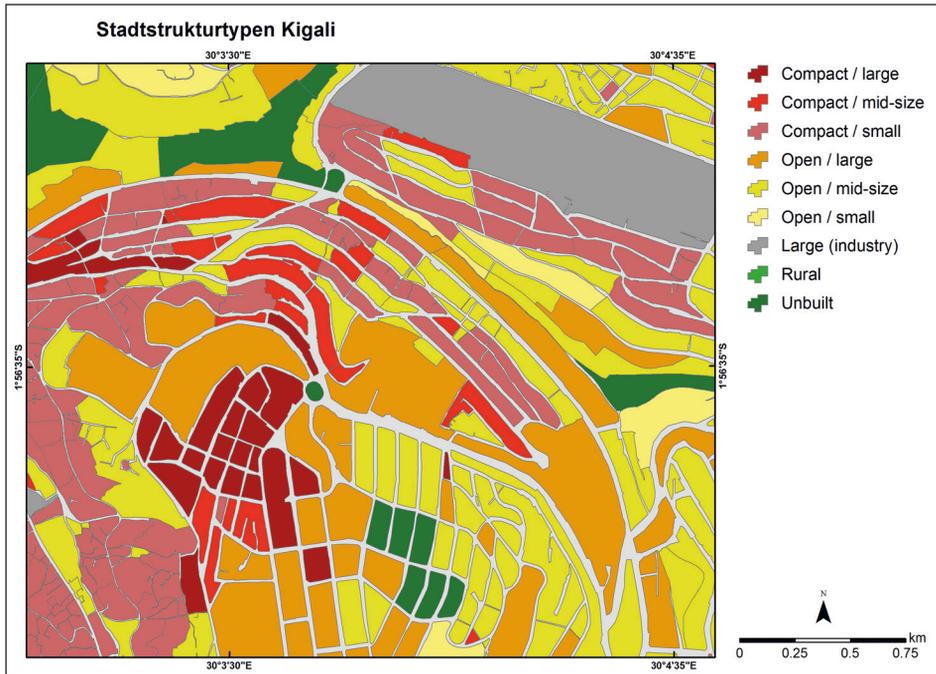


Abb. 2: Stadtstrukturtypen je Block; Ausschnitt Nyarugenge (Quelle: eigene Darstellung)

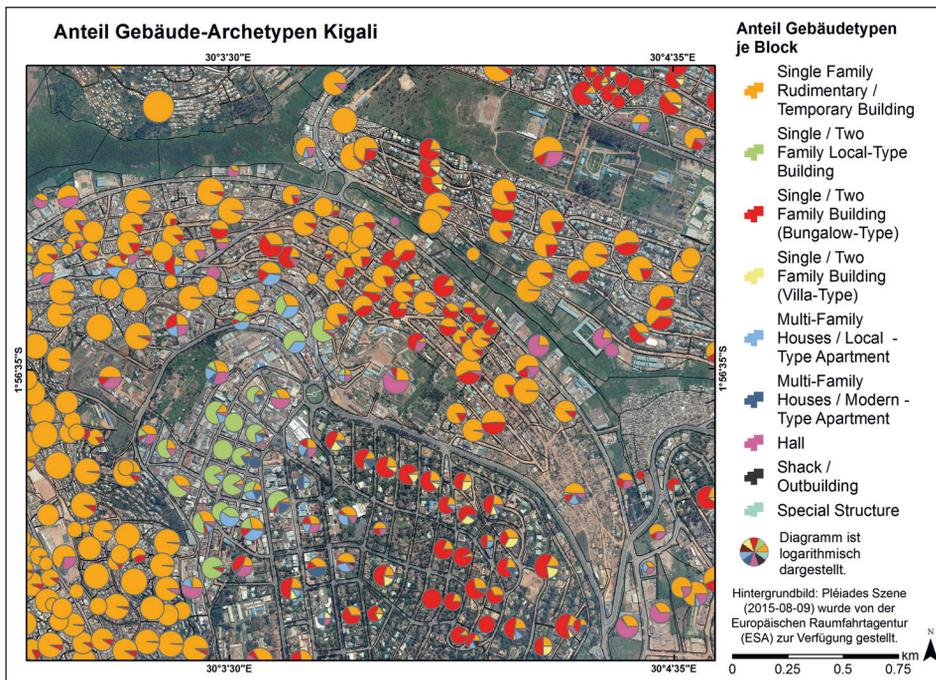


Abb. 3: Anteil der Gebäudetypen je Block; Nyarugenge (Quelle: eigene Darstellung)

Tab. 1: Der durchschnittliche Energieverbrauch in kWh je Bewohner (cap) im Jahr (a) je Gebäudetyp in Kigali (Quelle: eigene Bearbeitung)

Gebäudetyp (Arbeitsname)	Strom	LPG	Kohle	Summe
	[kWh*cap-1*a-1]			
Single Family Rudimentary Building	79	165	1 290	1 534
Single/Two Family Building (Bungalow-Type)	530	355	1 532	2 417
Single/Two Family Building (Villa-Type)	689	419	1 329	2 437
Local Type Apartment	442	2 426	0	2 868

Tab. 2: Der durchschnittliche Wasserverbrauch je Einwohner (cap) in Liter (l) pro Tag (d) und die monatlichen (m) Ausgaben je Gebäudetyp in Kigali (Quelle: eigene Bearbeitung)

Gebäudetyp (Arbeitsname)	Verbrauch	Ausgaben
	[l*cap-1*d-1]	[RWF*cap-1*m-1]
Single Family Rudimentary Building	42	759
Single/Two Family Building (Bungalow-Type)	254	4 126
Single/Two Family Building (Villa-Type)	302	5 651
Local Type Apartment	341	4 700

4 Fazit

Mit dem hier beschriebenen methodischen Ansatz lässt sich die Stadtmorphologie darstellen und quantifizieren. Die Detektion von Gebäuden im ländlichen Bereich mit einer RapidEye-Aufnahme erreichte eine Genauigkeit von 83,3 %. Für den zentralen Bereich konnten mit der Pléiades-Aufnahme und manueller Nacharbeit alle Gebäude erfasst werden. Die Gesamtgenauigkeit der Klassifikation in Gebäude-Archetypen liegt bei 91 %. Die erhobenen räumlichen Daten zu Stadtstruktur liegen in vielen Städten des Globalen Südens nicht vor und können damit in vielen Bereichen der Planung und Statistik Anwendung finden.

