

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Energieversorgung für Gesundheitseinrichtungen in Ghana (EnerSHeLF)

## Sachbericht

**Fördermaßnahme:** CLIENT II  
**Zuwendungsempfänger:** Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS)  
**Förderkennzeichen:** 03SF0567A  
**Laufzeit des Vorhabens:** 01.06.2019 – 31.03.2023

**Autoren:**  
Bender, Katja  
Meilinger, Stefanie  
Agbaam, Callistus  
Perez Arredondo, Ana Maria  
Chaaraoui, Samer  
Bauhof, Jonas  
Antonini, Samantha

## Inhaltsverzeichnis

Autoren (in alphabetischer Reihenfolge, nach Arbeitspaket).....	4
Koordinator und Verbundpartner .....	4
1. Einleitung.....	5
2. Sachbericht AP1: Politische Ökonomie einer nachhaltigen Energiewende im ghanaischen Gesundheitssektor (Fokus: PV) .....	5
2.1. AP Lead .....	5
2.2. Verbundpartner.....	5
2.3. Ziel von AP1 .....	6
2.4. TAP1.1: Einflussfaktoren institutionellen Wandels – Nationale Ebene .....	6
2.5. TAP1.2: Einflussfaktoren technologischen Wandels – Marktebene .....	7
2.6. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP1 .....	8
3. Sachbericht AP3: Landes- und Sektor-spezifische Optimierung .....	11
3.1. AP Lead .....	11
3.2. Verbundpartner.....	11
3.3. Ziel von AP3 .....	11
3.4. TAP3.0: Messkonzept und Datenmanagement.....	11
3.5. TAP3.1: Strombedarf des ghanaischen Gesundheitssektors .....	15
3.6. TAP3.3: Werkzeuge zur Länder- und Sektor-spezifischen Systemplanung und Anlagenoptimierung.....	18
3.7. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP3 .....	23
4. Sachbericht AP4: Erfordernisse einer nachhaltigen Energiewende aus interdisziplinärer Perspektive .....	24
4.1. AP Lead .....	24
4.2. Verbundpartner.....	24
4.3. Ziel von AP4 .....	24
4.4. TAP4.1: Integrative interdisziplinäre Analyse der Projektergebnisse .....	24
4.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP4 .....	26
5. Beiträge zu AP6: Management und Koordination.....	27
5.1. AP Lead .....	27
5.2. Verbundpartner.....	27
5.3. Ziel von AP6 .....	27
5.4. TAPP6.1: Projektkoordination .....	27
5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP6 .....	29
6. Meilensteine (M) .....	30
7. Deliverables (D) .....	30
8. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....	31

8.1.	Zusammenfassung.....	31
8.2.	Fazit und Ausblick.....	32
9.	Zahlenmäßiger Nachweis .....	33
10.	Verwertungsplan .....	33
10.1.	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten .....	33
10.2.	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten .....	33
10.3.	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	34
11.	Publikationen.....	35
	Journal Artikel.....	35
	Conference Proceedings.....	36
	Working Paper.....	36
	Policy Briefs .....	36
	Poster-Präsentationen .....	37
	Vorträge, Reden, Vorlesungen, Podcasts .....	37
	Organisierte öffentliche Konferenzen, Symposien oder Workshops.....	38
	Abschlussarbeiten .....	38
	Für 2023 geplante Publikationen .....	38

## Autoren (in alphabetischer Reihenfolge, nach Arbeitspaket)

**Projektleitung:** Bender, Katja  
                           Meilinger, Stefanie  
**AP1:**              Agbaam, Callistus  
                          Perez Arredondo, Ana Maria  
**AP3:**              Chaaraoui, Samer  
**AP4:**              Bauhof, Jonas  
**AP6:**              Antonini, Samantha

## Koordinator und Verbundpartner

Einrichtung	Abkürzung	Projektverantwortlich
<b>Koordinator</b>		
<b>Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin</b> Internationales Zentrum für Nachhaltige Entwicklung	H-BRS	Prof. Dr. Stefanie Meilinger Prof. Dr. Katja Bender
<b>Verbundpartner</b>		
<b>European Association of Development Research and Training Institutes (Europäischer Verband der Entwicklungsforschungs- und Ausbildungsinstitute) e.V.</b>	EADI	Susanne von Itter
<b>Reiner Lemoine Institut gGmbH</b>	RLI	Dr. Philipp Blechinger
<b>Universität Augsburg</b> Fakultät für Angewandte Informatik Institut für Geographie Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie	UniA	Prof. Dr. Harald Kunstmann
<b>Technische Hochschule Köln</b> Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE)	CIRE	Prof. Dr. Thorsten Schneiders
<b>WestfalenWIND Beyond GmbH &amp; Co. KG</b>	DLR	Steven Denk
<b>Assoziierte Partner</b>		
<b>University for Development Studies</b> Faculty of Planning and Land Management	UDS1	Dr. Kennedy A. Alatinga
<b>University for Development Studies</b> School of Engineering	UDS2	Prof. Dr. Felix K. Abagale
<b>Kwame Nkrumah University of Science and Technology</b> The Brew-Hammond Energy Centre	KNUST	Dr. Emmanuel W. Ramde
<b>WASCAL (West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use)</b> WASCAL Competence Centre	WASCAL	Dr. Seyni SALACK

## 1. Einleitung

Wie in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern, kommt es auch in Ghana immer wieder zu Stromausfällen. Hierfür gibt es sogar ein eigenes Wort: „dumsor“. Hinzu kommt die Instabilität des Stromnetzes. Beides führt zu erheblichen Beeinträchtigungen im Gesundheitssektor, da das Licht im Operationssaal fehlt oder lebensrettende medizinische Geräte ausfallen können. Obwohl Strom aus Photovoltaikanlagen hier Abhilfe schaffen könnte, ist der PV (Photovoltaik) Markt in Ghana noch relativ unerschlossen.

Hier setzt das Verbundvorhaben EnerSHeLF an: Gemeinsam mit ghanaischen Partnern haben Wissenschaftler und Praktiker aus unterschiedlichsten Disziplinen sowohl an technischen als auch politökonomischen Fragen zur Verbesserung und Verbreitung marktfähiger PV-basierter Energielösungen für Gesundheitseinrichtungen in Ghana gearbeitet.

Durch die Zusammenarbeit zwischen technischen Disziplinen (Ingenieur- und Naturwissenschaften) und Gesellschaftswissenschaften (Entwicklungsökonomie) konnte innerhalb des Projektes ein integratives Verständnis des Zusammenspiels von institutionellem und technologischem Wandel im Gesundheits-Energie-Nexus gewonnen werden. Dabei wurde insbesondere die Frage adressiert, wie die Wechselwirkungen zwischen Entwicklung und Verbreitung technologischer Lösungen und dem spezifischen institutionellen und politökonomischen Länderkontext funktionieren.

Ziel des Verbundprojektes EnerSHeLF war es daher, mittelbar zu einer nachhaltigen ökonomischen, ökologischen und sozialen Entwicklung beizutragen: Eine technische Verbesserung und beschleunigte Diffusion von integrativen und zuverlässigen PV-Lösungen unterstützt eine Erhöhung des Marktanteils erneuerbarer Energien und damit eine Stärkung der Nachhaltigkeit des nationalen Energiesystems. Letzteres hat positive ökologische Auswirkungen durch eine Reduzierung von Emissionen und Dieserverbrauch.

Darüber hinaus ermöglichen ein verbesserter Energiezugang und reduzierte Kosten der Energieversorgung eine Verbesserung der Gesundheitsversorgung. Damit kann langfristig eine verbesserte Gesundheit der Bevölkerung befördert werden – ebenfalls unterstützt durch eine Reduzierung der negativen Gesundheitseffekte von Dieselemissionen. Da sowohl Energie und Gesundheit wichtige Motoren für das Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens und eine erfolgreiche Armutsrückbildung sind, könnte langfristig – im Zusammenspiel mit weiteren Maßnahmen – auch ein Beitrag für die ökonomische und soziale Entwicklung auf Makroebene geleistet werden.

## 2. Sachbericht AP1: Politische Ökonomie einer nachhaltigen Energiewende im ghanaischen Gesundheitssektor (Fokus: PV)

### 2.1. AP Lead

- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS)

### 2.2. Verbundpartner

- SD Dombo University of Business and Integrated Development Studies (SDD-UBIDS) (vormals: University of Development Studies), Dr. Kennedy Alatinga (UDS1)

## 2.3. Ziel von AP1

Vor dem Hintergrund einer nur langsam erfolgenden Diffusion von PV-Ansätze in Ghana und eines sich ebenso langsam vollziehenden institutionellen Wandels untersucht AP1 aus einer institutionenökonomischen Perspektive das Zusammenspiel von technologischem Wandel (PV), Agency (individuelles Entscheidungsverhalten) und Strukturen (Institutionen/Kontext).

## 2.4. TAP1.1: Einflussfaktoren institutionellen Wandels – Nationale Ebene

### *Literaturrecherche und Entwicklung konzeptionelles Modell*

Eine kritische Analyse des aktuellen Stands der internationalen Forschung zur politischen Ökonomie eines nachhaltigen Umbaus des Energiesektors wurde erfolgreich durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, aus einer allgemeineren Perspektive zu verstehen, wie politökonomische Strukturen die nachhaltige Energiewende in Ländern mit hohem, mittlerem und niedrigem Einkommen erleichtern oder behindern und Forschungslücken zu identifizieren. Die Ergebnisse sind in einem wissenschaftlichen Artikel mit dem Titel "The political economy of sustainable energy transition: A Literature Review and A Research Agenda" ausgearbeitet und in der „IZNE Working Paper Series“ veröffentlicht.

Darüber hinaus wurde ein konzeptionelles Modell entwickelt, das auf dem von Bender et al. (2021) vorgeschlagenen Erklärungsansatz basiert und u.a. auf Aoki (2001; 2007) und Dequech (2011) aufbaut. Das konzeptionelle Modell, das sich auf einen akteursorientierten und an die Spieltheorie angelehnten Ansatz stützt, ermöglichte eine Analyse der Faktoren, die den institutionellen Wandel auf nationaler Ebene aus einer institutionenökonomischen Perspektive beeinflussen. Das konzeptionelle Modell diente zusammen mit den wichtigsten Erkenntnissen aus der Literaturanalyse als Grundlage für die Entwicklung der qualitativen Datenerhebungsinstrumente (Interviewleitfäden auf nationaler Ebene).

Darüber hinaus wurde auf der Grundlage einer umfassenden Überprüfung von Informationen aus Sekundärquellen ein analytisches Mapping des Reformprozesses bzw. des Prozesses des politischen Wandels in Bezug auf die Photovoltaik in Ghana durchgeführt. Das Mapping umfasst den Zeitraum 1986-2022. Die ersten Ergebnisse wurden während eines EnerSHeLF-Projektseminar zum transdisziplinären Wissensaustausch im Jahr 2020 vorgestellt und diskutiert.

### *Datenerhebung inkl. Entwicklung der Datenerhebungsinstrumente*

Die Entwicklung von Instrumenten zur qualitativen Datenerhebung (Interviewleitfäden auf nationaler Ebene) begann 2019 und wurde 2020 abgeschlossen. Eine Bestandsaufnahme (Stakeholder-Mapping) der relevanten Akteure im ghanaischen Gesundheits- und Energiesektor, einschließlich politischer Entscheidungsträger, Regulierungsbehörden, Stromerzeuger, Gruppen der Zivilgesellschaft, Geldgeber und unabhängiger Experten, wurde ebenfalls 2020 abgeschlossen. Aufgrund der weltweiten COVID-19-Pandemie verzögerte sich die Datenerhebung jedoch erheblich. Die eigentliche Datenerhebung (sowohl online als auch persönlich) begann im Dezember 2020 und endete im Oktober 2022. Insgesamt wurden 21 qualitative Interviews mit wichtigen Akteuren im ghanaischen Gesundheits- und Energiesektor geführt.

### *Qualitative Datenanalyse*

Die qualitative Datenanalyse begann im Jahr 2021 nach einer anfänglichen Verzögerung aufgrund von Herausforderungen bei der Datenerhebung infolge der weltweiten COVID-19-Pandemie. Alle 21 auf nationaler Ebene geführten Interviews wurden aufgezeichnet (mit Zustimmung), wortwörtlich transkribiert und anhand eines vordefinierten Kodierungsschemas mit Atlas ti. 22 ausgewertet. Die Daten aus den Interviews auf nationaler Ebene wurden auch durch eine Analyse von Sekundärdaten ergänzt, darunter Rechtsdokumente, Politik- und Strategiepapiere, Programmberichte, wissenschaftliche Veröffentlichungen und graue Literatur. Der gesamte Prozess der qualitativen

Datenanalyse wurde 2022 abgeschlossen, und die Ergebnisse flossen in eine Zeitschriftenveröffentlichung mit dem Titel „Determinants of Institutional Change towards a Sustainable Energy Transition in the Health and Energy sectors in Ghana: A Political Economy Analysis of Solar Photovoltaics“ (aktuell im Begutachtungsprozess).

