

Bestimmung optimaler Stromnetzerweiterung in ländlichen Gebieten mithilfe von Routing-Algorithmen

Angel Naya Geiger^{1,2,3}, Catherina Cader¹

¹Reiner Lemoine Institut gGmbH, Berlin · angel.nayageiger@rl-institut.de

²Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE), Eberswalde

³Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (SGGW), Warschau

Zusammenfassung: Geoinformationstechnologien bieten weitreichende Perspektiven für die Bestimmung von Stromnetzerweiterungstrassen in ländlichen Räumen sowie deren Kosten und sind dadurch von grundlegender Wichtigkeit bei der Entscheidungsfindung in der Elektrifizierungsplanung. Unter Berücksichtigung verschiedener Landschaftscharakteristika können sowohl die monetär günstigsten, als auch die am wenigsten die Umwelt beeinflussenden Netzverläufe ermittelt werden. Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Open-Source-Modell welches auf der Anwendung von Routing-Algorithmen und 90 m aufgelösten Rasterdaten basiert.

Schlüsselwörter: Ländliche Elektrifizierungsplanung, Routing-Algorithmen, Open Source, R

Abstract: *Geoinformation technologies provide wide-ranging perspectives in determining expansion paths and its costs which is essential for decision making in electrification planning. Considering several landscape characteristics offers the creation of power grid paths with both least monetary cost and least environmental impact. The present paper describes a detailed open source solution for the planning of new power lines in rural areas by applying routing algorithms using raster data with a resolution of 90 m.*

Keywords: *Rural electrification planning, routing algorithm, open source, R*

1 Einleitung

Zugang zu Strom stellt besonders in ländlichen Gebieten im globalen Süden eine Schlüsselrolle für soziale sowie wirtschaftliche Entwicklung dar (NANKA-BRUCE 2010). Daher zählt die Sicherung des „Zugang[s] zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und zeitgemäßer Energie für alle“ (UN 2015) zu den Zielen nachhaltiger Entwicklung.

Während sich aktuelle Forschung zum Thema Stromnetzerweiterungspfaden überwiegend auf direkte Entfernungen zwischen den Bestimmungsorten bezieht (AKPAN 2015, KEMAU-SUOR et al. 2014, SZABÓ et al. 2011), bietet diese Arbeit einen Open-Source-Ansatz, der durch die Miteinbeziehung von Landschaftscharakteristika (Topographie und Landbedeckung) realitätsnähere und detailliertere Erweiterungstrassen erstellt. Mit dieser Betrachtung können Netzerweiterungen anderen Elektrifizierungsoptionen (Off-Grid-Systeme) gegenübergestellt werden. Dieses Modell ist am Beispiel des nigerianischen Bundesstaats Plateau erstellt und zielt darauf ab, eine Übertragbarkeit des Modells auf andere Gebiete durch Anpassen bestimmter Kenngrößen zu erreichen.

1.1 Ländliche Elektrifizierung in Nigeria

In Nigeria leben etwa 96 Millionen Menschen ohne Zugang zu Strom. Mit einer Elektrifizierungsrate von 37 % liegt die ländliche Elektrifizierung deutlich unter dem Anteil in urbanen Räumen (IEA 2015). Bevölkerungswachstum, ansteigende Nachfrage nach Strom, mangelnde Stromerzeugungskapazitäten und Regionen ohne Netzanschluss stellen die größten Herausforderungen dar.

1.2 Netzerweiterungsmodellierung für den nigerianischen Bundesstaat Plateau

Die vorgestellte Analyse bezieht sich auf den Bundesstaat Plateau. Der Name ist begründet mit der Lage auf einem Hochplateau von über 1.000 m über dem Meeresspiegel. Diese bergige Topographie erfordert eine besonders vorsichtige Planung der räumlichen Verläufe der Netzerweiterung.

Das zentrale Stromnetz in Plateau erstreckt sich nur über einen Teil des Staates und lässt viele Dörfer ohne Anschluss ans Stromnetz.

