

Umfassende Analyse geeigneter Energieversorgungstechnologien für informelle Siedlungen in Sub-Sahara Afrika

Rebekka Besner¹, Kedar Mehta¹, Wilfried Zörner¹

¹ Institut für neue Energiesysteme (InES), Technische Hochschule Ingolstadt (THI), Ingolstadt

Abstract

Der Zugang zu Energiedienstleistungen charakterisiert sich im urbanen Raum im Vergleich zur ruralen Region in Sub-Sahara Afrika durch eine höhere Verfügbarkeit. Doch noch immer existieren städtische Gebiete, wie informelle Siedlungen, die von unzulänglicher Energie- bzw. Elektrizitätsversorgung und Energiearmut geprägt sind. Eine nachhaltige Verbesserung der Energieversorgung in diesen informellen Siedlungen kann dabei mithilfe verschiedener Systeme erreicht werden. Um eine ideale Systemlösung für die dort existierenden, energiebezogenen Herausforderungen zu identifizieren, wird die SWOT-Analyse angewendet. Dabei werden Schwächen, Stärken, Risiken und Chancen von vier Technologien evaluiert und verglichen: Netzerweiterung, Mini-Grids, Solar Home Systems und das Konzept des Energy-Hubs. Die Analyse zeigt, dass sich insbesondere der Energy-Hub zum Einsatz in informellen Siedlungen eignet und Antworten auf notwendige, erhöhte Sicherheitsvorkehrungen, unstrukturierte, dichte Bebauung und hohe Bevölkerungsfluktuation findet.

1. Einleitung

Allgemeines Bevölkerungswachstum, Abwanderung aus dem ländlichen Raum in Stadtgebiete, wirtschaftliche Vulnerabilität, unzulängliche öffentliche Verwaltung oder Stadtplanung sowie Knappheit an erschwinglichem und geeignetem Wohnraum sind die Hauptgründe für die Zunahme informeller Siedlungen (ISs) in Sub-Sahara Afrika (SSA) [1, 2]. Bei einem durchschnittlichen jährlichen Bevölkerungswachstum von etwa 2,5 % wird es in SSA auch in Zukunft ISs geben [3]. Diese Gebiete sind besonders von den Veränderungen durch den Klimawandel betroffen, denn sie liegen in für legale Bewohner zu unattraktiven, für Naturkatastrophen anfälligen Regionen. Zusätzlich sind die Bewohner von ISs aufgrund geringer finanzieller Mittel nur bedingt in der Lage, sich ausreichend auf die Konsequenzen der klimatischen Veränderungen vorzubereiten. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt einer Straße eines typischen ISs.



Abb. 1: Eine exemplarische Straße in einem informellen Viertel in Nairobi

Menschen in ISs leben meist ohne oder mit nur mangelhaftem Zugang zu grundlegender Versorgung: Energie, Wasser, sanitäre Einrichtungen und Bildung [4]. Dabei sind die Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Energiesektor entscheidend. Denn Energie ist ein essenzieller Parameter für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung eines Gebietes und beeinflusst gleichzeitig die übrigen genannten Bereiche. Trotz höherer Elektrifizierungsraten in städtischen Gebieten (z. B. über 90 % in Kenia) im Vergleich zum ländlichen Raum, stehen die Bewohner von ISs vor drei grundlegenden, energiebezogenen Herausforderungen: Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit von Energie (-dienstleistungen) und Energiearmut.

Verfügbarkeit: Oftmals befinden sich ISs nahe dem legalen Stromnetz. Aufgrund hoher Anschlusskosten, illegaler Elektrizitätsversorgung durch informelle Stromversorger und des illegalen Status der Bewohner, wird diesen häufig eine legale Verbindung zum nationalen Stromnetz verwehrt. Auch öffentliche Services wie Straßenbeleuchtung sind in ISs nicht flächendeckend vorhanden: Die dort herrschende hohe Kriminalitätsrate in Kombination mit schwacher Infrastruktur bringt eine prekäre Sicherheitslage mit sich [5], insbesondere für Frauen und Kinder. Zusätzlich kann die dichte, komplexe Bebauung, wie sie in Abb. 1 erkennbar ist, den Ausbau der lokalen Infrastruktur verhindern. So werden beispielsweise Haushalte in ISs in Mozambique zur Risikominimierung von Unfällen nicht elektrifiziert, weil diese wegen zu schmaler Straßen nicht mit Rettungsfahrzeugen zugänglich sind [6]. Auch in Ghana wird Haushalten der Anschluss verweigert, die Anforderungen an Verkabelung, Besitzverhältnisse und Bauvorschriften nicht einhalten [7].

Zuverlässigkeit: In ISs kommt es häufig zu Frequenzschwankungen und Ausfällen der Elektrizitätsversorgung. Diese erschweren lokalen (Klein-) Unternehmen, ihre Geschäfte zu führen. Durch Stromausfälle verursachte verkürzte Öffnungszeiten, Produktionsstopps von Gütern, Beschädigung von elektrischen Geräten oder fehlende Kühlung verderblicher Lebensmittel führen zu Umsatz- und Gewinneinbußen [8]. Auch Privatpersonen leiden unter unzuverlässiger Energieversorgung. Kindern bleiben beispielsweise Bildungsmöglichkeiten aufgrund mangelnder Beleuchtung verwehrt [7] oder Bewohner sind entmutigt, elektrische Geräte zu kaufen [9].