#### *Publikation*

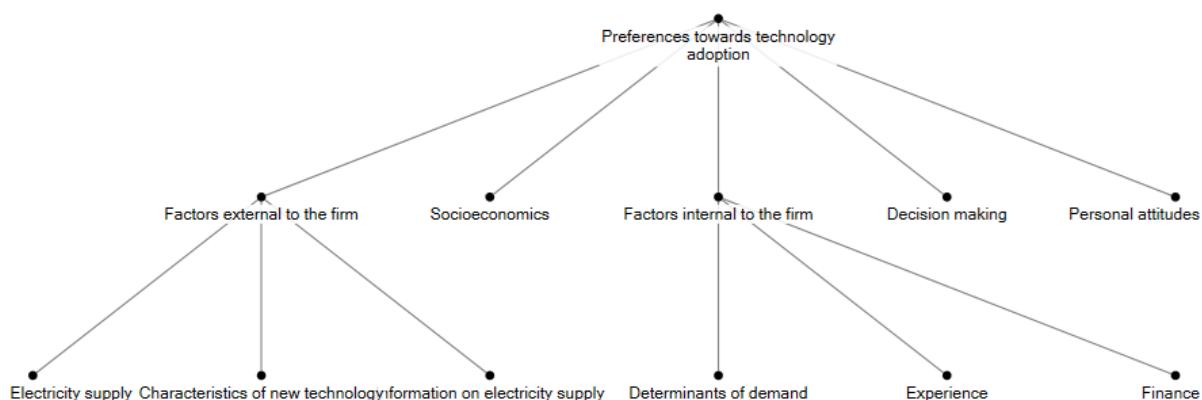
Aus den Ergebnissen von WP.1.1 wurden drei (3) Publikationen erstellt. Dazu gehören ein Policy Brief, ein IZNE Working Paper und ein wissenschaftlicher Artikel, der zur Veröffentlichung in einer einer Fachzeitschrift eingereicht ist. (Manuskript eingereicht bei World Development).

### 2.5. TAP1.2: Einflussfaktoren technologischen Wandels – Marktebene

#### *Literaturüberblick und Entwicklung konzeptionelles Modell*

Eine Sichtung der einschlägigen wissenschaftlichen Fachliteratur und die Entwicklung eines konzeptionellen Modells auf der Grundlage der Theorien des geplanten Verhaltens und des begründeten Handelns sowie der kontingenten Bewertung zur Messung der Präferenzen der Befragten in Bezug auf PV-Systeme wurden 2020 abgeschlossen.

Der konzeptionelle Rahmen ist in der folgenden Abbildung zu sehen:



Das oben dargestellte konzeptionelle Modell diente als Leitfaden für die Datenerhebung und -analyse für die Studie zur PV-Nachfrage im Jahr 2021. In Bezug auf das PV-Angebot wurde die Literaturrecherche 2021 fortgesetzt, um das bestehende konzeptionelle Modell zu stärken. Erweiterungen des Modells wurden jedoch erst gegen Ende 2022 fertiggestellt, da die Datenerhebung und -analyse für die PV-Nachfrage Priorität hatte.

#### *Datenerhebung inkl. Werkzeugentwicklung (Nachfrageseite: ghanaische Gesundheitseinrichtungen)*

Das Datenerhebungsinstrument wurde Ende 2020 zusammen mit der Stichprobenauswahl, einem Ersatz der Software für die Datenerhebung und der Entwicklung des Schulungsprogramms für die Datenerhebung fertiggestellt. Zielgruppe waren Entscheidungsträger in privaten Gesundheitsrichtungen. Ursprünglich waren diese Aktivitäten für Anfang 2020 geplant, aber das Arbeitspaket wurde durch Personalwechsel stark verzögert. Darüber hinaus konnten die Datenerhebungsaktivitäten aufgrund von Verzögerungen im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie nicht vor Mitte 2021 beginnen. Insgesamt nahmen 197 ghanaische Gesundheitseinrichtungen aus dem Privatsektor an der Umfrage teil.

**Datenerhebung inkl. Werkzeugentwicklung (Angebotsseite: ghanaische und deutsche Unternehmensvertreter:innen aus dem PV-Sektor)**

Die Datenerhebungsaktivitäten für die Angebotsseite begannen in der zweiten Hälfte des Jahres 2022. Die Instrumente für die Datenerhebung in Form von halbstrukturierten Interviews wurden auf der Grundlage der aus den anderen Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnisse und der Ergebnisse der empirischen Analyse der Determinanten der PV-Nachfrage verfeinert. Die Interviews wurden im Zeitraum 12/22-03/23 durchgeführt. Insgesamt wurden 28 Interviews geführt, davon 24 Interviews mit ghanaischen und 4 Interviews mit deutschen Unternehmensvertreter:innen. Die Datenerhebung gestaltete sich zeitlich als deutlich aufwendiger als geplant (in Ergänzung zu den COVID-19 bedingten Verzögerungen) und konnte daher erst kurz vor Projekteende abgeschlossen werden.

**Datenanalyse (Nachfrageseite)**

Die Aktivitäten zur Datenbereinigung und -analyse sowie zur Zusammenfassung und Verschriftlichung der Ergebnisse wurden im Jahr 2022 durchgeführt.

**Datenanalyse (Angebotsseite)**

Die Analyse der Unternehmensinterviews wurde im 1. Quartal 2023 begonnen, konnte aber aufgrund der verzögerten Datenerhebung nicht vollständig im Projektzeitraum abgeschlossen werden und werden zum aktuellen Zeitpunkt im Rahmen einer Abschlussarbeit durchgeführt (Beendigung: November 2023).

**Publikation**

Aus den Ergebnissen von WP.1. wurden zwei (2) Publikationen erstellt. Dazu gehören ein Policy Brief, sowie eine schriftliche Analyse der Survey Daten. Eine wissenschaftliche Veröffentlichung in einem Fachjournal ist geplant (Einreichung für 2023 geplant).

## 2.6. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP1

Die für WP1.1 und WP1.2 geplanten Aktivitäten wurden nach anfänglichen Verzögerungen in den Jahren 2020 und 2021 (Stakeholder-Interviews und Health-Facility-Survey) bzw. 2022-23 (Unternehmensinterviews) aufgrund der weltweiten COVID-19-Pandemie erfolgreich durchgeführt. Zu den Forschungsergebnissen gehören:

### AP 1.1

**Analyse des Reformprozesses**

Die Diffusion von Photovoltaik (PV)-Energiesolutions in Ghana ist durch einen langfristigen inkrementellen und kumulativen Reformprozess 3. Ordnung gekennzeichnet, der in drei Phasen unterteilt werden kann:

- 1986 – 2000: Demonstration, Forschung und Entwicklung
- 2001 – 2010: Skalierung und Versuche zur Institutionalisierung von Maßnahmen
- 2011 – 2022: Gesetzgebung und Institutionalisierung politischer Maßnahmen

Für den Gesundheitssektor im Speziellen gilt jedoch, dass - auch wenn vereinzelte PV-Ansätze im Gesundheitssektor vorhanden sind - erst in jüngster Zeit auch ein institutioneller Wandel angestoßen wurde.

**Analyse der für den Reformprozess relevanten Einflussfaktoren**

Für das Verständnis des Reformprozesses in Ghana hinsichtlich der Verbreitung von Solarenergie sind mehrere Faktoren innerhalb (endogene) und außerhalb (exogene) des Energiesektors relevant.

Relativ homogene Interessen wichtiger Akteure sowohl politischer Entscheidungsträger wie z.B. Geber, NGOs/zivilgesellschaftlichen Organisationen und Industrieverbänden im Energiesektor reduzierten über einen längeren Zeitraum die Wahrscheinlichkeit von Konflikten und Kooperationsproblemen und ermöglichten eine gewisse Dynamik für politische Veränderungen. Darüber hinaus boten sinkende Preise für Photovoltaik und der aus solchen Anlagen erzeugten Energie einen starken Impuls für einen Politikwechsel.

Diese Dynamik wurde jedoch abgeschwächt, da politischen Entscheidungsträger im Energieministerium zunehmend eine duale Agenda zu verfolgen scheinen, indem sie einerseits Solar-PVs unterstützen und andererseits eine Agenda für fossile Brennstoffe verfolgen. Das institutionelle und infrastrukturelle Erbe des ghanaischen Energiesektors, der von Wasserkraft und thermischer Energie dominiert wird, führte jedoch zu Pfadabhängigkeiten und stellt daher nach wie vor ein starkes Hindernis für Reformmaßnahmen zur Verbreitung von Photovoltaik dar. Zwar zeigt die Analyse relevanter Rahmenbedingungen, dass die zahlreichen Energiekrisen in Ghana die Unzulänglichkeiten und die Abhängigkeit von Wasser- und Wärmequellen aufdeckten und somit eine Chance für Photovoltaikanlagen schufen, die Entdeckung von Öl- und Gasressourcen jedoch im Gegenteil den Veränderungsprozess für Solar-PV behinderte oder verlangsamte, indem sie die Aufmerksamkeit der politischen Entscheidungsträger auf die Erschließung der Erdölressourcen des Landes lenkte.

Auch hinsichtlich der regulatorischen Rahmenbedingungen besteht eine erhebliche Unsicherheit. Gesetze und Verordnungen wurden ständig geändert oder nicht konsequent umgesetzt. So müssen Geschäftsentwickler und Investoren bei Großprojekten das Moratorium für Stromabnahmeverträge (Power Purchase Agreements, PPAs) für neue erneuerbare oder thermische Kraftwerke in Betracht ziehen. Dazu gehört die Entwicklung neuer Projekte, aber auch bereits erteilte Lizenzen, die teilweise neu bewertet und entzogen wurden.

Die Anfang 2023 eingeführte Neuregelung Einspeisevergütung erfordert eine genaue Beobachtung. Die PURC (Public Utilities Regulatory Commission) hat ein Net-Metering-System für erneuerbare Energien eingeführt, dass es den Verbrauchern ermöglicht, ihren eigenen Strom durch Solar- oder Winderzeugung zu erzeugen und überschüssige Stromproduktion in das nationale Netz einzuspeisen. Auf diese Weise können sie ihre Stromrechnung senken. Eine zukünftige Evaluierung des Erfolgs des Net-Metering-Systems ist ratsam, um seine Umsetzung zu messen und potenziellen Kunden umfassende Empfehlungen zu geben.

Obwohl es derzeit keinen umfassenden politischen Rahmen für die Förderung der Verbreitung von Photovoltaik speziell im Gesundheitssektor gibt, bietet Ghanas jüngste Unterstützung des WHO-Aufrufs zum Handeln, der unter anderem die Zusammenarbeit und Zusammenarbeit zwischen dem Gesundheits- und dem Energiesektor vorschreibt, eine einmalige Gelegenheit für ghanaische politische Entscheidungsträger in beiden Sektoren, strategische Partnerschaften zu schmieden.

## AP 1.2

### *Deskriptive Analyse des Status-Quos:*

Das durchschnittliche Betriebsalter der untersuchten Gesundheitseinrichtungen beläuft sich auf 16,5 Jahre. Die Hauptfinanzierungsquelle sind Direktzahlungen. Die durchschnittliche Bettenanzahl umfasst 24,8 Betten. Der durchschnittliche Strombedarf liegt bei ca. 33 kWh/Tag.

Die befragten privaten Gesundheitseinrichtungen waren fast vollständig an das Stromnetz angeschlossen (99%). Nur 5 % verfügten entweder über Pico- Solarzellen für Beleuchtung und zum Aufladen und Batterien oder haben eine kleine PV-Solaranlage als ergänzende Stromquelle installiert. 57 % der Befragten waren unzufrieden mit der Zuverlässigkeit der Stromversorgung und berichteten

von Störungen von bis zu 5 Stunden täglich. Durch Stromschwankungen verursachte finanzielle Verluste belaufen sich auf bis zu 6.705 GHS.

*Zentrale Ergebnisse:*

- Gesundheitseinrichtungen könnten das Angebot verbessern, wenn der Zugang zu einer zuverlässigen Stromversorgung gewährleistet ist. Insgesamt waren die überwiegende Mehrheit der Befragten (82%) der Meinung, dass sie eine bessere Gesundheitsversorgung anbieten könnten, wenn sich die Stromversorgung verbessern würde und PV-Lösungen diese Lücke schließen könnten.
- Gesundheitseinrichtungen sind offen für Veränderungen. Es konnte kein Status-quo-Bias, also keine Tendenz zum Festhalten an der aktuellen Lösung, beobachtet werden. Ungefähr die Hälfte derjenigen, die ihre Unzufriedenheit mit der Stromversorgung des Stromnetzes zum Ausdruck brachten, waren bereit, ihr Stromsystem zu ändern (52 %), sofern alternative Optionen eine glaubwürdige Verbesserung der Zuverlässigkeit des Energiezugangs versprechen.
- Hybridsysteme, die die Versorgung aus dem Netz mit PV-Solaranlagen kombinieren, gelten als eine Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der Stromversorgung zu gewährleisten und damit die Gesundheitsversorgung zu ermöglichen. Flexibilität bei der Dimensionierung des Systems ist dabei wichtig. Für die Betreiber von Gesundheitseinrichtungen ist eine 100%ige Autarkie oft nicht erwünscht, vielmehr wird eine erhöhte Stabilität der Stromversorgung bei Stromausfällen gewünscht. Hybridsysteme, die die Einspeisung aus dem Netz mit PV-Solaranlagen kombinieren, sind die bevorzugte Option.
- Kostenüberlegungen spielen jedoch eine wichtige Rolle. Dies umfasst sowohl die Investitionskosten als auch die monatlichen Ausgaben. Deutliche Bedenken hinsichtlich der Wartung und der Wartungskosten behindern zudem die Verbreitung von PV-Energiesolutions. Es gibt jedoch eine Wissenslücke bezüglich der Kosten von PV-Anlagen und 27% der befragten Gesundheitseinrichtungen waren der - nicht zutreffenden - Auffassung, dass die monatlichen Stromkosten aus einer PV-Anlage höher sind im Vergleich zu den aktuell anfallenden Energiekosten bei Netzbetrieb.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es in Ghana ein Nachfragepotenzial für PV-Lösungen im Gesundheitssektor gibt. Finanzierungsschwierigkeiten und bestehende Wissenslücken müssen jedoch überwunden werden. Die schlechte wirtschaftliche Lage Ghanas sowie andauernde Inflation und Abwertung des Cedi erfordert jedoch zusätzliche Aufmerksamkeit.