Ziel dieser Arbeit ist es, kostenoptimierte Netzerweiterungspfade für alle nicht angeschlossenen Dörfer vorzuschlagen. Im Unterschied zu den kürzesten Wegen berücksichtigt die Modellierung topographische Charakteristika wie die aus einem Höhenmodell abgeleitete Steigung um eine flachere Topographie zu bevorzugen, die Nähe zu Straßen, die einen einfacheren Bau und Instandhaltung ermöglicht sowie die Option vulnerable Gebiete zu definieren, die nur in Ausnahmefällen vom Netz überquert werden dürfen.

2 Methodik

2.1 Definition der anzuschließenden Orte

Der erste Bearbeitungsschritt besteht in der Aufnahme der an das Netz anzuschließenden Ortschaften. Da hier kein einheitlicher georeferenzierter Datensatz vorliegt, wurden Daten über Schulen, Wahllokale, Kommunenlisten und räumlich aufgelöste Bevölkerungsdaten kombiniert. Diese wurden mit einem Puffer von 500 m vergrößert und die entsprechende Bevölkerung bestimmt, welche anschließend mit der Gesamtbevölkerung skaliert wurde. Für jeden dieser Orte wird bestimmt, ob er bereits Zugang zu Strom hat. Für die Orte, in welchen dies nicht der Fall ist wurden deren Zentroide ermittelt und als zu verknüpfende Eingangswerte in die Netzerweiterungsmodellierung übernommen.

2.2 Aufbereitung eines Rasterdatensatzes zur Abbildung der Kosten

Die weiteren Verarbeitungsschritte basieren auf einem Raster, welches die Kosten, die das Durchqueren einer Zelle verursacht, für jede Zelle beinhaltet.

Hinsichtlich der Netzwerkerweiterung stellen Nähe zu Straßen und dem bestehenden Stromnetz zu begünstigende Faktoren dar. Um die durch die jeweilige Entfernung entstehenden Kostenunterschiede darzustellen, werden Straßen und Netze in diskreten Schritten gepuffert und die jeweiligen Kosten angepasst. Vulnerablen Gebieten wie beispielsweise Waldflächen

werden erhöhte Kosten zugewiesen. Die zuvor auf eine gemeinsame Auflösung von 90 m projizierten Datensätze werden mit einem erzeugten Raster identischer Ausmaße und Auflösung, das für jede Zelle des Untersuchungsgebietes denselben Kostenwert angibt, kombiniert um das Kostenraster zu erzeugen.

Das Modell ist in der Software R (R CORE TEAM 2015) entwickelt und basiert zum größten Teil auf den Paketen „raster“ (HIJMAN 2015), „gdistance“ (VAN ETEN 2015) und „fossil“ (VAVREK 2011).

Da das Bestimmen der kostengünstigsten Pfade auf der Graphentheorie basiert, wird ein Graph erzeugt indem das Kostenraster in ein Übergangsobjekt umgewandelt wird. Dieses Übergangsobjekt stellt eine quadratische Matrix dar deren Diagonale dem Wert der jeweiligen Zelle des Rasters, sowie Spalten- und Zellenname entspricht. Somit repräsentiert beispielsweise das Element der Übergangsmatrix, das sich in der fünften Spalte der fünften Zeile wiederfindet, die Wert der fünften Zelle des Kostenrasters. Zusätzlich beinhaltet diese Matrix die Beziehungen der einzelnen Zellen zu ihren Nachbarn. Da in dieser Studie die Moore-Nachbarschaft, die alle zumindest mit einer Ecke angrenzenden Zellen als Nachbarn definiert, angewandt wurde, haben alle Zellen, außer der sich im Randbereich befindlichen, acht Nachbarn. Die Übergangsmatrix stellt die Beziehungen der benachbarten Zellen dar und speichert die nicht bestehenden Nachbarschaftsbeziehungen als Nullwerte. So ist beispielsweise die fünfte Zelle, die die mittlere Zelle einer quadratischen Matrix mit neun Zellen darstellt, von acht Zellen benachbart, während die in den Ecken liegenden Zellen eins, drei sieben und neun nur Bezug zu drei Nachbarn aufweisen.