Energiearmut: Es existieren verschiedene Definitionen des Begriffs, die jedoch alle die gleich Kernaussage teilen: Die Energieversorgung ist nicht ausreichend, um die Grundbedürfnisse der Bevölkerung zu erfüllen. Energiearmut beginnt, wenn der Anteil der Energiekosten am Gesamteinkommen über 10 % liegt. In Nairobi, wo etwa zwei Millionen der 3,4 Millionen Einwohner in ISs leben, liegt dieser Anteil bei 26 %, mit einem Minimum von 15 % und einem Maximum von 34 % [8]. Das liegt damit deutlich über dem globalen Durchschnitt und verdeutlicht die herrschende Energiearmut. Folglich werden neben dem hohen Einkommensanteil auch Zeit und Arbeitskraft der Bewohner durch die Suche nach und den Erwerb von Energiequellen investiert [10]. González-Eguino [11] hebt zwei Aspekte der Energiearmut hervor, den Mangel an Energiedienstleistungen und den Mangel an Wahlmöglichkeiten. Der fehlende Zugang zu Energie führt nicht nur zu erschwerter Deckung von Grundbedürfnissen, wie der Zubereitung von Mahlzeiten, sondern verwehrt auch die Chance auf bessere Bildung, Informationsbeschaffung und Nutzung der digitalen Kommunikation. Der daraus resultierende Kompetenz- und Beteiligungsverlust an z. B. staatlichen oder politischen Entscheidungen verdeutlicht die fehlende Wahlmöglichkeit wie auch die finanziellen Einschränkungen der Betroffenen. Zusätzlich wirkt sich die Nutzung fossiler Energiequellen negativ auf die Gesundheit der betroffenen Personen aus, da das Kochen mit traditioneller Biomasse in Innenräumen Luftverschmutzung verursacht [12]. Die langfristig betrachtet hohen Preise fossiler Energien, die Abhängigkeiten von Importen sowie der lokale Ressourcenabbau beeinflussen das Wirtschaftswachstum und die Umwelt der betroffenen Personen und Gemeinschaften negativ [13, 14]. Die Weltbank, die das Multi-Tier Framework (vgl. Franz et al. [15, S. 26]) zur Bewertung von Energiearmut entwickelt hat, bestätigt, dass der Zugang zu Energie vielschichtig ist und nicht auf einen vorhandenen Stromanschluss reduziert werden kann [16, 17].

Werden ISs nicht in zukünftige Energieszenarien einbezogen, besteht die Gefahr, dass sich der

Übergang zur Versorgung mit erneuerbaren Energien (EE) verlangsamt und die Armut unter den bereits marginalisierten Bevölkerungsgruppen zunimmt [18]. Eine nachhaltige Unterstützung von lokalen Services und Unternehmen im Bereich der Energienutzung und -erzeugung ist daher notwendig, um die Lebens- und Umweltbedingungen der Bevölkerung von ISs zu verbessern und die Energiearmut zu reduzieren.

Hier besteht eine Forschungslücke in Bezug auf die Frage, welche Technologie die größte positive nachhaltige Wirkung für eine zuverlässige, erschwingliche, saubere und diebstahlsichere Energieversorgung in den benachteiligten Gebieten hat. Dabei ist es dringend erforderlich, Eigenschaften der verfügbaren Technologien und die Machbarkeit einer Umsetzung für eine moderne Energieversorgung von ISs zu untersuchen.

2. Methodik

Als Methodik dieses Artikels wird eine SWOT-Analyse genutzt, welche eine umfassende Bewertung der untersuchten Technologien ermöglicht. Mithilfe der SWOT-Analyse werden vier Aspekte eines Untersuchungsgegenstandes identifiziert: Stärken (Strengths), Schwächen (Weaknesses), Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats) [19]. Um das Ziel eines nachhaltigen Technologieeinsatzes zu erreichen, müssen Stärken ausgearbeitet, Schwächen ausgeglichen, Chancen genutzt und Risiken vermieden werden [20]. Abb. 2 zeigt einen Überblick der angewendeten SWOT-Analyse.

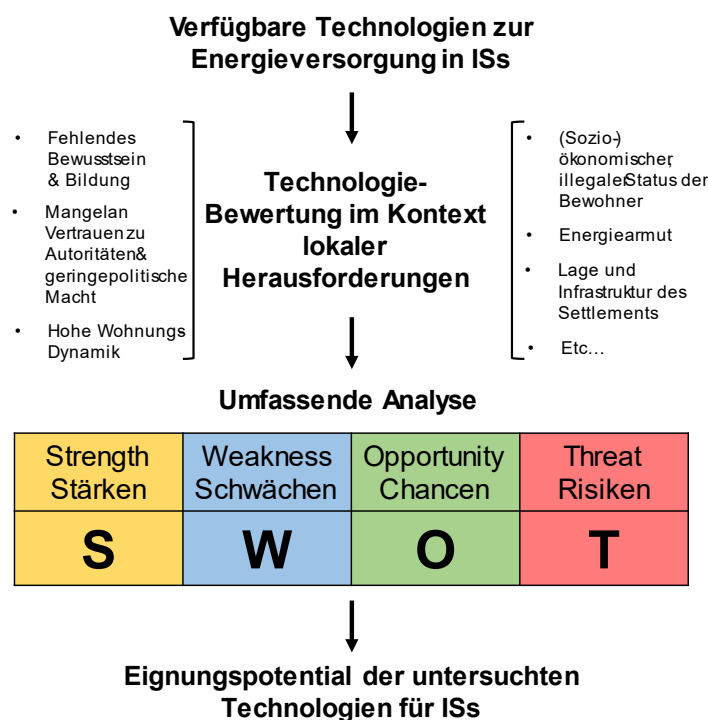


Abb. 2: Überblick über die angewandte Methodik im Rahmen dieses Artikels

Die Technologien, die sich als geeignet zur Verbesserung der Energieversorgung in ISs herausgestellt haben, werden in Kapitel 3 erläutert. Als Datengrundlage für die Analyse der Technologien dienen nach 2010 erschienene wissenschaftliche Studien. Zugrundeliegende Suchkriterien sind eine Kombination der Schlagworte *Informal Settlements*, *energy poverty*, *challenges*, *renewable energies*, *Sub Sahara Africa*, *ongrid*, *offgrid*, *energy services*, *electrification*. Der Fokus der Technologieanalyse liegt auf dem Ausmaß, inwieweit die Systeme auf die lokalen Herausforderungen reagieren können und in ISs integrierbar sind.

