



## Urbane Luftverschmutzung am Beispiel einer afrikanischen Großstadt

Sascha Henninger ([henninger@rhrk.uni-kl.de](mailto:henninger@rhrk.uni-kl.de)), TU Kaiserslautern, Kaiserslautern

### Abstract

Kigali, die Hauptstadt des äquatorialafrikanischen Staates Ruanda, kann unter vielerlei Gesichtspunkten als eine typische Stadt des subsaharischen Afrikas betrachtet werden. Nicht zuletzt der hohe Motorisierungsgrad und der hohe Anteil an verfeuertem Holz, Dung und Kerosin sorgen für eine permanent zunehmende Verschmutzung der urbanen Atmosphäre. Verstärkt wird die lufthygienische Situation durch sich verändernde klimatische Verhältnisse in den letzten Jahren, was dazu führt, dass sowohl in den Tag- als nunmehr auch in den Nachtstunden, die von der WHO postulierten Grenzwerte für eine Vielzahl von Luftinhaltsstoffen (u.a. PM<sub>10</sub>) deutlich überschritten werden.

### 1. Einleitung

Kigali (1°57'S, 30°04'E), Hauptstadt des äquatornahen tropischen Berglandes Ruanda, weist, ähnlich anderer Millionenstädte im subsaharischen Afrika, eine sehr schnell wachsende Bevölkerung auf. Ende 2009 wird Kigali wohl deutlich die 1-Million-Einwohner-Grenze überschritten haben. Mit steigender Bevölkerungszahl wächst auch das Problem der Luftverschmutzung. Der Grad der Motorisierung nimmt zu, vor allem mit Fahrzeugen, die keinerlei technischem Standard mehr genügen [1],[2],[3]. Zum Kfz-Verkehr gesellt sich ein weiterer Emittent, der private Hausbrand. Über die Verbrennung von Holz, Dung und Kerosin in einfachen Öfen und auf offenen Feuerstellen gelangen zusätzlich luftbelastende Stoffe in die Stadtatmosphäre.

Das gesamte Staatsgebiet von Ruanda ist durch ein ausgeprägtes Relief charakterisiert, was sich auch in Kigali widerspiegelt. Die Kuppenlagen der Hauptstadt stellen die Gunstgebiete dar. Dort finden sich Einkaufs- und Geschäftsviertel, die Regierungs- und Diplomatenviertel, sowie deren Wohnbereiche. Hier herrscht während der Tagstunden die höchste Verkehrsdichte. Entlang der Berghänge und im Tal, den sog. „Marais“, befindet sich der Wohn- und Lebensraum der ärmeren Bevölkerung. Topographie und Meteorologie bedingen nun, dass während autochthoner Wetterlagen dort, wo die meisten Menschen leben, die höchsten Konzentrationen unterschiedlichster Luftschadstoffe erfasst werden können.

### 2. Das ReCCiR-Projekt

Die Analyse der lufthygienischen Verhältnisse im Zusammenhang mit den meteorologischen Gegebenheiten ist ein Teil des ReCCiR-Projektes (Recent Climate Change in Rwanda), das sich mit den Veränderungen der klimatischen Bedingungen in Ruanda im Hinblick auf den globalen Klima-

wandel beschäftigt [4]. Schwerpunkt ist die Bewertung der Auswirkungen der lufthygienischen Situation und der damit einhergehenden gesundheitlichen Belastung der Bevölkerung [5].

### 3. Untersuchungsmethode

Erste Untersuchungen zur Lufthygiene wurden 2008, vergleichende Messungen in 2009 durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass episodisch auftretende meteorologische Verhältnisse zusätzliche Auswirkungen auf die ohnehin angespannte lufthygienische Situation haben. Neben Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Windrichtung und Windgeschwindigkeit wurde Feinstaub an drei kontinuierlich messenden Stationen innerhalb des Stadtgebietes erfasst (Abb.1). Ergänzend wurde eine Messstrecke durch die Stadt entworfen. Die Messroute wurde in verschiedene Streckenabschnitte unterteilt, die unterschiedliche Flächennutzungen (Wohn-, Geschäfts-, Industrieviertel etc.) aufwies [6]. Der Feinstaub wurde mit dem DustTrak 8534 DRX-Aerosolmonitor registriert, der nicht nur eine schnelle Analyse der Partikelkonzentrationen ermöglicht, sondern auch eine Aufschlüsselung der unterschiedlichen Fraktionsgrößen (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>). Die mobilen Messungen wurden zu drei unterschiedlichen Messzeiten durchgeführt (09.00 Uhr - 10.00 Uhr; 16.00 Uhr - 17.00 Uhr; 02.00 Uhr - 03.00 Uhr). Insgesamt erfolgten 30 mobile Messungen.