Die Werte dieses Übergangsobjekts stellen die Durchlässigkeit, welche dem Kehrwert der Mittelwerte benachbarter Zellenpaare des Kostenrasters entspricht, dar. Während die Mittelpunkte der Zellen des Übergangsobjektes die Knoten des Graphen repräsentieren, wird das Kantengewicht durch die Durchlässigkeit ausgedrückt (VAN ETEN 2015).

2.3 Berechnung des günstigsten Anschlusspfads

Auf Grundlage des zuvor erzeugten Übergangsobjekts, welches auf den bereits definierten Kostenfaktoren basiert, sowie des Punktdatensatzes der Zentroide der an das bestehende Netz anzuschließenden Ortschaften, wird eine Kosten-Distanzmatrix erstellt. Dabei werden unter Verwendung des Dijkstra Algorithmus die kostengünstigsten Pfade von jedem der Orte zu jeweils allen anderen Orten ermittelt.

Darauf aufbauend wird der minimale Spannbaum, welcher die direkte oder indirekte Verbindung aller Ort auf dem kostengünstigsten Pfad, also jene mit dem geringsten Kantengewicht des Netzwerks, darstellt, ermittelt. In der resultierenden Boolean-Matrix erhalten die als am kostengünstigsten identifizierten Verbindungen zwischen den Orten eine Eins, alle weiteren Verbindungen eine Null.

Abschließend werden in einem iterativen Prozess die zuvor ausgewählten kostengünstigsten Pfade, die den minimalen Spannbaum bilden, als räumliche Linien berechnet. Hierfür dienen abermals die Durchlässigkeitswerte der Übergangsmatrix als Grundlage. Die so entstandenen, auf den vorgegebenen Topographien basierenden Linien stellen die Voraussetzung für die in weiteren Schritten erfolgenden detaillierten Kostenvergleiche dar. bilden in weiteren Schritten die Grundlage für detaillierte Kostenvergleiche.

3 Ergebnisse

3.1 Bestimmung und Extraktion der anzuschließenden Orte

Durch Anwendung des beschriebenen Prozesses (2.1) konnten 1.926 anzuschließende Orte identifiziert werden (Abb. 1). Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass es einen sehr hohen Bedarf an Elektrifizierung in netzfernen Regionen gibt.

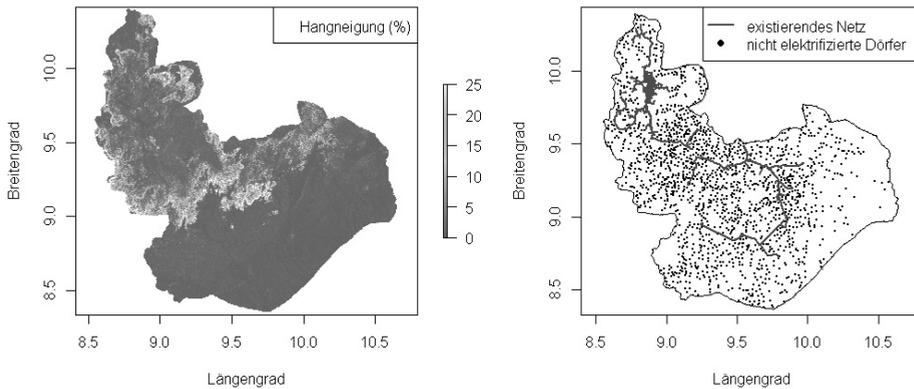


Abb. 1: Hangneigung (in %) im Untersuchungsgebiet (links) und existierendes Stromnetz und nicht angeschlossene Dörfer (rechts)

3.2 Kostenraster und Netzerweiterungspfade

Das resultierende Kostenraster (Abb. 3), das für jedes der auf 90 Meter aufgelösten Pixel einen Kostenwert von 750, ab- bzw. zuzüglich der Kosten für die berücksichtigten Faktoren, darstellt, zeigt deutlich die Einflüsse der berücksichtigten Faktoren auf die Durchlässigkeit der Zellen.