2.1 Stand der Technik

Guangul et al. [21] untersucht die Technologie Solarenergie umfangreich mithilfe einer SWOT-Analyse. Sowohl die von den Autoren identifizierten hohen Investitionskosten, der hohe Platzbedarf als auch die Notwendigkeit des Einsatzes von Energiespeichern für eine ununterbrochene Energieversorgung sind Argumente, welche auch bei dieser Analyse der verschiedenen Technologien zur Elektrifizierung von ISs bedeutend sind. Cader [22] charakterisiert die Netzstromversorgung und analysiert neben der Elektrifizierungsrate verschiedene Indikatoren zum Messen des Zusammenhangs zwischen Elektrifizierung und lokaler Unternehmensaktivität. Obwohl die zentrale, auf dem nationalen Stromnetz basierende Stromversorgung als günstig wahrgenommen wird, identifiziert die Autorin diverse Herausforderungen der Netzversorgung und beobachtet als Konsequenz einen Trend hin zu einer diverseren Energieversorgung mithilfe von dezentralen Inselnetzsystemen.

2.2 Neuheit der Studie

Die Art und Weise der Elektrifizierung abgelegener, ländlicher Gebiete mithilfe von Inselnetzen bzw. Mini-Grids auf Basis von EE, überwiegend der Photovoltaik, ist Gegenstand der aktuellen Forschung [23–31]. Hinsichtlich des Aspekts der Wirtschaftlichkeit erfolgt die Stromversorgung in Stadtgebieten vor allem durch Netzerweiterung und -verdichtung [32]. In ISs stößt diese Art der Elektrizitätsbereitstellung jedoch an ihre Grenzen: Die legale Stromversorgung wird nicht verbessert oder ganz abgebaut [33]. Gründe sind die Illegitimität der Bewohner, deren mangelnde finanzielle Mittel, geringe politische Macht [34], fehlendes Vertrauen zwischen Bewohnern und Autoritäten und die Existenz sogenannter Kartelle, welche illegale Verbindungen anbieten [33]. Deshalb wird im Folgenden der Betrachtungshorizont zur Elektrifizierung dieser Gebiete auf zusätzliche Lösungen, welche primär für den Einsatz im ländlichen Raum diskutiert werden, erweitert.

3. EE-basierte Lösungen zur Verbesserung der Energieversorgung

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei auf EE basierende, netzunabhängige Lösungen, die sich für die Verbesserung der Energieversorgung in ISs eignen, mit der Option der Erweiterung des nationalen Stromnetzes verglichen: 1) Solar Home System (SHS), 2) Mini-Grids, 3) Netzausbau und 4) Energy Hub. Abb. 3 gibt einen Überblick über die Einteilung der Systeme und deren im Rahmen dieses Artikels für SHS und Mini-Grids nach Franz et al. [15] definierte Systemgrößen.

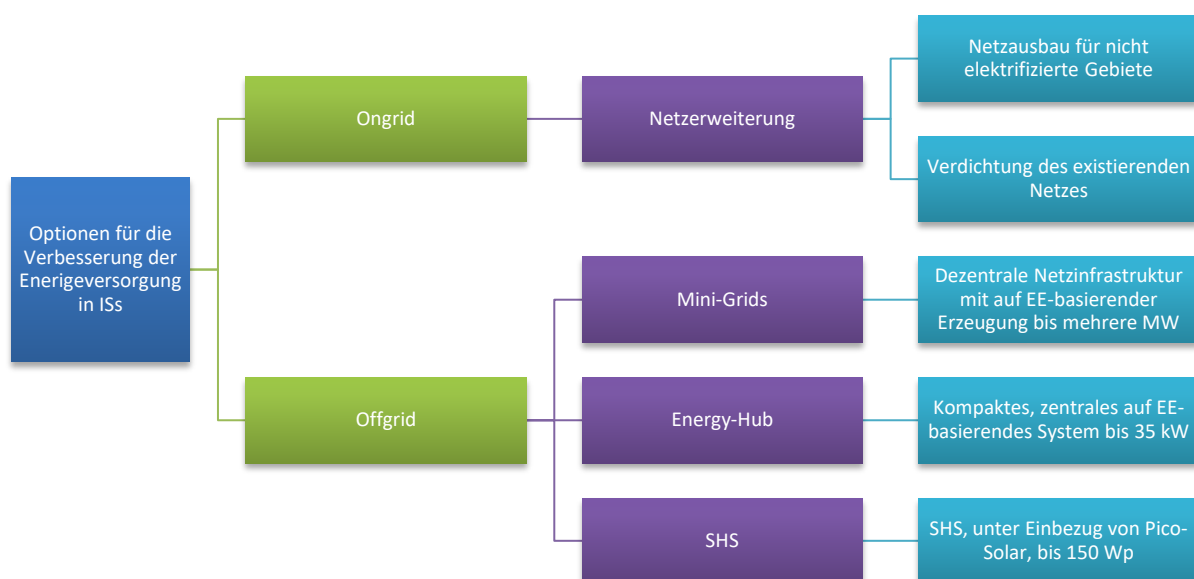


Abb. 3: Übersicht über im Rahmen des Artikels berücksichtigte Technologien zur Verbesserung der Energieversorgung in ISs

Auf die drei Systeme „Netzerweiterung“, „Mini-Grids“ und „SHS“ wird nicht näher eingegangen. Als „Energy-Hub“ wird ein zentrales, bedarfsabhängiges Energieversorgungssystem basierend auf Solarenergie und einem Batterie-Energiespeichern (BESS), definiert. Ein exemplarisches Design des Energy-Hubs wird in Abb. 4 dargestellt.