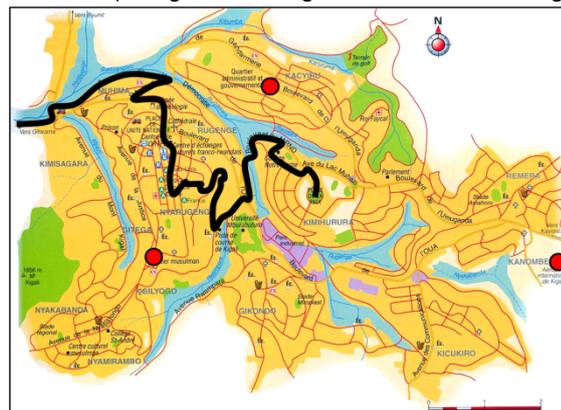


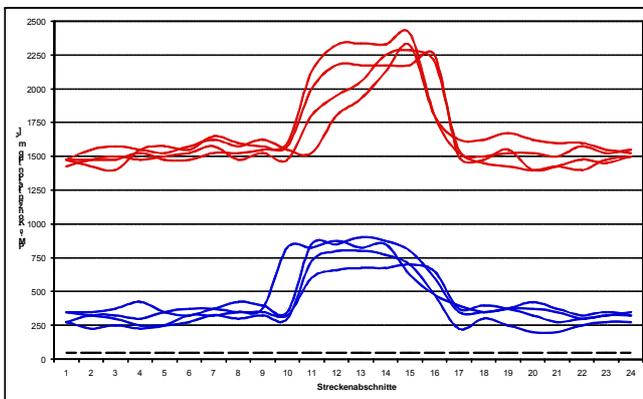
Abb.1 (→ [Grafik vergrößern](#)) Karte des Stadtgebietes von Kigali. Rote Punkte = stationäre Messungen; schwarze Linie = mobile Messstrecke

### 4. Ergebnisse

#### 4.1 Feinstaub in der bodennahen urbanen Atmosphäre

Die Ergebnisse der Feinstaubanalyse in Kigali treten nochmals deutlicher hervor, wenn zum Vergleich der von der WHO postulierte tägliche Kurzzeitgrenzwert von 50 µg m<sup>-3</sup> ergänzend in die Abbildungen 2 und 4 eingetragen wird (gestrichelte Linie) [7]. Exemplarisch werden die Ergebnisse

der PM<sub>10</sub>-Untersuchung dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Messungen in den Morgenstunden geringere Konzentrationen aufweisen als die Messfahrten am Nachmittag. Auch wenn sowohl in Abb. 2 als auch Abb. 3 nicht von geringen Werten gesprochen werden kann. In Abhängigkeit des Streckenabschnittes variieren die Konzentrationen zwischen 175 µg m<sup>-3</sup> und 900 µg m<sup>-3</sup> (Abb. 2, blaue Linien). Der Verlauf der Route ist anhand der erfassten Werte sehr gut nachzuvollziehen. Die höchsten Konzentrationen werden im Bereich der Streckenabschnitte 10 bis 16 erreicht, wo die Messstrecke auf die Kuppe führt, entlang des durch den Kfz-Verkehr hochfrequentierten Innenstadtbereiches. Vergleichbar mit den Morgenstunden weisen die Messungen der Nachmittagsstunden einen spiegelbildlichen Verlauf auf. Jedoch steigen die PM<sub>10</sub>-Werte auf 1.400 µg m<sup>-3</sup> bis >2.000 µg m<sup>-3</sup> an (Abb. 2, rote Linien).



**Abb. 2** (→ [Grafik vergrößern](#)) Verlauf der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen entlang der Messstrecke durch das Stadtgebiet von Kigali; blaue Linien = vormittags, rote Linien = nachmittags