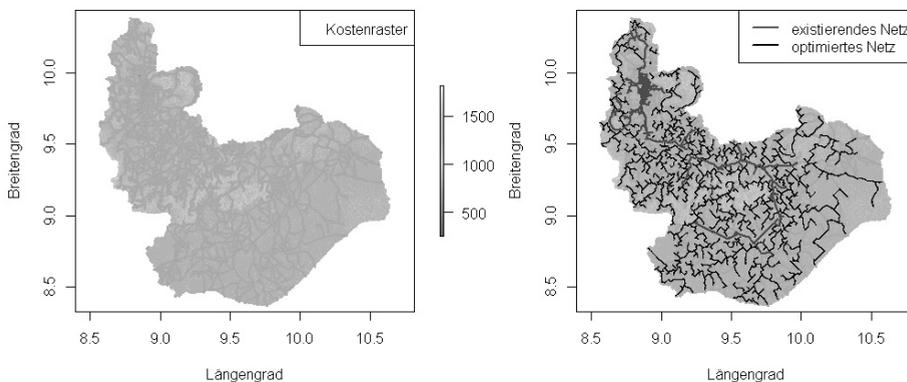


Abb. 2: Errechnetes Kostenraster (links) und daraus resultierendes, kostenminimiertes Pfadnetzwerk (rechts)

Während die Überquerung einer Waldfläche die Kosten um 50 % erhöht, werden dem bestehenden Netz keine Kosten (Wert = 0) zugerechnet. Die Berücksichtigung der Steigung des Geländes beeinflusst die Werte des Kostenrasters deutlich. So liegt der höchste erzeugte Wert von 1.925 signifikant über dem der in einem Waldgebiet ohne Steigung auftritt. Die Länge der erzeugten Netzerweiterungspfade beläuft sich auf etwa 13.600 Kilometer. Deutlich zu erkennen ist, dass der sich aus der Analyse der kostengünstigsten Pfade ergebende minimale Spannbaum von den dem Kostenraster zugewiesenen Limitierungen und Vergünstigungen beeinflusst wird (Abb. 2). So verlaufen die berechneten Netzwerkerweiterungspfade entlang des bestehenden Netzes und meiden vulnerable Gebiete, sowie starke Steigungen.

4 Diskussion

4.1 Vor- und Nachteile dieses Ansatzes gegenüber anderen Optionen

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik können Netzerweiterungspfade mit hoher Detailgenauigkeit erstellt werden. Die Pfade verbinden die anzuschließenden Orte nicht direkt auf dem kürzesten Wege per Luftlinie, sondern berücksichtigen lokale topographische Begebenheiten. Im Gegensatz zu den meisten GIS-Analysen benutzt die hier angewandte Methodik nicht die Reibung, also den Widerstand, den bestimmte Charakteristika des Kostenrasters darstellen, sondern deren Kehrwert, nämlich die Durchlässigkeit. Da in der dünnbesetzten Matrix nur die Beziehungen der benachbarten Zellen ohne die entstehenden Nullwerte gespeichert werden, verkürzen sich Verarbeitungsprozesse und -zeiten.

In der Diskussion über verschiedene Elektrifizierungsstrategien ist die Netzerweiterung bestehender zentraler Netze eine Option. Eine weitere Option stellt die Nutzung dezentraler Erzeugung und Verteilung ohne zentrale Übertragungsnetze dar. Um einen Vergleich dieser Optionen vorzunehmen, ist eine Betrachtung beider Optionen nötig (ZEYRINGER et al. 2015). Die vorgestellte Methodik ermöglicht es, detaillierte Kostenabschätzungen zum Netzausbau zu errechnen.