*Empfehlungen*

- Angebot flexibler Hybridsysteme, um den Anforderungen der Gesundheitseinrichtung gerecht zu werden,
- Informationskampagne zur Sensibilisierung für PV-Energiesolutions, deren Anwendbarkeit und Verbesserung der Informationsbasis zu relativen Kosten für Solarenergie (laufende Kosten im Vergleich zu konventioneller Energie günstiger),
- Entwicklung flexibler Instrumente zur Finanzierung von Investitionskosten (z.B. leasingbasierte Solar-as-a-Service-Produkte, um Gesundheitseinrichtungen mit lokalen oder internationalen Investoren zu verbinden, die die anfänglichen Investitionskosten ausgleichen können),
- Sicherstellung der Verfügbarkeit von Instandhaltungs- und Wartungsdiensten.

### 3. Sachbericht AP3: Landes- und Sektor-spezifische Optimierung

#### 3.1. AP Lead

- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS)

#### 3.2. Verbundpartner

- Cologne Institute for Renewable Energy, TH Köln (CIRE)
- Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST)
- University of Augsburg (UniA)
- West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL)
- Reiner Lemoine Institut (RLI)
- University of Development Studies, Tamale, Prof. Dr. Felix Abagale (UDS2)

#### 3.3. Ziel von AP3

Dieses AP zielt auf die Verbesserung der sektor- und landesspezifischen Datenbasis für ein gut fundiertes Design und auf eine optimierte, vorhersagebasierte Betriebsführung, die eine sichere Energieversorgung von Gesundheitseinrichtungen sicherstellen kann. Hierzu wurde gemeinsam mit den Partnern CIRE, KNUST und UDS2 ein Sektor-spezifisches Strombedarfsmodell (TAP3.1) entwickelt und gemeinsam mit den Partnern WASCAL an einer fundierten Validierung und verbesserten Vorhersage der lokalen Einstrahlung und Temperatur für Ghana gearbeitet (TAP3.2). Die neuen Daten werden sowohl (a) für das Systemdesign als auch (b) in der Betriebsführung berücksichtigt (TAP3.3). Darüber hinaus entwickelte der Projektpartner RLI eine datenbasierte Elektrifizierungs- und Markteinführungsstrategie für PV-Hybridsysteme im Gesundheitssektor in Ghana und für umliegende Gemeinden (TAP3.4).

Der von der H-BRS verantwortete Teil ist die Koordination von Messkonzept und Datenmanagement (TAP3.0), die Erfassung von Messdaten an den Standorten Kologo, KUMASI und Akwatia (TAP3.1) sowie die Entwicklung einer standortoptimierten Betriebsführung unter Berücksichtigung der im Projekt gewonnenen Wetter- und Lastdaten (TAP3.3-b).

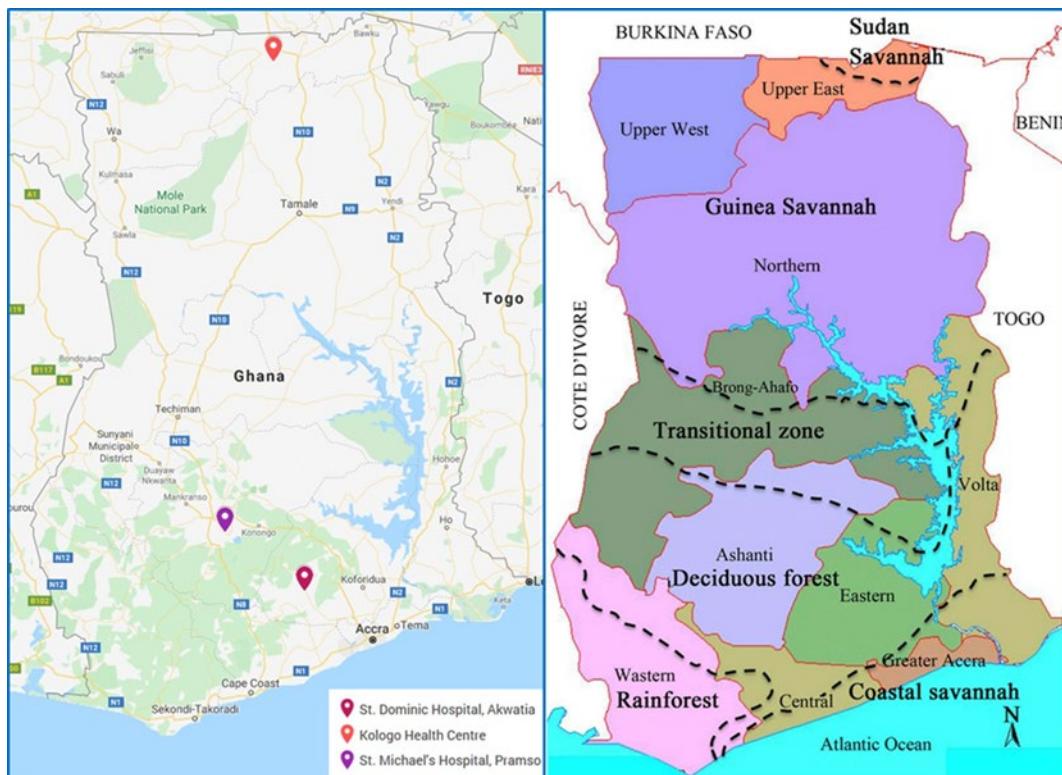
#### 3.4. TAP3.0: Messkonzept und Datenmanagement

Für die Erhebung von Last- und Wetterdaten wurden drei Messstandorte ausgewählt und gemeinsam mit allen an AP3 beteiligten Partnern ein Gesamtmesskonzept entwickelt. Die Standorte und die dort geplanten Messaktivitäten werden im Folgenden beschrieben.

Die Messorte (Tabelle 1) umfassen zwei verschiedene Kategorien von Gesundheitseinrichtungen (Krankenhäuser und Gesundheitszentren) in drei verschiedenen Regionen (Upper East; Ashanti und Eastern) Ghanas und in unterschiedlichen Klimazonen. Abbildung 2 (rechts) zeigt die unterschiedlichen Regionen und Klimazonen von Ghana. Das St. Michael's Hospital und das St. Dominic Hospital liegen in der Laubwald-Klimazone, die warm und feucht ist. Das Kologo Health Centre liegt in der Klimazone der Guinea-Savanne, die heiß und trocken ist.

Tabelle 1: Messstationen in Ghana

Facility	Region	District	Google Plus Code	Coordinates
St. Dominic Hospital, Akwatta	Eastern	Denkyembour	26W3+Q5 Bawdua, Ghana	6°02'49.8"N 0°47'49.3"W
Kologo Health Center	Upper East	Kassena Nankana	PWPC+VX Kologo, Ghana	10°44'14.0"N; 1°04'39.2"W
St. Michael's Hospital, Pramso	Ashanti	Bosomtwe	HF5Q+H2 Pramso, Ghana	6°33'34.5"N; 1°30'44.9"W

Abbildung 1: links: Karte der Messstationen für die Feldversuche<sup>1</sup>; rechts: Regionen und Klimazonen von Ghana<sup>2</sup>

### Saint Dominic Hospital

Das St. Dominic Hospital - gegründet im Juli 1960 - ist eine Einrichtung mit einer Kapazität von 357 Betten im Stadtgebiet von Akwatta (siehe Abbildung 2). Akwatta liegt im Denkyembour-Distrikt der Eastern Region im Süden Ghanas und hat eine Bevölkerung von ca. 25.000 Einwohnern.

Das St. Dominic Hospital ist an das nationale Stromnetz angeschlossen, leidet allerdings, wie viele Gesundheitseinrichtungen unter einer Vielzahl ungeplanter Stromausfälle. Im ganzen Land ist mit

<sup>1</sup> Google Maps

<sup>2</sup> Peter Asare-Nuamah, Ebo Botchway; "Understanding climate variability and change: analysis of temperature and rainfall across agroecological zones in Ghana", *Heliyon*, Volume 5, Issue 10, 2019, e02654, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02654>.

kontinuierlichen, anhaltenden, unregelmäßigen und unvorhersehbaren Stromausfällen zu rechnen, die in Ghana als „Dumsor“ bekannt sind. Das Krankenhaus war bereits vor Projektbeginn mit zwei Solaranlagen ausgestattet sowie mit Dieselgeneratoren zur Überbrückung von Stromausfällen.

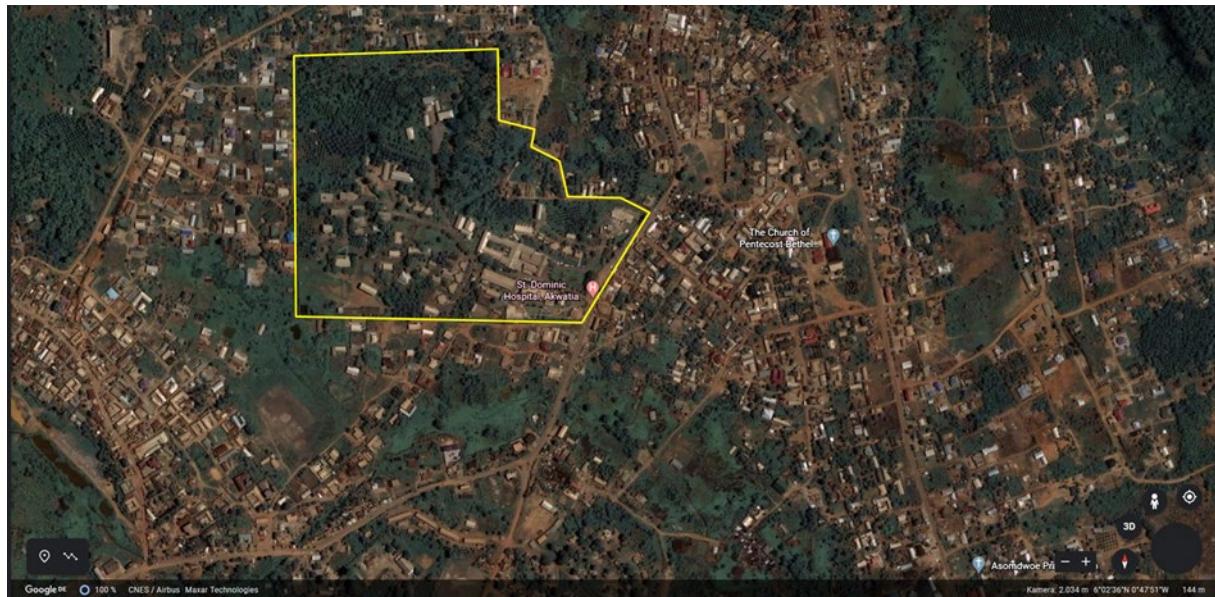


Abbildung 2: Satellitenbild der Umgebung des St. Dominic Hospital<sup>3</sup>

### *Kologo Health Centre*

Das Kologo Health Centre ist ein öffentliches Gesundheitszentrum in der Upper East Region von Ghana (siehe Abbildung 3). Es bietet allgemeine Gesundheitsdienstleistungen an. Die Einrichtung verfügt über etwa 11 Betten, eine Entbindungsstation, eine Ambulanz, Krankenzimmer, eine Krankenstation, einen Kreißsaal, ein Impfstofflager usw. Kologo ist ein kleines, ländliches Dorf 20 km südlich von Navrongo, nahe der nördlichen Grenze zwischen Ghana und Burkina Faso.

Das Kologo Health Centre ist zu Projektbeginn ebenfalls an das nationale Stromnetz angeschlossen und hat mit unregelmäßigen Stromausfällen zu kämpfen. Die Gesundheitseinrichtung verfügt bisher weder über eine Solaranlage noch über einen Dieselgenerator, um solche Stromausfälle zu überbrücken. Aus diesem Grund haben die EnerSHeLF-Projektpartner beschlossen, im Kologo Health Centre ein 5-kW-PV-Batterie-Energiesystem zu installieren (Teil von WP2 in Abstimmung mit WP3), um weitere Entwicklungen zu ermöglichen.

### *Saint Michael's Hospital*

Das 1958 gegründete St. Michael's Hospital befindet sich in der Kleinstadt Pramso, etwa 20 km südöstlich von Kumasi, der Hauptstadt der Ashanti Region (siehe Abbildung 4). Das Krankenhaus verfügt über 99 Betten, zu denen medizinische, chirurgische, pädiatrische, geburtshilfliche und augenärztliche Abteilungen gehören, in denen jährlich etwa 60.000 Patienten ambulant behandelt werden. Zusätzlich zu den Leistungen des Krankenhauses gibt es mobile Kliniken, die jeden Monat fünf

<sup>3</sup> Google Earth

abgelegene Dörfer besuchen, um Gesundheitsdienstleistungen für Mütter und allgemeine medizinische Beratung in die Nähe der Gemeinden zu bringen, die das Krankenhaus versorgt.