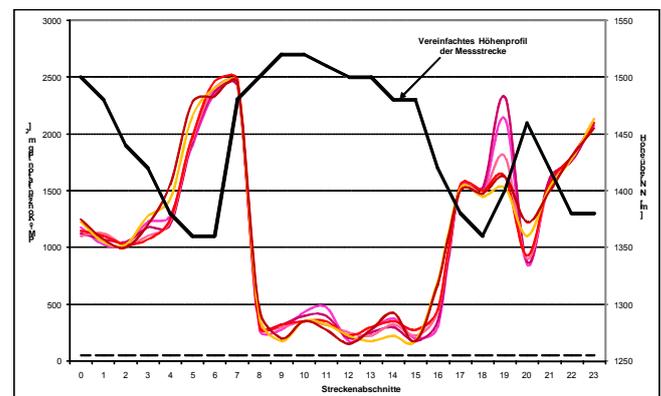
Dies bedeutet letztendlich, dass der Luftaustausch im Innenstadtbereich so stark eingeschränkt ist, dass es nicht zu einer Verdünnung der Schadstoffe am Morgen kommt, sondern zu einer weiteren Akkumulation. Erstaunlicherweise werden die höchsten Konzentrationen dort gemessen, wo die Straße geteert und in einem recht guten Zustand ist. Ganz im Gegensatz zu Untersuchungen der Feinstaubkonzentration im Stadtgebiet von Ouagadougou (Burkina Faso) kann hier kein direkter Zusammenhang zwischen dem aufgewirbelten Staubpartikeln der ungeteerten Straßen und den hohen Konzentrationen festgestellt werden [8],[9]. Vielmehr ergibt sich hier ein eindeutiger Hinweis auf die verheerende Situation der Kraftfahrzeuge. Mittels stationärer und mobiler Messungen konnte eindeutig dargelegt werden, dass die Feinstaubsituation in Kigali als überaus angespannt bezeichnet werden muss. Da sowohl in den Vierteln der Wohlhabenden als auch der armen Bevölkerung beim PM<sub>10</sub> die Grenzwerte der WHO um ein Vielfaches überschritten werden, kann dies als Indiz dafür angesehen werden, dass nicht der Kfz-Verkehr allein, sondern auch der private Hausbrand zu einer fatalen Verschmutzung der urbanen, bodennahen Atmosphäre beiträgt.

Zugespielt wird die lufthygienische Situation während gut ausgeprägter Strahlungs Nächte. Aufgrund hoher Lufttemperaturen und einer intensiven direkten Solarstrahlung konnten sich die urbanen Oberflächen besonders stark erwärmen, was aufgrund des höheren Versiegelungsgrades v.a. im „Oberstadtbereich“ erfolgte. In der ersten Nachthälfte konnte so eine intensive Kaltluftproduktion einsetzen, die als Kaltluftfluss v.a. in der zweiten Nachthälfte beobachtet werden konnte und von den Höhenlagen in die „Marais“ abgeflossen ist (Abb. 3).



**Abb. 3** (→ [Grafik vergrößern](#)) Dargestellt ist die Fließrichtung (blaue Pfeile) der Kaltluft aus der „Oberstadt“ in die „Marais“

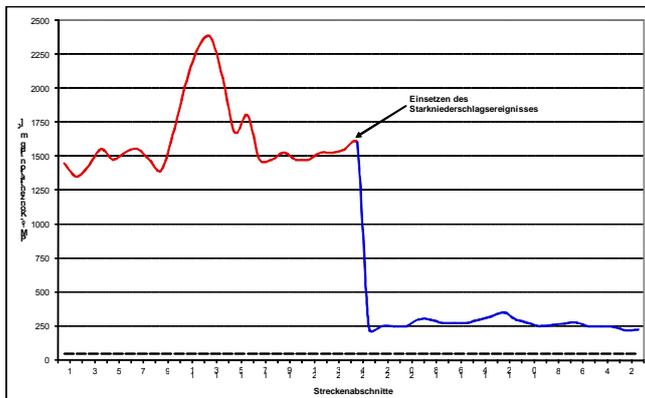
Beispielhaft ist dies in Abbildung 4 dargelegt. Sehr gut ist der inverse Verlauf zwischen dem Relief und dem Auf und Ab der Feinstaubkonzentrationen zu erkennen. Es zeigt sich, dass die höchsten PM<sub>10</sub>-Konzentrationen erreicht werden, wenn die auf der Höhe gebildete Kaltluft die verschmutzte Luft der „Oberstadt“ in die „Marais“ transportiert und dort Werte von 2.500 µg m<sup>-3</sup> erfasst werden können. Eine solche Wetter-situation sorgt dafür, dass die belastete Luft der „Oberstadt“ ins Tal entsorgt wird.



**Abb. 4** (→ [Grafik vergrößern](#)) Verlauf der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen entlang der Messstrecke durch das Stadtgebiet von Kigali während Strahlungsnachtstunden in Abhängigkeit der vorherrschenden Reliefstruktur

## 4.2 Regen bringt Segen

Dass Niederschlag einen „Washout-Effekt“ für belastete Luft hat, ist hinlänglich bekannt. In Gebieten mit sehr hohen Feinstaubkonzentrationen kann ein tropisches Starkregenereignis durchaus einen kurzzeitigen Segen darstellen. Wie aus Abbildung 5 zu ersehen ist, kam es zum Ende der Messfahrt zu einem Starkregenereignis, aufgrund dessen das Messfahrzeug gewendet und die Messstrecke in umgekehrter Folge nochmals abgefahren wurde. Der „Washout-Effekt“ bewirkte, dass es zu einer deutlichen Verringerung der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen um 1.300 µg m<sup>-3</sup> kommen konnte. Kurzfristig konnte so von einer Normalisierung der lufthygienischen Situation im Stadtgebiet von Kigali gesprochen werden.