4.2 Weitere Verbesserungen

Anhand der akkumulierten Kostenwerte, die jedem ermittelten Netzerweiterungspfad zu Grunde liegen, können die Anschlusskosten jeder Ortschaft ermittelt werden. Diese dienen zur Entscheidungsfindung für welche der Ortschaften eine dezentrale Lösung der Netzerweiterung vorzuziehen ist. Dezentrale Off-Grid-Systeme kommen in Ortschaften für die die Netzanschlusskosten über einem Schwellwert der für die Installation eines Off-Grid Systems anzunehmenden monetären Kosten liegt, empfohlen werden.

Für die Allokation der Kosten für Teilstücke des erstellten Netzes, die mehrere Ortschaften anbinden, besteht weiterer Forschungsbedarf. Durch einen hierarchischen Aufbau des minimalen Spannbaums, der Ortschaften beispielsweise nach deren Bevölkerungszahl in absteigender Reihenfolge verbindet, können die monetären Kosten realitätsnäher bestimmt werden, da davon auszugehen ist, dass politische Entscheidungen bezüglich der Ausführung dieser Planung ebenfalls einer gewissen Hierarchie folgt. Des Weiteren böten sich Möglichkeiten die Bauplanung abschnittsweise durchzuführen, sowie die bei Elektrifizierungsplanung wich-

tigen Stromleitungsstärken bereits im Netzerweiterungsmodell darzustellen. Diese Erkenntnisse werden in weiteren Arbeitsschritten mit realen Kostendaten aus der Netzplanung und existierenden Netzverläufen validiert.

Danksagung

Diese Arbeit ist zum Teil entstanden aus der Kollaboration mit dem Nigerian Energy Support Programme (NESP), implementiert von der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH in Zusammenarbeit mit Federal Ministry of Power, Works and Housing (FMPWH) in Nigeria, finanziert durch die deutsche Regierung und die Europäische Union. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung von GIZ-NESP und dem nigerianischen FMPWH. Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen in diesem Artikel reflektieren nicht notwendigerweise die Sicht von GIZ-NESP und dem nigerianischen FMPWH. Zusätzlich danken die Autoren der Reiner-Lemoine Stiftung für die Unterstützung der Forschungsarbeit.

Literatur

- AKPAN, U. (2015), Technology options for increasing electricity access in areas with low electricity access rate in Nigeria. *Socio-Economic Planning Sciences*, 51, 1-12.
- HIJMANS, R. J. (2015), raster: Geographic Data Analysis and Modeling. <https://CRAN.R-project.org/package=raster> (17.04.2016).
- IEA (2015), WEO 2015 Electricity access database.
- KEMAUSUOR, F., ADKINS, E., ADU-POKU, I., BREW-HAMMOND, A. & MODI, V. (2014), Electrification planning using Network Planner tool: The case of Ghana. *Energy for Sustainable Development*, 19, 92-101.
- NANKA-BRUCHE, O. (2010), The socio economic drivers of electrification in sub-Saharan Africa. University of Surrey: Department of Economics.
- R CORE TEAM (2015), R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria <https://www.R-project.org>. (17.04.2016).
- SZABO, S., BODIS, K., HULD, T. & MONER-GIRONA, M. (2011), Energy solutions in rural Africa: mapping electrification costs of distributed solar and diesel generation versus grid extension. *IOPscience*.
- UN (2015), Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. The General Assembly: A /RES/70/1.
- ZEYRINGER, M., PACHAURI, S., SCHMID, E., SCHMIDT, J., WORRELL, E. & MORAWETZ U. B. (2015), Analyzing grid extension and stand-alone photovoltaic systems for the cost-effective electrification of Kenya. *Energy for Sustainable Development*, 25, 75-86.
- VAN ETEN, J. (2015), R Package gdistance: Distances and Routes on Geographical Grids. <https://cran.r-project.org/web/packages/gdistance/vignettes/gdistance1.pdf> (17.04.2016).
- VAVREK M. J. (2011), fossil: palaeoecological and palaeogeographical analysis tools. http://palaeo-electronica.org/2011_1/238/index.html (17.04.2016).