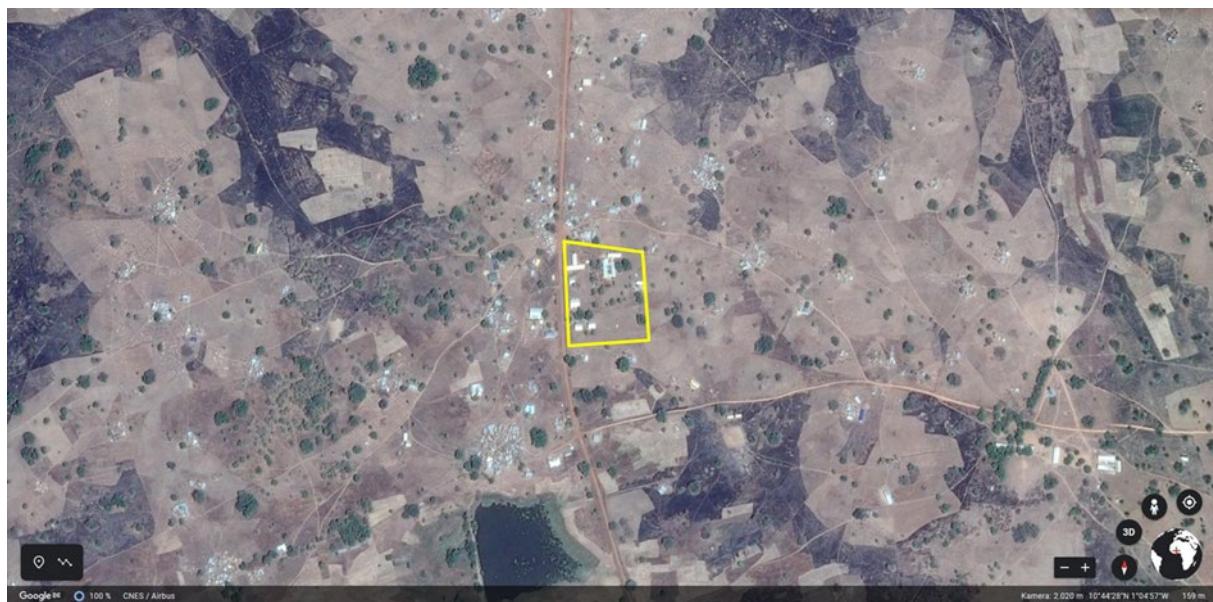


Abbildung 3: Satellitenbild der Umgebung des Kologo Health Centre<sup>4</sup>



Abbildung 4: Satellitenbild der Umgebung des St. Michael's Hospital<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Google Earth

<sup>5</sup> Google Earth

Tabelle 2 zeigt die technische Messmatrix und fasst die Messaktivitäten an den verschiedenen Standorten zusammen.

*Tabelle 2: Matrix für technische Messungen*

Facility	WP 3.1			WP 3.2		
	Load	Sub-unit	Weather station	Cloud camera	Dust	Solar radiation
St. Dominic Hospital, Akwatisa	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kologo Health Center	✓	✓	✓	✓	✓	✓
St. Michael's Hospital, Pramso	✓		✓			

Die COVID-19-Pandemie hat einzigartige Umstände für die Koordinierung von Messaktivitäten geschaffen. Gleichzeitig haben empfindliche Messsysteme, kabellose Datenübertragungen und lokale Bedingungen zu immer wiederkehrenden Herausforderungen geführt. Diese Herausforderungen erforderten ein besonderes Maß an Koordination mit allen Beteiligten. Insbesondere durch die große Unterstützung von ghanaischen Kollegen, die zu den Messstellen reisten oder vor Ort waren, konnte eine Vielzahl von Problemen gelöst werden. Trotz dieser engen Zusammenarbeit konnten Verzögerungen nicht ganz vermieden werden. Mitarbeitende der H-BRS unterstützten die Aktivitäten vor Ort durch Fernzugriff auf die Systeme in Ghana in Abhängigkeit von der Funktionalität des mobilen Internets und durch die Bereitstellung von bebilderten Anleitungen für die Mitarbeitenden vor Ort.

Nachdem die Reisebeschränkungen aufgrund der COVID-19-Pandemie aufgehoben wurden, konnten alle drei Standorte besucht werden, um die ordnungsgemäße Einrichtung aller Geräte sicherzustellen, um Wartungsarbeiten durchzuführen, sowie defekte Komponenten auszutauschen. Auf diese Weise konnte die ordnungsgemäße Funktion aller installierten Geräte sichergestellt werden.

Insgesamt wurde durch das TAP 3.0 der ordnungsgemäße Betrieb aller an den drei EnerSHeLF-Standorten installierten automatischen Messeinrichtungen sichergestellt. Die ordnungsgemäße Speicherung der gesammelten Daten wurde durch regelmäßige Abrufe der Daten auf einem H-BRS-Server gewährleistet. Aufgrund des schwierigen Zugangs wurde die Datenbereitstellung neben dem WADI-Server von WASCAL auch über den von H-BRS gehosteten FTP-Server organisiert.

Ein Überblick über alle EnerSHeLF-Daten wurde auf dem EMS-Meeting in Bonn 2022 präsentiert.

### 3.5. TAP3.1: Strombedarf desghanaischen Gesundheitssektors

#### Literaturrecherche

Die Literaturrecherche zu bestehenden Strombedarfsmodellen zeigt, dass in der Literatur nur wenige Daten zum Energiebedarf von Gesundheitseinrichtungen in Ghana verfügbar sind. Was die Lastmodelle betrifft, so zeigt sich eine große Anzahl an methodischen Ansätzen. Während einige Lastmodelle auf individuellen Lasten beruhen, verwenden andere verallgemeinerte Lastprofile, um die Lastprognosen für das Steuerungsproblem zu bestimmen. Daher haben wir uns zunächst entschieden, nach ähnlichen Lastprofilen in unseren Lastmessungen zu suchen. Dies könnte jedoch auf allgemeinere Teilbereiche des Krankenhauses wie Verwaltung oder Wäscherei beschränkt sein, während die Nutzungsmuster und die Geräteausstattung von Gesundheitseinrichtung zu Gesundheitseinrichtung unterschiedlich sein könnten. In der Literatur fanden wir eine Reihe von Ansätzen, die inkrementelles Lernen und künstliche Intelligenz verwenden. Wir haben uns für diesen Ansatz entschieden, da er flexibler ist und sich daher besser für Gesundheitseinrichtungen mit ihrer großen Bandbreite an Belastungen und Nutzungsmustern eignet. Wir haben eine Reihe von Artikeln gefunden, in denen Kurzzeitprognosen

auf der Grundlage künstlicher neuronaler Netze vorgestellt werden, die vielversprechende Ergebnisse im Hinblick auf die Zuverlässigkeit und Qualität der Prognosen liefern. Wir haben einige dieser Prognosemethoden bewertet und mit eigenen Entwicklungen verglichen. Als Fallbeispiel dienten hierbei Lastdaten des St. Dominics Hospitals in Akwania. Die Ergebnisse wurde als begutachtete Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift veröffentlicht (Chaaraoui et al., 2021).

### *Sammeln von Daten und Lastmessungen*

Um den Strombedarf der ghanaischen Gesundheitseinrichtungen an den EnerSHeLF-Standorten in Kologo, Akwania und Kumasi zu ermitteln, wurden elektrische Lastmessungen durchgeführt. Die Daten werden zur Entwicklung eines Strombedarfsmodells für die Planung sowie eines Lastprognosewerkzeugs für die Systemsteuerung verwendet. Messungen der elektrischen Last ermitteln das Nutzungsverhalten einzelner elektrischer Verbraucher. Als Verbraucher kommen sowohl Unterabteilungen als auch einzelne medizinische Geräte in Frage. Daher werden an den verschiedenen Standorten unterschiedliche Lastmesseinrichtungen eingesetzt. Die Auswahl der Lastmesseinrichtungen für jeden Standort richtet sich nach den Anforderungen für die einzelnen Messungen. Für die Datenerhebung an den drei EnerSHeLF-Standorten wurden die folgenden Lastmessgeräte verwendet:

- Econ sens3 (Abbildung 5) wird für die Messung und Analyse von Spannung und Stromverbrauch mit einer Abtastrate von 1/s verwendet. Die Daten können manuell mit einer Abtastrate von 1/s exportiert werden. Bei einer Internetverbindung können die Daten auch automatisch an einen FTP-Server gesendet werden, allerdings nur mit einer Abtastrate von 1/min.

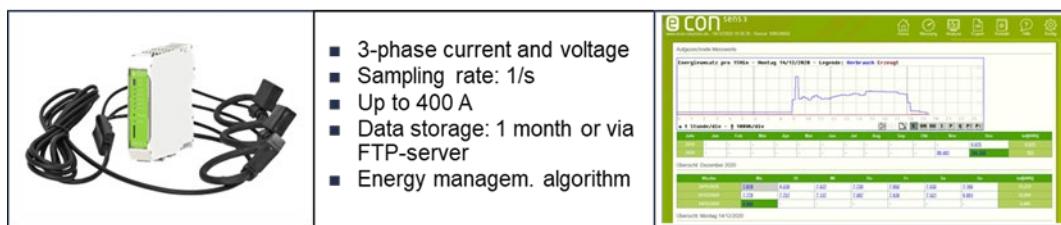


Abbildung 5: Econ Sens3-Hardware; Mitte: Schlüsseldaten; rechts: integrierte Software, Beispiel für direkte Analysen.

- Der SmartCost-Energiemonitor (Abbildung 6) besteht aus 1 oder 3 Rogowski-Spulen zur Messung von 1- oder 3-phsigem Strom bis zu 80 A oder 300 A, je nach Produktdesign. Es ist möglich, die Daten online über die App zu überwachen und die Daten in .xls oder .csv-Dateien mit einer Abtastrate von 1/min zu exportieren.

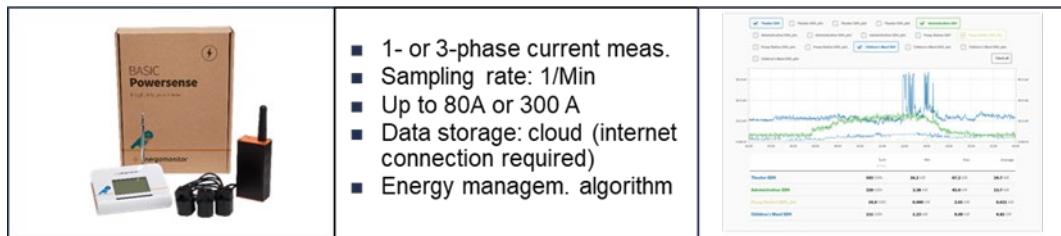


Abbildung 6: SmartCost-Energiemonitor-Hardware; Mitte: Eckdaten; rechts: Software-App im Browser, Online-Überwachung der Daten.

- Der Voltcraft-Energielogger (Abbildung 5) protokolliert den Energieverbrauch (Spannung, Strom, Frequenz, etc.) jedes angeschlossenen elektrischen Verbrauchers. Die Analysesoftware VOLTSOFT ermöglicht die Anzeige und den Export der Energieverbrauchsdaten im .csv-Format.

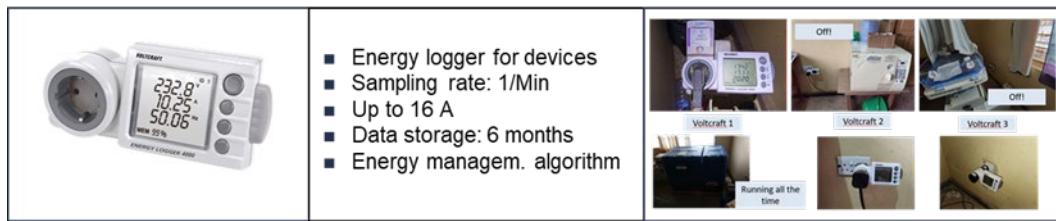


Abbildung 7: Voltcraft-Energielogger-Hardware; Mitte: Eckdaten; rechts: Einsatz der Logger im Kologo Health Centre.

Aufgrund der Pandemie verzögerten sich die Installation der Messinstrumente und die Lastmessungen. Aus diesem Grund wurde zunächst mit historischen Daten der Jahre 2015-2017 aus Akwatia gearbeitet, die bereits vor dem EnerSHeLF-Projekt in Akwatia gesammelt wurden. Nach Erhalt der ersten Lastmessungen aus dem St. Michaels Hospital in Pramso, Kumasi, und dem St. Dominics Hospital in Akwatia wurde für einzelne Teilbereiche der Krankenhäuser deskriptive Analysen durchgeführt. Die Daten deuten auf typische Lastprofile für typische Unterabschnitte hin, wie z. B. den Verwaltungstrakt oder die Wäscherei, die sich gegenseitig ähneln. Dies legt nahe, dass es möglich sein könnte, die Lastprofile solcher Unterabschnitte auf eine beliebige ghanaische Gesundheitseinrichtung mit ähnlichen Abschnitten zu extrapolieren.

Aufgrund der hohen zeitlichen Frequenz unserer Messungen werden starke Schwankungen in der Last bei einer zeitlichen Auflösung von weniger als  $\frac{1}{4}$  h sichtbar. Diese Schwankungen werden kritisch für die Stabilität des in WP 3.3b entwickelten Regelungsalgorithmus mit hohen Auswirkungen in Bezug auf die Degradation des Dieselgenerators und des Batteriespeichersystems. Darüber hinaus steigt die gemessene Maximallast mit einer höheren zeitlichen Auflösung. Dies hat einen Einfluss auf Dimensionierungentscheidungen bei der Auslegung von PV-Diesel-Hybridsystemen sowie auf die erwartete Lebensdauer des Batteriespeichersystems.

Aufgrund der dreiphasigen Messungen an den Standorten konnten wir auch schiefe Lasten in mehreren Abschnitten des Krankenhauses identifizieren. Diese Asymmetrie kann zu einem ineffizienten Betrieb von Wechselrichtern und Dieselgenerator führen sowie zu einem erhöhten Verschleiß.

Während die Lastmuster für ähnliche Abschnitte an den beiden Krankenhausstandorten Ähnlichkeiten aufweisen, sieht die Laststruktur im Gesundheitszentrum von Kologo ganz anders aus. Die Last wird von Kühlgeräten zur Lagerung von Impfstoffen und Medikamenten dominiert, mit einigen zusätzlichen Lastspitzen, z. B. durch den Einsatz der Zentrifuge oder des Inkubators. Daher muss das Lastprognosemodell entsprechend angepasst werden, um zu unterscheiden, ob es das Lastverhalten eines Krankenhauses oder das eines kleineren kommunalen Gesundheitszentrums prognostiziert.