Abb. 4: Exemplarische Darstellung des Energy-Hubs

Im Gegensatz zu einem Mini-Grid bietet der Energy-Hub keine direkte Stromanbindung für Anwohner, sondern agiert als eine zentrale Anlaufstelle für Bewohner. Er ist in der Lage, nachhaltige Energiedienstleistungen zur Verfügung zu stellen. Solche Dienstleistungen sind z. B. die Bereitstellung eines Kühlraumes für Unternehmen mit verderblichen Lebensmitteln, die Energiebereitstellung für stromabhängige Unternehmen, eine Station zum Aufladen von Mobiltelefonen oder batteriebetriebenen Lampen. Das System kann off-grid oder am nationalen Stromnetz angeschlossen eine zuverlässige Energieversorgung gewährleisten und je nach Bedürfnissen der Bewohner des ISs für die jeweilige Community und lokale Unternehmen zusätzlich als Marktplatz, Treffpunkt oder Bildungszentrum dienen.

4. SWOT-Analyse der präsentierten Lösungen

In diesem Forschungsartikel wird eine umfassende Analyse der vier genannten Technologien (vgl. Abb.3) durchgeführt. Ziel ist es, zu identifizieren, welches System für den Einsatz in ISs mit den jeweiligen charakteristischen Herausforderungen am besten geeignet ist. Eine Übersicht über die Ergebnisse der SWOT-Analysen gibt Abb. 5, die Ergebnisse werden nachfolgend näher erläutert.

4.1 Natur des Settlements

Die Optionen Netzerweiterung und Mini-Grids benötigen Platz und Struktur zur Aufstellung von Strommasten, klare Besitzverhältnisse des zu bebauenden Grunds sowie Planungssicherheit und -zeit. Diese Voraussetzungen sind in ISs aufgrund ihrer Illegalität sowie deren komplexer Bebauung oftmals nicht gewährleistet. Deshalb müssen vor Verbesserung der Energieinfrastruktur häufig umfangreiche *Settlement Upgrading* Programme durchgeführt werden, welche Wasser- und Sanitäreinrichtungen sowie Abfallmanagement und breiten, asphaltierten Straßen zum Ziel haben [35]. Im Gegensatz zu den dezentralen Lösungen benötigt der Aufbau eines Energy-Hubs lediglich einen zentralen, offenen Platz. Gleichzeitig ist der notwendige Platz ein Risiko, da die dichte Bebauung in ISs die Akquise für potentielle Standorte erschwert.

Während SHS und der Energy-Hub leichter durch Sicherheitsvorkehrungen geschützt werden können, sind die Optionen Netzerweiterung und Mini-Grids aufgrund der dezentralen Struktur eher von Diebstahl, Manipulation durch illegale Verbindungen oder Vandalismus betroffen. Das erhöhte Risiko lässt potentielle Investoren möglicherweise vor einer Finanzierung dieser Projekte zurückschrecken. Sowohl im Falle des Einsatzes von Mini-Grids als auch der Netzerweiterung sind Anschlüsse an Gebäude gebunden, der Kundenstamm ist demnach verhältnismäßig starr. Die hohe Fluktuation der Bewohner in den Siedlungen erschwert die Versorgung. SHS können dagegen bei einem Umzug mitgenommen werden. Der Einsatz des Energy-Hubs benötigt keine offiziellen Dokumente wie

Wohnungs- oder Identitätsnachweis oder Verträge von Seiten der Siedlungsbewohner. Die Services des Energy-Hubs können abhängig von der finanziellen Mittelverfügbarkeit der Kunden flexibel gegen eine unmittelbare Bezahlung genutzt werden. Die Konzepte Energy-Hub und Mini-Grid können den Einbezug der Gemeinschaft in Betrieb und Instandhaltung (O&M) leisten, wodurch lokale Kapazitätsbildung und Arbeitsplätze entstehen können [8].

4.2 Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Energieversorgung

Der Ertrag einer SHS hängt von der Sonneneinstrahlung ab und ist daher durch eine begrenzte Verfügbarkeit gekennzeichnet. [36]. Dabei sind sie in der Lage, Lebensbedingungen innerhalb der TIER 1-2 (vgl. Multi-TIER Framework nach Franz et al. [15]) zu verbessern, indem Beleuchtung, ein Radio oder ein TV betrieben werden kann [26]. SHS können unbürokratisch erworben und ohne Planungsvorlauf schnell eingesetzt werden. Umsetzungsbarrieren der Politik oder Vorschriften, die die Installation von Mini-Grids behindern, fallen hier nicht ins Gewicht [37].