Die Verknüpfung mit den Ergebnissen der Haushaltsbefragung zeigt, dass die Soziökonomie und der Gebäudetyp einen großen Einfluss auf die Bedarfs- und Verbrauchsmuster haben. In Kombination mit den nutzerspezifischen Bedarfs- und Verbrauchswerten aus den Haushaltsbefragungen lassen sich Basiswerte für die Planung von Versorgungsinfrastrukturen und Wohngebäuden ableiten.

5 Literatur

Aytekin, Ö.; Erenler, A.; Ulusoy, İ; Düzgün, Ş. (2012): Unsupervised building detection in complex urban environments from multispectral satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Vol: 33 (7): 2152-2177.

- Bechtel, B.; Daneke, C. (2012): Classification of Local Climate Zones Based on Multiple Earth Observation Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol: 5 (4): 1191-1202.
- Chen, J.; Wang, C.; Zhang, H.; Wu, F.; Zhang, B.; Lei, W. (2017): Automatic Detection of Low Rise Gable-Roof Building from Single Submeter SAR Images Based on Local Multilevel Segmentation. *Remote Sensing*, Vol: 9 (3): 263.
- Comber, A.; Umezaki, M.; Zhou, R.; Ding, Y.; Li, Y.; Fu, H.; Jiang, H.; Tewkesbury, A. (2012): Using shadows in high-resolution imagery to determine building height. *Remote Sensing Letters*, Vol: 3 (7): 551-556.
- Gleyzes, M. A.; Perret, L.; Kubik, P. (2012): Pleiades System Architecture and main Performances. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1: 537-542.
- Hecht, R.; Meinel, G.; Buchroithner, M. (2015): Automatic identification of building types based on topographic databases – a comparison of different data sources. *International Journal of Cartography*, Vol: 1 (1): 18-31.
- Heiden, U.; Heldens, W.; Roessner, S.; Segl, K.; Esch, T.; Mueller, A. (2012): Urban structure type characterization using hyperspectral remote sensing and height information. *Landscape and Urban Planning*, Vol: 105 (4): 361-375.
- Höfer, R.; Banzhaf, E.; Ebert, A. (2009): Delineating urban structure types (UST) in a heterogeneous urban agglomeration with VHR and TerraSAR-X data. *Joint Urban Remote Sensing Event 2009*, 1-7.
- Jones, R. V.; Fuertes, A.; Lomas, K. J. (2015): The socio-economic, dwelling and appliance related factors affecting electricity consumption in domestic buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol: 43: 901-917.
- Kramer, M. G. (2013): *Our Built and Natural Environments: A Technical Review of the Interactions Among Land Use, Transportation, and Environmental Quality*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 148 S.
- Meinel, G.; Hecht, R.; Herold, H. (2009): Analyzing building stock using topographic maps and GIS. *Building Research & Information*, Vol: 37 (5-6): 468-482.
- NISR – National Institute of Statistics of Rwanda (2014): *Integrated Household Living Conditions Survey 4 (EICV4)*.
<http://www.statistics.gov.rw/datasource/integrated-household-living-conditions-survey-4-eicv-4> (Zugriff: 15.05.2017).
- NISR – National Institute of Statistics of Rwanda; MINECOFIN – Ministry of Finance and Economic Planning (2015): *Rwanda Fourth Population and Housing Census 2012. District Profile: Nyarugenge*. National Institute of Statistics of Rwanda (NISR, Rwanda), Ministry of Finance and Economic Planning (MINECOFIN, Rwanda), Kigali, Rwanda, 99 S.
- Sagashya, D. G. (2014): *Launching the new Rwanda basemap 1:50 000*. Presentation at: ESRI GIS-day Kigali, Rwanda, Rwanda Natural Resources Authority – RNRA.

- Singh, G.; Jouppi, M.; Zhang, Z.; Zakhor, A. (2015): Shadow based building extraction from single satellite image. Proc. SPIE 9401, Computational Imaging XIII, 9401, 15, San Francisco, California, United States, 15 S.
- Stewart, I. D.; Oke, T. R. (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol: 93 (12): 1879-1900.
- UN-HABITAT (2016): World Cities Report 2016: Urbanization and Development – Emerging Futures. UN-HABITAT, Nairobi, Kenya, 262 S.
- Wang, S.; Tian, Y.; Zhou, Y.; Liu, W.; Lin, C. (2016): Fine-Scale Population Estimation by 3D Reconstruction of Urban Residential Buildings. Sensors (Basel), Vol: 16 (10): 1755.
- Wurm, M.; Taubenböck, H; Dech, S. (2010): Quantification of urban structure on building block level utilizing multisensoral remote sensing data. SPIE Europe Remote Sensing, 7831, 78310H-78310H-12, Toulouse, Frankreich, 12 S.