Neben Lastmustern wurden auch landesweite mehrjährige Daten zu Stromausfällen in 10 Krankenhäusern durch den Partner KNUST analysiert. Diese wurden von dem Ghaniischen Netzbetreiber NEDCo zur Verfügung gestellt. In Anbetracht der geografischen Verteilung der Krankenhäuser wurde ein Zusammenhang zwischen der Dauer/Häufigkeit ungeplanter Stromausfälle und der Entfernung des Krankenhauses von den großen Zentren sowie ein Nord-Süd-Gefälle sowohl bei den Ausfallhäufigkeiten als auch bei der Ausfalldauer festgestellt. Dies entspricht dem Entwicklungsgefälle innerhalb von Ghana vom Süden nach Norden. Die Korrelation konnte bei geplanten Stromausfällen der NEDCo nicht reproduziert werden, was auf einen diskriminierungsfreien Betrieb durch das Versorgungsunternehmen hindeutet. Für die Entwicklung von Lastmodell und Steuerungsalgorithmen, war es möglich auf diese Daten für Blackout-Simulationen zurückzugreifen.

Der Zugang zu allen gesammelten Daten für wissenschaftliche Zwecke ist über den von WASCAL verwalteten WADI-Server möglich.<sup>6</sup>

#### *Entwicklung eines Lastprognosemodells*

Auf der Grundlage unserer Literaturrecherche zu Lastprognosemodellen wurde ein Ansatz für Kurzzeitprognosen entwickelt, der auf künstlichen neuronalen Netzen aufbaut und als Input für den Systemsteuerungsalgorithmus fungiert. Um zu entscheiden, welcher Ansatz am besten geeignet ist, haben wir einige Prognosemethoden anhand von Lastdaten aus Akwatia und in der Literatur vorgeschlagenen Methoden bewertet und mit eigenen Entwicklungen verglichen (Chaaraoui et al., 2021):

1. Algorithmus des saisonalen autoregressiven integrierten gleitenden Durchschnitts (SARIMA)
2. Inkrementelle lineare Regressions (ILR) Methode
3. Künstliche neuronale Netze mit Neuronen mit Langzeitgedächtnis (LSTM)
4. Spezieller statistischer Ansatz, der im Rahmen dieses Projekts formuliert wurde

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Algorithmen eine hohe Genauigkeit und unterschiedliche Robustheit gegenüber Lastverschiebungssereignissen, Gradienten und Rauschen aufweisen. Während der SARIMA-Algorithmus und das lineare Regressionsmodell extreme Fehlerausreißer aufweisen, schneiden die Methoden über das LSTM-Modell und die benutzerdefinierten statistischen Ansätze besser ab und weisen eine stabile Fehlerverteilung auf. Die beste Leistung wird von der KI-basierten LSTM-Methode und dem benutzerdefinierten statistischen Ansatz erzielt, der daher als Input für den Algorithmus zur modelprädiktiven Steuerung (MPC) verwendet wurde (WP3.3b).

Die Ergebnisse wurden im Januar 2021 in der von Fachleuten begutachteten Open-Access-Zeitschrift "energies" veröffentlicht (Chaaraoui et al., 2021). Die Krankenhausleitung des St. Dominic's Hospital wurde über die Veröffentlichung informiert.

### **3.6. TAP3.3: Werkzeuge zur Länder- und Sektor-spezifischen Systemplanung und Anlagenoptimierung**

#### *Literaturrecherche*

Es wurde eine Literaturrecherche sowohl für bestehende Bibliotheken als auch für bestehende Algorithmen zur modellprädiktiven Steuerung (MPC) durchgeführt.

Die Literaturrecherche zu bestehenden Bibliotheken ergab, dass das am häufigsten verwendete Werkzeug für die Planung von Inselnetzen HOMER zu sein scheint. HOMER zeigt jedoch erhebliche Ungenauigkeiten im Vergleich zu dem von der Fachhochschule Köln entwickelten Auslegungswerkzeug (S. Faßbender & E. Waffenschmidt, 2017), dessen Python-Version eine Reihe von Open-Source-Bibliotheken für die Simulation von erneuerbaren Energiesystemen bietet (F. Holmgren et al., 2018; Hilpert et al., 2018; Maik Naumann et al., 2017; Sabine Haas et al., 2019). Das letztgenannte Modell wurde als Grundlage für den in EnerSHeLF entwickelten MPC-Algorithmus verwendet (siehe unten).

Eine Literaturübersicht über die Verwendung verschiedener Frameworks und Entwicklungswerkzeuge für MPC-Algorithmen hat gezeigt, dass es sowohl einstufige als auch zweistufige Ansätze gibt (z. B. Dongol, 2019; Sachs & Sawodny, 2016). Neben MPC-Ansätzen wurden im Rahmen der

---

<sup>6</sup> Eine schriftliche Zustimmung der NEDCo und der Krankenhäuser zur Veröffentlichung der Blackout-Daten liegt bisher allerdings nicht vor.

Literaturrecherche alternative Toolboxen zur Systemoptimierung identifiziert, wie CasADI und GEKKO (Beal et al., 2018; Joel A E Andersson et al., 2019) sowie Algorithmen, die auf Deep Reinforcement Learning basieren (Tomah Sogabe et al., 2018). Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass sich nur wenige Studien zur MPC auf PV-Batterie-Hybrid-Systeme konzentrieren. Die Studien unterscheiden sich im Systemdesign (z. B. kein Dieselgenerator, keine Netzintegration) und in den methodischen Ansätzen. Es werden verschiedene Methoden zur Lastprognose verwendet (z. B. Profilgenerator für den häuslichen Bereich, der künstliche Daten erzeugt, oder Vorhersagen mittels eines saisonalen autoregressiven integrierten gleitenden Durchschnitts (SARIMA)). Die Variabilität der Bestrahlungsstärke muss bei den MPC-Algorithmen berücksichtigt werden. Allerdings sind die Strahlungsvorhersagen oft vereinfacht und die Strahlungswirkung von Aerosolen und Wolken wird oft nicht angemessen berücksichtigt. Der westafrikanische Monsun führt zu einer starken Saisonalität mit den Harmattan-Staubstürmen, die zu einer starken Verringerung des PV-Ertrags zwischen November und März führen. Dies soll bei den Vorhersagen im MPC-Algorithmus berücksichtigt werden, der im Rahmen von EnerSHeLF entwickelt wurde (siehe unten).

#### *Feldmessungen für Testszenarien und Modellvalidierung*

Es wurde ein Messkonzept für alle Standorte entwickelt (TAP3.0). Die notwendigen Messgeräte und Komponenten für alle Standorte wurden entsprechend beschafft. Für die Messungen im Kologo Health Centre wurden die H-BRS-Messgeräte im Vorfeld bei Westfalenwind (Paderborn, Deutschland) in der 5 kW-PV-Hybridanlage implementiert und getestet und dann per Schiff nach Tema, Ghana, verschifft.

Aufgrund der Covid19-Pandemie und der damit verbundenen Reisebeschränkungen war es den H-BRS-Mitarbeitern nicht möglich, alle Messgeräte vor Ort zu installieren. Damit die Installation der Messgeräte überhaupt stattfinden konnte, wurden für jeden Standort und jedes Messgerät individuelle Beschreibungen erstellt und Partner gesucht, die die Installation vor Ort durchführen. Die Installation im Kologo Health Center (KHC) wurde von lokalen Mitarbeitern von WestfalenWIND durchgeführt. WASCAL unterstützte H-BRS bei der Installation der H-BRS-Geräte in Kologo und bei der Aufstellung der H-BRS-Geräte zusammen mit lokalen Ingenieuren im Saint Dominic's Hospital (SDH) in Akwatisia. Lokale Mitarbeiter von WASCAL transportierten die Lastmessung auch nach Kumasi, wo Kollegen von KNUST und ein lokaler Elektriker die Geräte im Saint Michael's Hospital (SMH) in Pramso installierten. Eindrücke von den Installationsarbeiten sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die verschiedenen Messungen wurden fernüberwacht, um den ordnungsgemäßen Betrieb aller Sensoren und den Datenzugriff über eine mobile Datenverbindung zu gewährleisten. Die Datenerfassung aus der Ferne wurde ständig aufrechterhalten und verbessert, indem die Konfiguration an die sich ändernden Datenumgebungen angepasst wurde, z. B. durch den Austausch der Daten-SIM-Karte entsprechend der sich ändernden behördlichen Anforderungen oder durch den Wechsel des Datenanbieters entsprechend der unterschiedlichen lokalen Verfügbarkeit und Qualität.



Abbildung 8: Eindrücke von den Installationsarbeiten bei KHC und SDH.

Die gemessenen Lastdaten werden verwendet, um das in WP3.1 entwickelte Lastprognosetool zu testen und zu validieren. Neben den bereits beschriebenen Lastmessgeräten wurden zusätzlich die folgenden energiemeteorologischen Messgeräte installiert:

- GeoVision (Abbildung 9) ist eine 3-MP-Fischaugenkamera mit einem 360°-Panoramablick. Die Kamera ist über Ethernet mit einem PC verbunden. Da die Datenmenge sehr groß wird (100 MB pro Videoclip), können die Daten nicht über das Internet übertragen werden. Wenn die Festplatte voll ist, wird sie ausgetauscht und nach Deutschland geschickt.

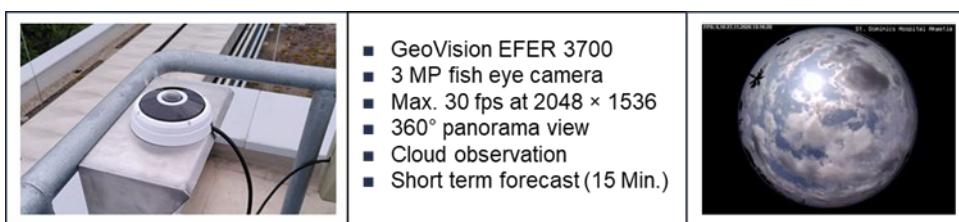


Abbildung 9: Hardware der Fischaugenkamera; Mitte: Schlüsseldaten; rechts: Streaming-Software.

- DustIQ (Abbildung 10) ist ein Verschmutzungsüberwachungssystem zur Messung des durch Staub verursachten Transmissionsverlustes oder Verschmutzungsgrades.

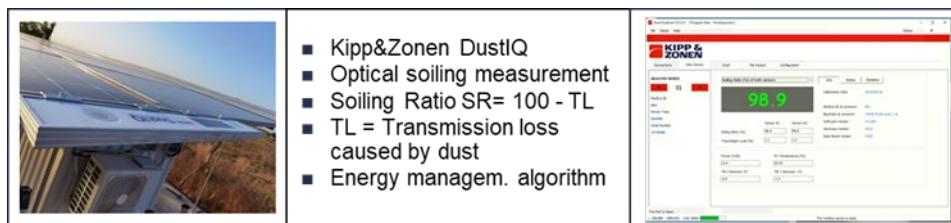


Abbildung 10: DustIQ-Hardware; Mitte: Eckdaten; rechts: Überwachungssoftware.

- RT1 (Abbildung 11) ist ein Pyranometer der Klasse C nach ISO 9060 zur Überwachung der Bestrahlungsstärke in der Modulebene (POA) von Sonne und Himmel in W/m<sup>2</sup>.

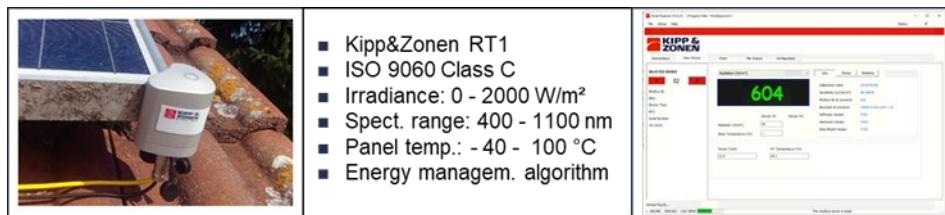


Abbildung 11: RT1-Hardware; Mitte: Schlüsseldaten; rechts: Überwachungssoftware.

Diese H-BRS-Geräte ergänzen die Daten der automatischen Wetterstationen an allen drei EnerSHeLF-Standorten, um die Bestrahlungsstärkevorhersagen zu ergänzen und zu verbessern, sie zu testen und zu validieren (WP3.2).

Vor dem Besuch der H-BRS-Mitarbeiter am KHC im Jahr 2022 war die Bildqualität des dort installierten All-Sky-Imagers aufgrund von Problemen mit dem Fokus der Kamera eher gering. Erst nach dem Besuch vor Ort war die Datenqualität akzeptabel. Um in der Zwischenzeit an der Entwicklung des Deep-Learning-Algorithmus zur Kurzfrist-Strahlungsvorhersage zu arbeiten, wurde ein Open-Access Datensatz der Universität California San Diego verwendet. Die Ergebnisse wurden auf der EMS-Jahrestagung 2022 vorgestellt und inzwischen bei der Fachzeitschrift „Advances in Science and Research“ zur Begutachtung eingereicht.

Aufgrund der Bedeutung des Harmattans für die saisonalen Schwankungen der PV-Produktion in der westafrikanischen Region wurden darüber hinaus auch die Auswirkungen verschiedener Aerosolarten auf die PV-Stromproduktion untersucht und die saisonalen und regionalen Unterschiede der Aerosolauswirkungen auf die PV-Leistung auf der Basis von CAMS-Satellitendaten analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in der Fachzeitschrift Renewable Energy publiziert (Herman-Czezuch et al., 2022). Weitere Ergebnisse wurden im Rahmen einer Masterarbeit an der H-BRS veröffentlicht (Zemo-Mekeng, 2022) und bei der Fachzeitschrift Contributions to Atmospheric Sciences zur Begutachtung eingereicht (Zemo-Mekeng et al., submitted).