Die Netzerweiterung ermöglicht theoretisch eine zuverlässige Stromversorgung bis zu TIER 5. Mit einem jährlichem Stromausfall von bis zu 7 Stunden liegt z. B. Kenia jedoch deutlich über dem globalen Durchschnitt von 1,36 Stunden [38, 39]. Vergangene Versuche, Slum-Gebiete per Netzerweiterung zu elektrifizieren, sind gescheitert. Ein Beispiel dafür ist das Projekt der Weltbank und dem kenianischen Stromversorger KPLC im Mukuru-Slum [30,36,37]. Bereits entwickelte Strukturen illegaler Elektrizitätsversorger, sog. Kartelle, verhindern Energiesysteme, die deren Geschäftsmodell obsolet machen [7, 40]: Für Netzerweiterung und Mini-Grids besteht ein großes Risiko der Manipulation oder Sabotage durch diese Kartelle. Die zentrale Bauweise des Energy-Hubs ermöglichen die Integration höherer Sicherheitsmaßnahmen. Zudem agiert der Energy-Hub nicht als direkte Konkurrenz zu illegalen Versorgern, da hier parallel zum Netzbetrieb lediglich zusätzliche Energieservices angeboten und die Leistung eines Stromanschlusses für Haushalte nicht ersetzt werden. Ein Risiko des Hubs kann das Ausleihen von Geräten, wie Leuchtmitteln, sein, da der Produktkauf als attraktiver empfunden wird [41]. Vor allem Mini-Grids und der Energy-Hub werden hinsichtlich des vorab ermittelten Elektrizitätsbedarfs dimensioniert. Mini-Grids können, je nach energetischer Anforderung, einen energiebezogenen Lebensstandard von TIER 5 ermöglichen [15]. Die Energieversorgung durch den Energy-Hub unterscheidet sich dahingehend, dass Unternehmen unterstützt oder Haushalte versorgt werden: Während das Ausleihen von Leuchtmitteln, die Möglichkeit zum Aufladen von Mobiltelefonen oder die Eröffnung eines Internet-Cafés Bedürfnisse zwischen TIER 1 und 3 decken, können Kleinunternehmen zuverlässig und bis zu 24 Stunden am Tag von den Energieservices des Energy-Hubs profitieren, womit sog. *Productive Use Cases* (PUC) schnell und einfach unterstützt werden [42].

4.3 Energiearmut

Viele Bewohner nutzen traditionelle Technologien auf Basis fossiler Energieträger, wie Petroleum oder Holzkohle, da günstigere Alternativen und das Bewusstsein für die Vorteile nachhaltigerer Lösungen unzulänglich vorhanden sind [38]. Um die Energiearmut in ISs zu reduzieren, müssen potentielle Energiedienstleistungen für die Menschen erschwinglich sein. Wie das Mini-Grid Policy Toolkit [15, S. 20] darstellt, hängen die nicht-subventionierten Stromkosten für den Endkunden verschiedener Systeme von der Größe und Bebauungsdichte der Community, der Distanz zum nationalen Stromnetz, der Komplexität des Geländes und der ökonomischen Kraft ab. Die Elektrizitätskosten von SHS bleiben unabhängig dieser Faktoren relativ konstant und pro Kopf kostspielig in der Anschaffung. Dabei charakterisieren sie sich durch hohe Kapital- und geringe Betrieb- und Instandhaltungskosten [24]. Die Netzerweiterung für ISs ist wegen deren dichten Besiedelung in Verbindung mit einer großen Community und der geringen Distanz zum legalen Stromnetz aus ökonomischer Sicht am günstigsten. Erst mit zunehmender Ländlichkeit, also in Gemeinden mittlerer Dichte und höherer Entfernung zum Stromnetz sowie freier Fläche und hohem Potential an EE-Generation, werden Mini-Grids wirtschaftlicher als die Netzerweiterung [15]. Aus ökonomischer Sicht eignen sich diese dementsprechend weniger für den Einsatz in ISs. Die Kosten für einen Energy-Hub liegen unter vergleichbaren Mini-Grids, da für die zentrale Struktur keine dezentrale Verkabelung nötig ist.