**Abb. 5** (→ [Grafik vergrößern](#)) Verlauf der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen entlang der Messstrecke durch das Stadtgebiet von Kigali vor (rote Kurve) und nach (blaue Kurve) einem Starkregenereignis

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Erste Untersuchungen zur lufthygienischen Situation in Ruandas Hauptstadt Kigali haben offenbart, dass die Luftverschmutzung kaum mehr nachvollziehbare Werte erreicht. Die Betrachtung des Feinstaubes zeigt, dass die durchschnittlichen Tageswerte mit rund 1.000 µg m<sup>-3</sup> die Grenzwerte der WHO weit überschreiten. Damit stellt allein der Feinstaub eine immanente gesundheitliche Gefährdung für die Bevölkerung dar. Forciert wird die durch den Menschen verursachte Verschmutzung der urbanen Atmosphäre durch den Stadtklimaeffekt, der bewirkt, dass es zu zunehmend höheren Temperaturen und einem verringerten Luftaustausch kommt. Dies resultiert in einer fortschreitenden Akkumulation luftverunreinigender Stoffe. Die Analyse weiterer Luftinhaltsstoffe soll nun zeigen, inwieweit auch diese ein gesundheitsgefährdendes Potenzial aufweisen. Ergänzend dazu wird eine Analyse der lufthygienischen Situation im Inneren der Lehmhütten durchgeführt [10]. Die Messperiode wird auf ein Jahr ausgeweitet, um einen besseren Überblick über die Veränderungen der lufthygienischen Situation zu erhalten, u.a. durch den Wechsel zwischen Trocken- und Regenzeiten.

## Literatur

- [1] Han, X., Naeher, L.P. (2006): A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. *Environmental International*, 32 (1), 106-120.
- [2] Baumbach, G., Vogt, U., Hein, K.R.G., Oluwole, A.F., Ogunsola, O.J. und H.B. Olaniyi (1995): Air pollution in a large tropical city with a high traffic density – Results of measurements in Lagos, Nigeria. In: *The Science of the total Environment*, 169, 25-31.
- [3] Gwilliam, K. (2003): Urban transport in developing countries. In: *Transport Reviews*, 23, 106-120.
- [4] Henninger, S. (2009): Urban climate and air pollution in Kigali, Rwanda. In: *ICUC 2009*, 1038-1041.
- [5] Van Wijnen, J.H., Verhoeff, A.P., Jans, H.W. und M. Bruggen (1995): The exposure of cyclists, car driver and pedestrians to traffic-related air pollutants. In: *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 67, 187-193.
- [6] Henninger, S. (2005): Analyse der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen am Beispiel der Stadt Essen. *Essener Ökologische Schriften*, 23, Westarp Verlag Hohenwarsleben, 192 p.
- [7] WHO (2006): Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur-dioxide – Global update 2005 – Summary of risk assessment, Geneva, 22 p.
- [8] Linden, J. (2006): Urban Project – Urban climate and air pollution in Ouagadougou, Burkina Faso. In: *IAUC Newsletter*, Issue No. 20, 10-12.
- [9] Linden, J., Thorsson, S. und I. Eliasson (2008): Carbon monoxide in Ouagadougou, Burkina Faso – A comparison between urban background, roadside and intratraffic-measurements. In: *Water, Air and Soil pollution*, 188, 345-353.
- [10] Kousa, A., Oglesby, L., Koistinea, K., Kunzlib, N. und M. Jantunena (2002): Exposure chain of urban PM<sub>2.5</sub> – Associations between ambient fixed site, residential outdoor, indoor, workplace and personal exposures in four European cities in the EXPOLIS-study. In: *Atmospheric Environment*, 36, 3031-3039.

## Korrespondenzadresse

Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Sascha Henninger  
 Lehrereinheit Physische Geographie  
 Fachbereich A/RU/BI  
 Technische Universität Kaiserslautern  
 Pfaffenbergstr. 95  
 67663 Kaiserslautern  
 Email: [henninger@rhrk.uni-kl.de](mailto:henninger@rhrk.uni-kl.de)  
 Tel.: +49 (631) - 205 3087  
 Fax.: +49 (631) - 205 4726