#### *Entwicklung eines prognosebasierten Steuerungsalgorithmus*

Der MPC-Algorithmus wurde sowohl in Python als auch unter Verwendung des MATLAB/Simulink-Frameworks implementiert. Beide Algorithmen basieren auf dem ursprünglich von der Fachhochschule Köln entwickelten Planungswerkzeug (Ramde et al., 2020) als Basismodell, wobei die Python-Version zusätzlich weitere offene Bibliotheken zur Modellierung der Systemkomponenten nutzt. Der MPC-Algorithmus optimiert eine Kostenfunktion, die vom Strom- und Dieselpreis und - bei der Python-Version - von den Emissionskosten und den Kosten aufgrund der Alterung der Systemkomponenten abhängt. Der MPC-Algorithmus ermittelt den minimalen Ladezustand des Batteriesystems, der notwendig ist, um mögliche Blackout-Perioden zu überbrücken und gleichzeitig den Dieselverbrauch

und die ökologischen Auswirkungen zu reduzieren, und zwar über einen definierten Horizont, der auf der statistisch zu erwartenden Blackout-Länge in der jeweiligen Region basiert.

Der MPC-Algorithmus verwendet als Eingabe Lastprognosen, die mit der KI-basierten LSTM-Methode (Chaaraoui et al., 2021) aus WP3.1 erstellt wurden. Die Integration von Einstrahlungsdaten aus dem in WP3.2 entwickelten Wettervorhersagemodell wurde ebenfalls in beide Frameworks implementiert. Darüber hinaus beinhaltete die Python-Version eine nahtlose (seamless) Vorhersage auf der Grundlage aller der Wolkenkamerabilder unter Verwendung des vortrainierten Deep-Learning-Modells von Chaaraoui et al. (2022).

Zu Benchmarking-Zwecken verglichen wir die Ergebnisse für das Systemverhalten mit MPC auf der Grundlage von Vorhersagen aus WP3.1 und WP2.3 mit den Ergebnissen mit MPC unter Verwendung von (a) Persistenz und (b) perfekten Vorhersagen (siehe unten).

#### *Entwicklung von Testszenarien*

Das Systemverhalten wurde für verschiedenen Szenarien analysiert. Die Testszenarien wurden anhand von 8 Einflussfaktoren auf das Systemverhalten entwickelt, die sich in externe Faktoren (Cluster a), wie Wetterlage, Lastsituation und Blackouts, technische Systemkomponenten (Cluster b), d.h. insbesondere die Dimensionierung der Systemkomponenten, und die Prognosemethode und den Prognosehorizont (Cluster c) gliedern, was zu den folgenden Einflussfaktoren führt:

Tabelle 3: Identifizierte Einflussfaktoren

Einflussfaktor		Cluster
E1	Wetterlage	a
E2	LAstbedarf	a
E3	Blackout-Muster	a
E4	PV-Dimensionierung	b
E5	Batterie-Dimensionierung	b
E6	Meteorologische Prognosemethode	c
E7	Lastprognose-Methode	c
E8	Vorhersage-Horizont	c

Die Szenarien stellen Variationen dieser Einflussfaktoren dar und geben Aufschluss über die Robustheit des Algorithmus bei unterschiedlichen externen Faktoren (Cluster a), Empfehlungen zur Dimensionierung von PV-Diesel-Hybridsystemen (Cluster b) und die Bevorzugung bestimmter Prognosemethoden und Prognoseparametrisierungen im prognosebasierten Regelalgorithmus (Cluster c). Dies führt zu den Szenarioblöcken, die alle diese Einflussfaktoren berücksichtigen und sich zu insgesamt 40 bewerteten Testszenarien summieren.

#### *Modellierung typischer Prognoseszenarien und Validierung*

Die Prognoseszenarien bestehen aus den folgenden Elementen:

Szenario	Wettervorhersage	Lastprognose
S1	Perfekte Vorhersage	Perfekte Vorhersage
S2	Vorhersage des Wetterdienstes	Perfekte Vorhersage
S3	Persistenz-Vorhersage	Perfekte Vorhersage

S4	Perfekte Vorhersage	LSTM-Vorhersage
S5	Perfekte Vorhersage	Persistenz-Prognose

Perfekte Vorhersage bedeutet, dass wir perfektes Wissen über die Zukunft haben, Met-Service-Vorhersage, dass wir Daten aus numerischen Wettervorhersagen verwendet haben, LSTM-Vorhersage, dass wir das in WP 3.1 entwickelte Lastmodell verwendet haben, und Persistenzvorhersage, bei der wir davon ausgehen, dass das Wetter dasselbe ist wie gestern und dass die Last dieselbe ist wie eine Woche zuvor.

Eine systematische Untersuchung der Szenarien wurde in der Masterarbeit von Bebber (2021) veröffentlicht und auf der SDEWES Konferenz 2023 präsentiert (Meilinger et al., 2023). Die Ergebnisse der Anwendung des Matlab/Simulink-Frameworks auf das SDH in Akwania zeigen eine deutliche Reduzierung des Dieselverbrauchs und eine erhöhte Zuverlässigkeit des Systems. Außerdem kann ein hoher Eigenverbrauch beibehalten werden, und eine erhöhte Abhängigkeit vom öffentlichen Netz ist nicht zu beobachten. Die völlige Unabhängigkeit vom öffentlichen Netz und vom Dieselgenerator kann jedoch bei einer vernünftigen Dimensionierung und Preisgestaltung des Systems nicht erreicht werden, was hauptsächlich auf die Notwendigkeit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung für den Gesundheitssektor zurückzuführen ist. Die Ergebnisse zeigen auch große Abweichungen zwischen den Einstrahlungsvorhersagen der Met-Services und den vor Ort gemessenen PV-Daten. Dies zeigt, wie wichtig die im Rahmen von WP3.2 erzielten Verbesserungen der Einstrahlungsvorhersagen für Ghana (Sawadogo et al., 2023ab) sind.

Aufgrund der Verzögerungen aufgrund der Corona-Pandemie standen erste nutzbare Daten mit ausreichender Qualität und Quantität aus den EnerSHeLF-Feldmessungen erst Mitte November 2022 zur Verfügung. Daher konnten diese bisher nur bedingt in die Entwicklung des MPC-Reglers einfließen. Die bisherigen Tests für die EnerSHeLF Standorte basieren weitgehend auf den jeweils verfügbaren Datenfragmenten. Die Arbeiten deuteten darauf hin, dass die Nutzung eines MPC-Reglers im Gegensatz zur regelbasierten Steuerung für alle Standorte zu einer Reduktion der Kosten und einer Erhöhung der Ausfallsicherheit eines solchen PV-Diesel-Hybridsystems führen. Dies kann aber erst abschließend mit dem solideren Datensatz validiert werden, der inzwischen ebenfalls als Projektergebnis verfügbar ist. Die abschließenden Arbeiten werden nach der Projektlaufzeit im Rahmen einer Promotion stattfinden. Es ist geplant, die Ergebnisse des MPC-Reglers anhand der Felddaten gegen Ende 2023 in einer von Fachleuten begutachteten Open-Access Zeitschrift zu veröffentlicht.

### 3.7. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP3

Das Messkonzept wurde erstellt und dient als Referenz für den Datenmanagementplan. Es wurden drei Messstandorte ausgewählt, die verschiedene Arten von Gesundheitseinrichtungen und unterschiedliche Klimazonen abdecken: Das St. Dominic Hospital (SDH) in Akwania, das Kologo Health Centre (KHC) und das St. Michael's Hospital SMH in Pramso. Eine Übersicht über die im Projekt gewonnenen Daten und Ergebnisse wurden als Policy Brief auf der EnerSHeLF Webseite veröffentlicht.

Nachdem die Geräte nach Ghana verschifft worden waren, konnte die Installation aufgrund der COVID19-Pandemie nicht wie geplant stattfinden. Reisebeschränkungen im Rahmen der COVID-19-Pandemie und unvorhersehbare Umstände an den einzelnen Einsatzorten führten zu einer Reihe von Herausforderungen bei der Installation und dem Betrieb der H-BRS-Ausrüstung. Mit Hilfe der Projektpartner und lokaler Experten vor Ort konnten die meisten dieser Probleme gelöst werden. Die Fernkoordination dieser Aktivitäten, die Beauftragung lokaler Arbeitskräfte und die Erstellung

illustrierter Anleitungen für letztere führten jedoch zu einer zusätzlichen Arbeitsbelastung des H-BRS-Personals und zu Verzögerungen bei der Datenerhebung.

Durch maßgeschneiderte Beschreibungen und Fernunterstützung konnten wir lokale Partner unter Vertrag nehmen, die den Großteil der Messgeräte in unserem Auftrag installieren konnten. Die installierten Geräte wurden für Lastmessungen und energiemeteorologische Messungen verwendet. Die aufgezeichneten Daten wurden zur Modellvalidierung und als Input für das Training der KI-basierten Algorithmen verwendet, die im Rahmen der Last- und Einstrahlungsprognosen eingesetzt werden.

Diese Algorithmen wurden verwendet, um die Eingangsdaten für den neu entwickelten MPC-Algorithmus für PV-Hybridsysteme zu verbessern. Die Auswirkungen auf die Systemleistung wurden anhand von Daten aus verschiedenen Standorten untersucht. Die Ergebnisse wurden auf Fachkonferenz vorgestellt und als begutachtete Publikationen in Open-Access-Fachzeitschriften sowie im Rahmen von zwei Masterarbeiten veröffentlicht. Eine weitere Publikation ist in Planung. Weitere Ergebnisse sollen in Form einer Dissertation publiziert werden (in Vorbereitung).

## 4. Sachbericht AP4: Erfordernisse einer nachhaltigen Energiewende aus interdisziplinärer Perspektive

### 4.1. AP Lead

- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS)

### 4.2. Verbundpartner

- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS)

### 4.3. Ziel von AP4

Dieses AP zielt auf eine integrative interdisziplinäre Untersuchung, um die Wechselwirkungen zwischen institutionellem und technologischem Wandel innerhalb des Gesundheits-Energie-Nexus besser zu verstehen.

### 4.4. TAP4.1: Integrative interdisziplinäre Analyse der Projektergebnisse

#### *Literaturrecherche*

Während der gesamten Projektlaufzeit griffen die Forscher von TAP 4.1 ständig auf die akademische Literatur zum Thema inter- und transdisziplinäre Forschung (IDR & TDR) zurück. Diese Literatur diente als Grundlage für ein Paper über Chancen und Herausforderungen der inter- und transdisziplinären Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts. Darüber hinaus wurde eine umfassende Literaturrecherche nach dem PRISMA-Modell durchgeführt, um einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu geben. Während der gesamten Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse in EnerSHeLF integriert, um den Austausch zwischen technisch-naturwissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Disziplinen zu fördern, insbesondere durch die Einführung eines monatlichen Seminars, das einen Raum für den Austausch bieten sollte.

#### *Interviews*

Während der Projektlaufzeit wurden vier Runden halbstrukturierter qualitativer Interviews mit den Projektpartnern durchgeführt. Ziel der insgesamt 43 Interviews war es, die Fortführung und Veränderung der Zusammenarbeit innerhalb und zwischen den Arbeitspaketen zu messen. Dies wurde

in einem Häufigkeitsnetz der Zusammenarbeit dargestellt. Darüber hinaus wurden die Interviewpartner zu ihrer Perspektive auf IDR und TDR sowie zu den damit verbundenen Chancen und Herausforderungen befragt.

Nach der Zusammenstellung aller Interviews wurden umfassende Zusammenfassungen verfasst, die aus einer redigierten Transkription und für die Forschungsfrage relevanten Informationen bestanden. Mit Hilfe des Softwaretools Atlas.ti zur qualitativen Datenanalyse wurden die Zusammenfassungen anschließend ausgewertet. Der erste Schritt der Analyse bestand in der Kodierung von Passagen und Zitaten, um den Grad der Zusammenarbeit im Projekt zu entschlüsseln. Durch den Vergleich der Ergebnisse mit dem offiziellen Arbeitsplan von EnerSHeLF wurde die thematische Aufschlüsselung und der Auslöser für die Zusammenarbeit und den Austausch hervorgehoben. In einem zweiten Schritt wurden die Codes gruppiert, um Kategorien zu bilden. Die Antworten auf die Fragen, die darauf abzielten, die Häufigkeit der Zusammenarbeit verschiedener Arbeitsgruppen aufzuschlüsseln, wurden in Microsoft Excel übertragen und zu einer Kontingenztabelle hinzugefügt. Die Kontingenztabelle enthielt zugewiesene Werte für die Häufigkeit der Zusammenarbeit der einzelnen Arbeitsgruppen mit den anderen Arbeitsgruppen.

Um den Grad der Zusammenarbeit darzustellen, wurde ein Kollaborationshäufigkeitsnetz (CFN) entwickelt. Es basiert auf dem Participation Strength Network (PSN), das von Khan et al. (2019) vorgeschlagen und von Uddin et al. (2021) angepasst wurde, um die relative Beteiligung der akademischen Disziplinen am interdisziplinären Fördererfolg zu messen. Abgeleitet von der für das PSN verwendeten Visualisierung wird das CFN in einer angepassten Netzwerkstruktur dargestellt, wobei jeder Knoten ein Arbeitspaket des Projekts darstellt, eine Kante zwischen den Knoten (dargestellt als Linie) die Zusammenarbeit der verbundenen Arbeitspakete repräsentiert und die Dicke der Linie die Häufigkeit der Zusammenarbeit darstellt. Die Ergebnisse der Netzwerkanalyse sind unten dargestellt.