	S	W	O	T
Netzerweiterung	<ul style="list-style-type: none"> Energiestandard bis TIER 5: Deckung eines hohen Strombedarfs mit unerheblicher Verbrauchsmenge & Anzahl an Kunden möglich [15] Direkter Stromanschluss für alle Kunden 	<ul style="list-style-type: none"> Settlement Upgrading erforderlich Langwieriger Planungsprozess & Flächenakquise der Infrastruktur Politischer Wille & Anerkennung der illegalen Bewohner erforderlich Hohe Anschlussgebühren Kein Einbeziehen der Bewohner in O&M, kein Potential für lokale Kapazitätsbildung 	<ul style="list-style-type: none"> Günstige Stromerzeugung in Gebieten mit hoher Bebauungsdichte, Kundenanzahl, geringer Distanz zum Stromnetz und geringer Geländekomplexität [15] 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Verwaltungskosten wegen hoher Bewohnerfluktuation Keine offizielle Dokumentation über Besitzverhältnisse für Stromanschluss & Infrastrukturbau Unzuverlässige Stromversorgung möglich Mangelndes Vertrauen zwischen Bewohnern & Stromversorger [21] Energieproduktion nicht nachhaltig
Energy-Hub	<ul style="list-style-type: none"> Energiestandard für PUC bis TIER 5 [15] Kein Settlement-Upgrading Nur Freifläche nötig Geringere Kapitalkosten als Mini-Grid Modulares, kompaktes Design Flexibilität durch diverse Einnahmequellen [31] Versorgung basiert auf EE 	<ul style="list-style-type: none"> Keine direkte Versorgung der Haushalte Entfernung zwischen Haushalten & Energy-Hub Kapazität des Hubs durch begrenzte Freifläche in ISs limitiert – Unterstützung ausgewählter Unternehmen oder PUC 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Konkurrenz zu illegalen Versorgern (für HH liegt Versorgung bei TIER 1-3) Großes Potential an Kunden Diebstahl-sicheres Design möglich Bedarfsabhängige Services Kapazitätsbildung & lokale ökonomische Entwicklung (z.B. durch Arbeitsplätze) & Einbindung in O&M möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Leihen (BESS, Leuchtmittel usw.) ist weniger attraktiv als Eigentum [41] Unzuverlässige, hauseigene Elektrizität könnte dem entfernten Hub-Service vorgezogen werden Akquise einer Freifläche Mögliche "Doppelbelastung" durch Zahlen der Services und zusätzlicher fixer monatlicher Stromkosten
Mini-Grid	<ul style="list-style-type: none"> Energiestandard bis TIER 5 Jeder Haushalt & Unternehmen erhält einen Stromanschluss Versorgung basiert auf EE Hohe Verfügbarkeit & Zuverlässigkeit [32] 	<ul style="list-style-type: none"> Settlement Upgrading erforderlich Langwieriger Planungsprozess & Flächenakquise der dezentralen Infrastruktur Hohe Kapital- & Betriebskosten 	<ul style="list-style-type: none"> Lokale Aggregation des Strombedarfs – höhere Effizienz als einzelne SHS [42] Kapazitätsbildung & lokale ökonomische Entwicklung (z.B. durch Arbeitsplätze) & Einbindung in O&M möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Verwaltungskosten Keine offizielle Dokumentation über Besitzverhältnisse für Stromanschluss & Infrastrukturbau Geringer Energieverbrauch [31] Diebstahl & Vandalismus Ankunft des nationalen Stromnetzes
SHS	<ul style="list-style-type: none"> Kein Settlement Upgrading [37] Keine Vorplanung & Flächenakquise Klare Eigentumsverhältnisse & Unabhängigkeit Betreibern Versorgung basiert auf EE 	<ul style="list-style-type: none"> Energiestandard bis TIER 2 Sehr kostenintensiv pro Einheit – Finanzierungsschwierigkeiten für Einzelpersonen von ISs Begrenzte Verfügbarkeit & Zuverlässigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Verkauf über Einzelhandelskanäle Vorhandener Markt & breite Palette an Produkten verfügbar Ausrichtung auf das individuelle Kreditrisiko [32] 	<ul style="list-style-type: none"> Mangelndes Verbraucherbewusstsein für O&M Gefahr schlechter Produktqualität, (-sicherung), fehlenden qualifizierten Personals & gesetzlichen Strategien [27]

Abb. 5: SWOT-Analyse der vier untersuchten Technologien mit Stärken (gelb), Schwächen (blau), Chancen (grün) und Risiken (rot)

5. Diskussion

Zentrale Herausforderung in ISs sind die illegalen Strukturen, die den Einsatz aller vier Technologien erschweren: Bei Versorgung durch Kartelle erfolgt die monatliche Elektrizitäts-Kostenabrechnung meist nicht auf Basis der verbrauchten Strommenge, sondern anhand eines festgelegten Beitrags [40]. Damit verringern sich die laufenden Stromkosten beim Kauf einer SHS trotz hoher Anschaffungskosten nicht, können jedoch für Unternehmen aufgrund höherer Zuverlässigkeit zu höherem Umsatz führen. Der Energy-Hub muss sich mit seinen angebotenen Services dahingehend abheben, dass diese einen Mehrwert gegenüber der bestehenden Elektrizitätsversorgung haben. Zusätzliche Kosten, die für Kunden beim Nutzen von den energiebezogenen Services des Energy-Hubs entstehen, müssen sich für die Bewohner auszahlen.

Mini-Grids werden für ISs als nicht sinnvoll erachtet, da sie die aufgezeigten Schwächen der Option Netzerweiterung teilen und gleichzeitig kaum Stärken vorweisen können. Abgesehen von der Stärke der Operation auf Basis von EE und des damit einhergehenden Klimaschutzbeitrags, sind Mini-Grids in Kapital- und Betriebskosten teurer sowie aufwändiger in Planung, Operation und Instandhaltung als das nationale Stromnetz.

Bei Implementierung eines Energy-Hubs ist keine Siedlungs-Restrukturierung (sog. *slum upgrading*) notwendig. Das Konzept kann netzunabhängig realisiert werden und erfordert keine weitere Verlegung von Infrastruktur zu einzelnen Gebäuden, wie dies bei Mini-Grids oder dem Netzausbau der Fall ist. Dies ermöglicht ein Design, welches das Risiko von Diebstahl oder Sabotage reduziert. Die hohe Fluktuationsrate der Bewohner von ISs und ihr illegaler Status, einschließlich fehlender Adressen, erschweren die Kundenverwaltung beim Netzausbau und Mini-Grids erheblich. SHS können insbesondere Haushalte unterstützen, für Kleinunternehmen eignen sich oftmals Lösungen mit höherer Kapazität. Die Nutzung von SHS ist für viele Bewohner jedoch aufgrund der hohen Anschaffungskosten oftmals nicht erschwinglich. Ein Energy-Hub bietet dagegen individuelle Energiedienstleistungen, die alle Bewohner flexibel, ohne Einschränkungen, nach Bedarf und entsprechend ihrer aktuellen finanziellen Situation nutzen können. Bei Dimensionierung des Energy-Hubs muss eine Balance zwischen dem in Kapitel 4.1 erwähnten begrenzten Platz in ISs und der notwendigen Kapazität des Hubs gefunden werden, welcher anhand der gewünschten Energieservices festgelegt werden muss.

Für die Planung einer potentiellen Energieversorgung in ISs ist es essentiell, das eingesetzte System und die zu diesem Zeitpunkt genutzte Infrastruktur zu analysieren. In diesem Zusammenhang muss untersucht werden, inwieweit der Ist-Zustand die energiebezogenen Bedürfnisse der lokalen Bevölkerung befriedigt. Ebenfalls müssen vorherrschende soziokulturelle Strukturen, die sich auf den Energiebedarf auswirken, untersucht werden. Anhand der Gegebenheiten vor Ort müssen Systemlösungen gefunden werden, deren Stärken und Chancen die lokalen Herausforderungen reduzieren.

6. Fazit und Ausblick

Die SWOT-Analyse der vier untersuchten Energiesysteme hat gezeigt, dass sich der Einsatz eines Energy-Hubs für ISs eignet. Dieser kann zur Reduzierung der in ISs herrschenden, ermittelten energiebezogenen Herausforderungen beitragen. Die Analyse basiert auf Literaturwerten. Eine in ISs breit angelegte, zukünftige Untersuchung auf Basis qualitativer Daten ist als Grundlage für die Vertiefung der Erkenntnisse dieser Arbeit essenziell. Bei Einbezug der lokalen Gemeinschaft können Interviews mit Stakeholdern wie Kleinunternehmern, Bewohnern, illegalen Energieversorgern oder Autoritätspersonen verifizieren, welche Lösungen sich für die Verbesserung der Energieinfrastruktur in ISs eignen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] E. R. Jimenez-Huerta, "Informal Settlements," in *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies*, A. M. Orum, Hg., Wiley, 2019, S. 1–4.
- [2] N. K. Marutlulle, "Causes of informal settlements in Ekurhuleni Metropolitan Municipality: An exploration," *APSDPR*, Jg. 5, Nr. 1, 2017, doi: 10.4102/apsdpr.v5i1.131.
- [3] United Nations. "Population Division (2018): Kenya, Mozambique, South Africa, United Republic of Tanzania, East Africa." *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/> (Zugriff am: 3. Sep. 2021).
- [4] UN-HABITAT, "Slums: Some Definitions: Secretary General's visit to Kibera, Nairobi 30-31 January, 2007," 2007, Art. Nr. SOWC/06/07/B/Slum2.
- [5] F. de Filippi, G. G. Cocina und C. Martinuzzi, "Integrating Different Data Sources to Address Urban Security in Informal Areas. The Case Study of Kibera, Nairobi," *Sustainability*, Jg. 12, Nr. 6, S. 2437, 2020, doi: 10.3390/su12062437.
- [6] J. Melo Júnior, "OS DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE ACESSO A ENERGIA EM ASSENTAMENTOS INFORMAIS: PERSPECTIVAS DO MUNICÍPIO DE MAPUTO,"
- [7] J. K. Mensah und E. L. Birch, "Powering the Slum: Meeting SDG 7 in Accra's Informal Settlements," 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://kleinmanenergy.upenn.edu/research/publications/powering-the-slum-meeting-sdg7-in-accras-informal-settlements/>
- [8] F. M. Butera, R. S. Adhikari, P. Caputo und A. Facchini, "The challenge of energy in informal settlements. A review of the literature for Latin America and Africa," *Analysis of Energy Consumption and Energy Efficiency in Informal Settlements of Developing Countries*, S. 1–32, 2015.
- [9] R. Bajo-Buenestado, "The effect of blackouts on household electrification status: Evidence from Kenya," *Energy Economics*, Jg. 94, S. 105067, 2021. doi: 10.1016/j.eneco.2020.105067. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988320304072>
- [10] A. Subbiah, S. Mansoor, R. Misra, H. Jaffer und R. Tiwary, "Addressing Developmental Needs Through Energy Access in Informal Settlements," *Field Actions Science Report*, Jg. 2016, S. 80–91, 2016.
- [11] M. González-Eguino, "Energy poverty: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 47, S. 377–385, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.013.
- [12] F. Fuso Nerini, C. Ray und Y. Boulkaid, "The cost of cooking a meal. The case of Nyeri County, Kenya," *Environ. Res. Lett.*, Jg. 12, Nr. 6, S. 65007, 2017, doi: 10.1088/1748-9326/aa6fd0.
- [13] M. Cotton, J. Kirshner und D. Salite, "The Politics of Electricity Access and Environmental Security in Mozambique," in *Energy and Environmental Security in Developing Countries (Advanced Sciences and Technologies for Security Applications)*, M. Asif, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 279–302.
- [14] R. Singh, X. Wang, E. Ackom und J. Reyes, "Energy access realities in urban poor communities of developing countries: assessments and recommendations: Report prepared for the Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD) by the Energy and Resources Institute (TERI) and the GNESD Secretariat. Summary for policy-makers.," 2015. Zugriff am: 14. September 2022.
- [15] M. Franz, N. Peterschmidt, M. Rohrer und B. Kondev, "Mini-grid Policy Toolkit: Policy and business frameworks for successful mini-grid roll-outs," European Union Energy Initiative Partnership Dialogue Facility, Eschborn, 2014. Zugriff am: 8. August 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ren21.net/2014-mini-grid-policy-toolkit/>
- [16] M. Bhatia und N. Angelou, "Beyond Connections: Energy Access Redefined," World Bank Group, Washington, D.C, Rep. 008/15, 2015. Zugriff am: 13. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24368>
- [17] V. C. Broto *et al.*, "A research agenda for a people-centred approach to energy access in the urbanizing global south," *Nat Energy*, Jg. 2, Nr. 10, S. 776–779, 2017, doi: 10.1038/s41560-017-0007-x.
- [18] K. Janda, P. Fennell, C. Johnson, J. Tomei und X. Lemaire, *Towards inclusive urban building energy models: incorporating slum-dwellers and informal settlements (IN-UBEMs)*, 2019.
- [19] E. GÜREL, "SWOT ANALYSIS: A THEORETICAL REVIEW," *jjsr*, Jg. 10, Nr. 51, S. 994–1006, 2017, doi: 10.17719/jjsr.2017.1832.
- [20] R. Madurai Elavarasan, S. Afridhis, R. R. Vijayaraghavan, U. Subramaniam und M. Nurunnabi, "SWOT analysis: A framework for comprehensive evaluation of drivers and barriers for renewable