Die Analyse zeigt, dass die disziplinäre Nähe die Zusammenarbeit wahrscheinlich erhöht. Dies bedeutet, dass die technisch-naturwissenschaftlichen Teil-Arbeitspakete untereinander häufiger zusammenarbeiten als mit den sozioökonomischen Teil-Arbeitspaketen und umgekehrt. Insgesamt stimmen die durch die qualitative Analyse der Interviews ermittelten Chancen und Herausforderungen mit dem aktuellen Stand der Literatur zu IDR und TDR überein. Allerdings gibt es kontextspezifische Unterschiede, wie z. B. die durch die Covid-19-Pandemie verursachten Herausforderungen und die zunehmende Bedeutung der digitalen Kommunikation. Abschließend wurden sieben Vorschläge für eine verbesserte IDR- und TDR-Forschung unterbreitet: Knotenpunkte der Zusammenarbeit schaffen, interdisziplinäre Ausbildung während des Projekts etablieren, ein gemeinsames Arbeitspaket einrichten, das Bewusstsein für ein gemeinsames Ziel stärken, Zeit aufwenden, um Vertrauen zwischen den Projektpartnern zu entwickeln, das Förderschema anpassen, um die Hierarchie zwischen internationalen und deutschen Partnern zu nivellieren, und eine zunächst längere Projektdauer anstreben.

Die Ergebnisse der Analyse wurden in ein Paper (Bauhof et al., in Vorbereitung) eingearbeitet. Es wird in der H-BRS IZNE Working Paper Series veröffentlicht.

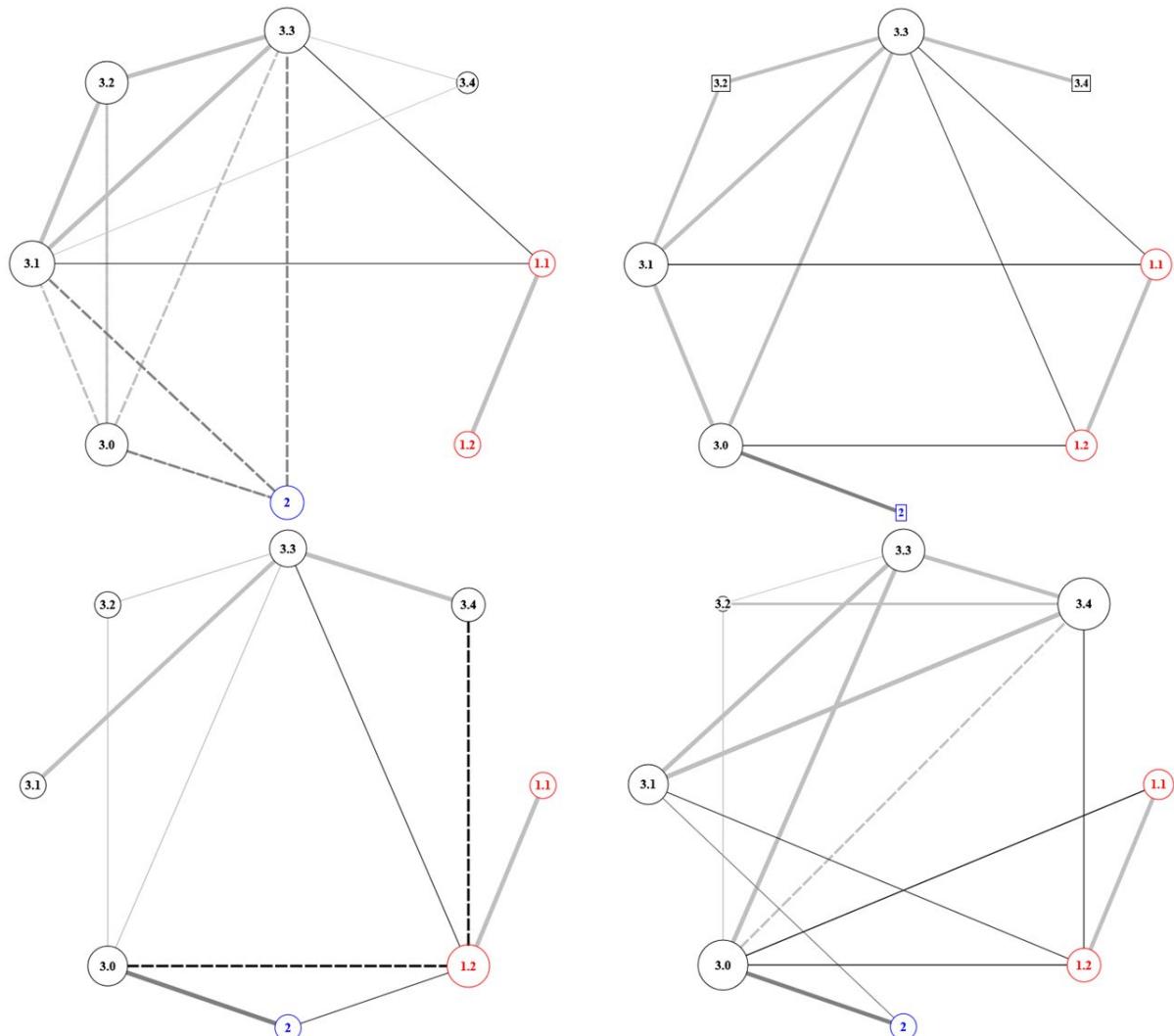


Abbildung 12: Kollaborationsfrequenz für alle vier Interviewrunden.

### *Beobachtungen*

AP4 nahm während des gesamten Projekts an den meisten AP-übergreifenden Treffen teil. Ziel war es, Einblicke in die Zusammenarbeit über verschiedene Arbeitspakete hinweg zu gewinnen und mögliche Synergien aufzuzeigen. Darüber hinaus wurden die Beobachtungen für die Analyse in dem oben erwähnten Paper verwendet.

### *Monatliche Seminare*

Im Jahr 2020 wurden monatliche Seminare für alle Projektpartner eingerichtet, die sich als wertvolles Instrument für den Austausch erwiesen haben und von allen Arbeitsgruppen positiv bewertet wurden. In den Seminaren stellte jeweils eine Arbeitsgruppe ihre aktuelle Arbeit vor und es blieb Zeit für Fragen und Diskussionen. Insgesamt fanden während der Projektlaufzeit 21 Seminare statt. Alle Seminare wurden online abgehalten, so dass sowohl die ghanaischen als auch die deutschen Projektpartner teilnehmen konnten.

## 4.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP4

Zunächst wurde eine Literaturrecherche zu den Chancen und Herausforderungen von IDR und TDR durchgeführt und in einem umfassenden Bericht (in Vorbereitung) zusammengefasst. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein monatliches Seminar mit allen Arbeitsgruppen initiiert, um den

Austausch und die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern zu fördern. Das Seminar wurde während der gesamten Projektlaufzeit durchgeführt und von den Teilnehmern gut angenommen. Um mehr über die Häufigkeit des Austauschs zwischen den Arbeitsgruppen sowie ihre Sichtweise auf IDR und TDR im Allgemeinen und speziell im Projekt zu erfahren, wurden über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren in vier getrennten Gesprächsrunden Interviews mit allen Arbeitsgruppen geführt. Die Ergebnisse der Analyse der erhobenen Daten dienen als Grundlage für ein Paper zu IDR und TDR im Kontext von EnerSHeLF. Basierend auf der Analyse der Interviews wurden eine Reihe von Vorschlägen für zukünftige IDR- und TDR-Projekte gemacht. Das Paper wird in der H-BRS Working Paper Series veröffentlicht und wird ebenfalls bei akademischen Journals eingereicht.

## 5. Sachbericht AP6: Management und Koordination

### 5.1. AP Lead

- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS)

### 5.2. Verbundpartner

- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS)

### 5.3. Ziel von AP6

Ziel von AP6 ist die Organisation und Koordinierung von administrativen Abläufen, Koordinierung des Verwertungsplans, Organisation von Projekttreffen. AP6 umfasst alle Aufgaben, die für den reibungslosen und erfolgreichen Ablauf des Projekts erforderlich sind.

### 5.4. TAPP6.1: Projektkoordination

#### *Verträge*

Arbeitspaket 6 hat die Erstellung und Finalisierung von Vertragsunterlagen, die Kommunikation mit allen beteiligten Vertragspartnern sowie die Unterzeichnung der folgenden vertraglichen Vereinbarungen organisiert:

- Kooperationsvertrag
- Weiterleitung von Bundesmitteln an die ghanaischen Partner UDS1, UDS2 und KNUST
- Verträge über die Nutzung von Geräten, die aus Projektmitteln angeschafft und während der Projektlaufzeit an die ghanaischen Projektpartner übergeben wurden
- Übertragung des Eigentums der im Vorhaben beschafften Gegenstände nach Ende der Projektlaufzeit (noch nicht abgeschlossen)

#### *Organisation und Ausrichtung regelmäßiger Projekttreffen inkl. Kick-off Meeting*

AP6 war für die Organisation folgender Veranstaltungen in Deutschland und in Ghana sowie für die Ausrichtung regelmäßiger virtueller Projekttreffen verantwortlich:

- Kick-off Workshop in Accra, Ghana (5.-6. September 2019) inklusive optionaler Reise zum Studienort in Akwatisa (Saint Dominic's Hospital) am 7. September 2019
- Regelmäßige Videokonferenzen der EnerSHeLF-Steuerungsgruppe (vor der COVID19-Epidemie)
- Regelmäßige Videokonferenzen für die an den Feldarbeiten beteiligten Wissenschaftler (während der COVID19-Epidemie)
- Monatliches Seminar (online, in Zusammenarbeit mit AP4)
- Virtuelles Jahrestreffen (online 15.-16. Dezember 2020, während der COVID19-Epidemie)
- EnerSHeLF Closing Symposium am 14. Februar 2023 (online)

- Abschlussveranstaltungen in Ghana (Verbreitungsworkshop in Accra am 7. März 2023, gefolgt von Besuchen bei Interessengruppen und Forschungseinrichtungen zwischen dem 8. und 13. März 2023)

#### *Beschaffung und Export des PV-Systems*

Für die Durchführung von Forschungs- und (Weiter-)Entwicklungszwecken hat der Partner WestfalenWind Beyond GmbH ein 5kWp-PV-Batteriesystem im Wert von ca. 30.150 EUR konfiguriert, zusammengebaut, nach Ghana verschifft und vor Ort installiert. Gemäß Projektantrag sollte das PV-System nach der Installation in den Besitz der H-BRS übergehen. AP6 hat den gesamten Planungs-, Ausfuhr-, Installations- und Übereignungsprozess begleitet und von Seiten der H-BRS alle erforderlichen Dokumente (z.B. Vergabebescheid) bereitgestellt.

#### *Exportkontrolle und Zoll*

Gemäß den Richtlinien des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) hinsichtlich Exportkontrolle und Wissenschaft musste die H-BRS vor der Ausfuhr der im Vorhaben beschafften Gegenstände eine Prüfung bzw. Klassifizierung der einzelnen Artikel durchführen. Dazu gehörte z.B. auch eine Dual-Use-Prüfung der 5-kW-PV-Hybrid-Anlage, der Messgeräte und des Zubehörs für den Betrieb des PV-Systems. Mitarbeiter aus AP3, die für die Beschaffung und die Installation der technischen Geräte der H-BRS zuständig waren, bereiteten die Anträge für die erforderlichen Ausfuhrgenehmigungen vor und stellten den Kontakt zu den zuständigen Behörden her, um eine außenwirtschaftlich korrekte Ausfuhr zu gewährleisten. AP6 unterstützte die Projektmitarbeiter in diesem Prozess und fungierte als Schnittstelle zur Hochschulverwaltung und zur Finanzabteilung, die beide stark in diese Abläufe eingebunden waren.

#### *Gemeinsame Nutzung von Daten*

AP6 hat auf der H-BRS-internen Online-Plattform LEA (Lernen und Arbeiten online) einen Bereich für alle Projektpartner eingerichtet, so dass sie jederzeit und überall problemlos projektbezogene Daten austauschen und abrufen konnten.

#### *Unterstützung bei der Berichterstattung*

AP6 hat jährlich Berichtsvorlagen für alle Projektpartner bereitgestellt, um eine einheitliche Berichterstattung gegenüber dem Geldgeber/PTJ zu gewährleisten und eine gemeinsame Struktur für die spätere Statusberichterstattung zu schaffen.

#### *Kontinuierliche Pflege und Überwachung des Verwertungs- und Veröffentlichungsplans*

AP6 verfolgte die laufenden Aktivitäten während der gesamten Projektlaufzeit und überwachte die Einhaltung der Meilensteine und Deliverables. Die Publikationsliste wurde laufend aktualisiert und der Verwertungsplan fortgeschrieben.

#### *Anträge auf Projektverlängerung*

Mit dem Ausbruch der COVID-19 Pandemie (Projektmonat 6) und den damit verbundenen Reise- und Arbeitseinschränkungen war Anfang 2021 schnell klar, dass Verzögerungen - insbesondere bei der Feldarbeit und der Datenerhebung - nicht mehr aufgeholt werden konnten und zusätzliche Zeit benötigt wurde, um die Auswertung und Veröffentlichung der Daten gegen Ende des Projekts zu ermöglichen. AP6 hat einen Antrag für eine 7-monatige Projektverlängerung vorbereitet und den Antragsprozess innerhalb des gesamten Konsortiums koordiniert. Die kostenwirksame Projektverlängerung wurde im Juli 2021 bewilligt.

Die weiterhin andauernde Pandemie führte aufgrund von Arbeits- und vor allem Reisebeschränkungen zu umfassenderen Verzögerungen bei der Datenerhebung. Vor diesem Hintergrund hat das EnerSHeLF-Konsortium im Jahr 2022 folgende Aktivitäten identifiziert, die von einer dreimonatigen kostenneutralen Verlängerung profitieren würden:

- Veröffentlichung von Ergebnissen in Fachzeitschriften
- Teilnahme an Konferenzen
- Verbreitung der Forschungsergebnisse an relevante Interessengruppen
- Durchführung der Abschlussveranstaltungen, insbesondere einer Veranstaltung in Ghana
- Fortführung der Aktivitäten in Ghana

AP6 hat einen Antrag für eine dreimonatige Projektverlängerung, die im November 2022 gewährt wurde, vorbereitet und den Antragsprozess innerhalb des gesamten Konsortiums koordiniert.