- energy development in significant countries,” *Energy Reports*, Jg. 6, S. 1838–1864, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.07.007.
- [21] F. M. Guangul und G. T. Chala, “Solar Energy as Renewable Energy Source: SWOT Analysis,” in *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*, 2019, doi: 10.1109/icbdsc.2019.8645580.
- [22] C. Cader, *Is a grid connection the best solution? Frequently overlooked arguments assessing centralized electrification pathways*, 2015.
- [23] S. Mandelli, J. Barbieri, R. Mereu und E. Colombo, “Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 58, S. 1621–1646, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.338.
- [24] O. M. Roche und R. E. Blanchard, “Design of a solar energy centre for providing lighting and income-generating activities for off-grid rural communities in Kenya,” *Renewable Energy*, Jg. 118, S. 685–694, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.053.
- [25] J. M. Ngowi, L. Bångens und E. O. Ahlgren, “Benefits and challenges to productive use of off-grid rural electrification: The case of mini-hydropower in Bulongwa-Tanzania,” *Energy for Sustainable Development*, Jg. 53, S. 97–103, 2019, doi: 10.1016/j.esd.2019.10.001.
- [26] M. Grimm, A. Munyehirwe, J. Peters und M. Sievert, “A First Step up the Energy Ladder? Low Cost Solar Kits and Household’s Welfare in Rural Rwanda,” *World Bank Econ Rev*, lhw052, 2016, doi: 10.1093/wber/lhw052.
- [27] A. Bahaj *et al.*, “The Impact of an Electrical Mini-grid on the Development of a Rural Community in Kenya,” *Energies*, Jg. 12, Nr. 5, S. 778, 2019, doi: 10.3390/en12050778.
- [28] T. den Heeten *et al.*, “Understanding the present and the future electricity needs: Consequences for design of future Solar Home Systems for off-grid rural electrification,” in *2017 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, Cape Town, South Africa, 2017, S. 8–15, doi: 10.23919/DUE.2017.7931816.
- [29] M. Tesfamichael, C. Bastille und M. Leach, “Eager to connect, cautious to consume: An integrated view of the drivers and motivations for electricity consumption among rural households in Kenya,” *Energy Research & Social Science*, Jg. 63, S. 101394, 2020, doi: 10.1016/j.erss.2019.101394.
- [30] J. Peters und M. Sievert, “Impacts of rural electrification revisited – the African context,” *Journal of Development Effectiveness*, Jg. 8, Nr. 3, S. 327–345, 2016, doi: 10.1080/19439342.2016.1178320.
- [31] L. Payen und I. Galichon, “Energy Access In Rural Togo: The Relevance Of The Energy Kiosk Solution,” ENEA und Benoo, Paris, 2017. Zugriff am: 3. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enea-consulting.com/en/publication/energy-kiosk-a-solution-for-rural-electrification-in-togo/>
- [32] BloombergNEF, “State of the Global Mini-grids Market Report 2020,” 2020. Zugriff am: 16. August 2022.
- [33] T. Gaunt, M. Salida, R. Macfarlane, S. Maboda, Y. Reddy und M. Borchers, “Informal Electrification in South Africa,” *Sustainable Energy Africa. Accessed March*, Jg. 8, S. 2020, 2012.
- [34] S. Kimatu, “Mukuru slum in darkness after Kenya Power removes transformer,” *Nation Media Group*, 24 Jun., 2021. <https://nation.africa/kenya/counties/nairobi/mukuru-slum-in-darkness-after-kenya-power-removes-transformer-3449602> (accessed: Dez. 16, 2022).
- [35] M. Anderson und K. Mwelu, “Kenyan Slum Upgrading Programs: KISIP & KENSUP,” 2013.
- [36] S. Runsten, “Energy Provision and Informality in South African Informal Urban Settlements: A Multi-Criteria Sustainability Assessment of Energy Access Alternatives,” Bachelor Thesis, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Energy Technology, Energy Systems Analysis., Stockholm, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A860027&dsid=5137>
- [37] D. Conway, B. Robinson, P. Mudimu, T. Chitekwe, K. Koranteng und M. Swilling, “Exploring hybrid models for universal access to basic solar energy services in informal settlements: Case studies from South Africa and Zimbabwe,” *Energy Research & Social Science*, Jg. 56, S. 101202, 2019, doi: 10.1016/j.erss.2019.05.012.
- [38] KPLC. “System Average Interruption Frequency Index (SAIFI).” <https://kplc.co.ke/content/item/795/system-average-interruption-frequency-index-saifi> (Zugriff am: 20. Dez. 2022).

- [39] V. Amadala, "Kenya's blackouts way above global average - EPRA," *The Star*, 24 Feb., 2022. <https://www.the-star.co.ke/business/kenya/2022-02-24-kenyas-blackouts-way-above-global-average-epra/> (accessed: Dez. 20, 2022).
- [40] A. Sverdlik, "Tenuous Wires, Covert Excreta Flows, and a Formal/Informal Interface: Uncovering New Facets of Informality in Nairobi," Doctoral Thesis, UC Berkeley, California, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://escholarship.org/uc/item/5zn2m9j3>
- [41] Prof. Dr. Alexander Muumbo, "Energy-related challenges within in Informal Settlements in Kenya", Mai. 2022.
- [42] M. Resch *et al.*, "Solarkiosk - Abschlussbericht RLI," 2012.