#### *Auftragsvergaben und Mittelumwidmungen*

Die Reisebeschränkungen während der COVID19 Pandemie haben zu einem enormen Anstieg des Verwaltungsaufwands geführt: Zum einen musste die Hochschule Optionen für eine internationale Auftragsvergabe prüfen um Aktivitäten an lokale Fachkräfte oder assoziierte ghaneische Partner auszulagern, weil die deutschen Projektmitarbeiter keine Reiseerlaubnis für die Durchführung der Arbeiten erhielten. AP6 wickelte die Vergabeverfahren zusammen mit der Hochschulverwaltung ab und prüfte Möglichkeiten für eine entsprechende Umwidmung der Mittel.

Bei der Installation von Messgeräten in den Gesundheitseinrichtungen stellte sich heraus, dass die örtliche Infrastruktur (insbesondere in Bezug auf die Netzstruktur) eher ungewöhnlich war, so dass AP3 seine Strategie zur Datenerhebung dementsprechend anpassen und zusätzliche Geräte kaufen musste. AP6 unterstützte beim Beschaffungsprozess und bereitete einen Antrag auf Mittelumwidmung vor.

#### **5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP6**

Die Aktivitäten von AP6 sorgten für einen reibungslosen Arbeitsablauf, eine effiziente Kommunikation innerhalb des Konsortiums und eine einheitliche Berichterstattung. AP6 organisierte Projekttreffen in Ghana und virtuelle Treffen für die Steuerungsgruppe und für die Wissenschaftler während der Corona Pandemie. AP6 hat Vertragsunterlagen vorbereitet und die fristgerechte Unterzeichnung der Dokumente innerhalb des Konsortiums oder der beteiligten Vertragsparteien koordiniert. AP6 richtete eine Plattform für den Datenaustausch ein und leistete Unterstützung bei der Beschaffung, Exportkontrolle und Zollabfertigung von Materialien. AP6 hat Anträge für Projektverlängerungen und Mittelumwidmungen vorbereitet.

## 6. Meilensteine (M)

N°	Beschreibung	Frist (Monat) <sup>7</sup>
M1.1	Datenerfassungsinstrument TAP1.1 entwickelt (semi-strukturierte Fragebögen)	9
M1.2	Datenerhebungsinstrumente TAP1.2 entwickelt (Umfrage und semi-strukturierte Fragebögen)	12
M1.3	Bereinigte Umfragedaten in STATA verfügbar	21
M3-2	Lastmodell entwickelt	24
M3-8	Prognosebasierter Betriebsstrategie entwickelt und getestet	30
M4-1	Reflexion interdisziplinärer Methoden und Ansätze im 2. Projektworkshop	18
M6-1	Kooperationsvertrag abgeschlossen	1

## 7. Deliverables (D)

N°	Beschreibung	Frist (Monat) <sup>7</sup>
D1.1	Stakeholder- und Institutionen- Mapping	24
D1.1	Stakeholder- und Institutionen- Mapping (update)	36
D1.2	Bericht 1	36
D1.3	Bericht 2	36
D3-2	Dokumentation des Lastmodells	24
D3-8	Systemsteuerungsalgorithmus	30
D4-1	Bericht zu Chancen und Herausforderungen interdisziplinärer Zusammenarbeit („lessons learned“)	18
D6-1	Kooperationsvertrag	1

<sup>7</sup> Farbcode:

 Erledigt

 Nicht erledigt

## 8. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

### 8.1. Zusammenfassung

Die Analyse des Reformprozesses von **TAP1.1** hat ergeben, dass die Verbreitung von PV-Energielösungen in Ghana in einem langfristigen Reformprozess mit drei Phasen erfolgt, während im Gesundheitssektor erst kürzlich ein institutioneller Wandel begann. Dabei spielen sowohl interne als auch externe Faktoren eine wichtige Rolle bei der Verbreitung von Solarenergie. Die einheitlichen Interessen wichtiger Akteure im Energiesektor haben politische Veränderungen begünstigt, während sinkende PV-Preise den Wandel beschleunigt haben. Trotzdem unterstützt das Energieministerium sowohl Solar-PVs als auch fossile Brennstoffe. Das institutionelle und infrastrukturelle Erbe des ghanaischen Energiesektors stellt weiterhin ein Hindernis für die Verbreitung von PV dar. Die Entdeckung von Öl- und Gasressourcen hat den Fortschritt behindert oder verlangsamt und regulatorische Rahmenbedingungen sind unsicher. Die Neuregelung der Einspeisevergütung erfordert eine genaue Beobachtung. Obwohl es keinen umfassenden politischen Rahmen für die Förderung von PV im Gesundheitssektor gibt, bietet die Unterstützung des WHO-Aufrufs zum Handeln eine einmalige Gelegenheit für strategische Partnerschaften zwischen dem Gesundheits- und dem Energiesektor.

In **TAP1.2** wurde untersucht, ob und unter welchen Voraussetzungen private Gesundheitseinrichtungen in Ghana Solar-PV nutzen würden. Die untersuchten Gesundheitseinrichtungen haben ein durchschnittliches Betriebsalter von 16,5 Jahren und finanzieren sich hauptsächlich durch Direktzahlungen. Die durchschnittliche Bettenanzahl beträgt 24,8 und der durchschnittliche Strombedarf liegt bei ca. 33 kWh/Tag. Fast alle privaten Gesundheitseinrichtungen sind an das Stromnetz angeschlossen, aber nur 5 % haben alternative Stromquellen wie Pico-Solarzellen oder PV-Solaranlagen installiert. 57 % der Befragten sind unzufrieden mit der Zuverlässigkeit der Stromversorgung und berichten von Störungen von bis zu 5 Stunden täglich, was finanzielle Verluste von bis zu 6.705 GHS verursacht. Die Befragten sind der Meinung, dass eine zuverlässige Stromversorgung die Gesundheitsversorgung verbessern würde und PV-Lösungen diese Lücke schließen könnten. Hybridsysteme, die die Versorgung aus dem Netz mit PV-Solaranlagen kombinieren, gelten als vielversprechende Option, da sie die Zuverlässigkeit der Stromversorgung gewährleisten können. Kostenüberlegungen spielen jedoch eine wichtige Rolle, und es gibt Bedenken hinsichtlich der Wartung und der Wartungskosten von PV-Energielösungen.

In **AP3** wurde ein Messkonzept erstellt, das als Referenz für die Instrumentierung und Durchführung der Feldmessungen in Ghana sowie für die Entwicklung des Datenmanagementplans dient. Drei Messstandorte wurden ausgewählt, um verschiedene Arten von Gesundheitseinrichtungen und Klimazonen abzudecken. Die Installation der Messgeräte in Ghana wurde aufgrund der COVID-19-Pandemie verzögert, aber mit Hilfe von Projektpartnern und lokalen Experten konnten die meisten Probleme gelöst werden. Die aufgezeichneten Daten wurden im Rahmen von AP3 zur Modellvalidierung und als Input für KI-basierte Algorithmen verwendet, die im Rahmen der Last- und Einstrahlungsprognosen eingesetzt werden. Diese Algorithmen wurden verwendet, um die Eingangsdaten für den neu entwickelten MPC-Algorithmus für PV-Hybridsysteme zu verbessern. Die Ergebnisse wurden auf Fachkonferenzen und in begutachteten Publikationen veröffentlicht. Weitere Ergebnisse sollen in Form einer Dissertation publiziert werden.

In **AP4** wurde eine umfassende Recherche zu IDR und TDR durchgeführt und ein monatliches Seminar eingerichtet um den Austausch zwischen den Projektpartnern zu fördern. Über zweieinhalb Jahre wurden in vier getrennten Gesprächsrunden Interviews mit allen Arbeitsgruppen geführt um ihre Sichtweise auf IDR und TDR im Allgemeinen und speziell im Projekt zu erfahren. Die Ergebnisse wurden analysiert und als Grundlage für ein Paper zu IDR und TDR im Kontext von EnerSHeLF verwendet

(Bauhof, Bender and Meilinger, Veröffentlichung in Vorbereitung). Das Paper wird in der IZNE Working Paper Series veröffentlicht. Basierend auf der Analyse wurden Vorschläge für zukünftige IDR- und TDR-Projekte gemacht.

**AP6** war verantwortlich für die Organisation von Projekttreffen in Ghana und virtuellen Treffen während der Corona-Pandemie, für die Vorbereitung von Vertragsunterlagen sowie deren fristgerechte Unterzeichnung, und für die Unterstützung bei der Beschaffung, Exportkontrolle und Zollabfertigung von Materialien. Darüber hinaus hat AP6 eine Plattform für den Datenaustausch eingerichtet, Anträge für Projektverlängerungen und Mittelumwidmungen vorbereitet und somit insgesamt zu einem reibungslosen Arbeitsablauf, einer effizienten Kommunikation und einheitlicher Berichterstattung innerhalb des Konsortiums beigetragen.

## 8.2. Fazit und Ausblick

Das übergeordnete Ziel des Verbundprojektes EnerSHeLF bestand darin, indirekt zur nachhaltigen ökonomischen, ökologischen und sozialen Entwicklung beizutragen. Dies sollte durch eine technische Verbesserung und beschleunigte Verbreitung von integrierten und zuverlässigen PV-Lösungen im ghanaischen Gesundheitssektor erreicht werden. Diese Lösungen sollen (1) den Marktanteil erneuerbarer Energien erhöhen und somit die Nachhaltigkeit des nationalen Energiesystems stärken sowie (2) den Zugang zu Gesundheitsdiensten verbessern. Als positive ökologische Auswirkungen wurden eine Reduzierung von Emissionen und Dieselverbrauch angestrebt. Im Rahmen von EnerSHeLF Insbesondere konnte gezeigt werden, dass eine vorhersagebasierte Steuerung von netzintegrierten PV-Diesel-Hybrid-Systemen relevante Dieseleinsparungen erreicht werden können, was sowohl Reduktionen auf der Kosten- als auch auf der Emissionsseite mit sich bringt, wenn eine unterbrechungsfreie Stromversorgung auch in Situationen häufiger Netzausfälle sichergestellt werden soll.

Institutionenökonomische Untersuchungen haben gezeigt, dass ein verbesserter Energiezugang und reduzierte Kosten der Energieversorgung eine Verbesserung der Gesundheitsversorgung ermöglichen. Damit kann langfristig eine verbesserte Gesundheit der Bevölkerung befördert werden – ebenfalls unterstützt durch eine Reduzierung der negativen Gesundheitseffekte von Dieselemissionen. Da sowohl Energie und Gesundheit wichtige Motoren für das Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens und eine erfolgreiche Armutsrreduzierung sind, könnte langfristig – im Zusammenspiel mit weiteren Maßnahmen – auch ein Beitrag für die ökonomische und soziale Entwicklung auf Makroebene geleistet werden. Für die zukünftige Verbreitung von PV-Energielösungen in Ghana ist es wichtig, dass das Energieministerium eine klare und einheitliche Strategie entwickelt, die den Fokus auf erneuerbare Energien legt und die Unterstützung von fossilen Brennstoffen reduziert. Gleichzeitig sollten regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden, die Investitionen in PV-Projekte attraktiv machen und Planungssicherheit bieten. Die Neuregelung der Einspeisevergütung sollte dabei sorgfältig überwacht und angepasst werden, um den Markt für PV weiter zu stärken.

Im Gesundheitssektor bieten sich Chancen für strategische Partnerschaften zwischen dem Gesundheits- und dem Energiesektor. So sollten in Zukunft Maßnahmen ergriffen werden, um die Stromversorgung in den Gesundheitseinrichtungen zu verbessern und die Nutzung von PV-Lösungen zu fördern. Dies könnte durch Sensibilisierungskampagnen, Schulungen und finanzielle Anreize für den Einsatz von PV-Technologien erreicht werden. Es ist auch wichtig, Partnerschaften mit Regierungsbehörden, Energieversorgungsunternehmen und anderen relevanten Akteuren einzugehen, um die Umsetzung solcher Lösungen zu erleichtern. Insgesamt bietet die Integration von PV-Lösungen in die Stromversorgung der Gesundheitseinrichtungen in Ghana eine vielversprechende Möglichkeit, die Gesundheitsversorgung zu verbessern und die Abhängigkeit von unzuverlässiger Stromversorgung zu verringern. Es ist jedoch wichtig, die Herausforderungen in Bezug auf Kosten und

Wartung zu berücksichtigen. Weitere Untersuchungen sind erforderlich um die Umsetzbarkeit solcher Lösungen zu bewerten und mögliche Finanzierungsmodelle zu entwickeln.

## 9. Zahlenmäßiger Nachweis

<b>Position</b>	<b>Ausgaben (€)</b>	<b>Finanzierungsplan (€)</b>
0812	829.331,46	729.237,00
0822	111.174,91	141.951,93
0831	8.198,39	8.500,00
0834	1.965,86	7.300,00
0835	28.281,78	25.380,00
0843	158.959,51	208.533,78
0846	29.822,32	89.558,00
0850	62.397,07	60.747,28
<b>Sum</b>	<b>1.230.131,30</b>	<b>1.271.207,99</b>

## 10. Verwertungsplan

### 10.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Keine

### 10.2. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

<b>Verwertung</b>	<b>Zeithorizont</b>	<b>Ergebnisse</b>
Wissenschaftliche Veröffentlichungen zu den Ergebnissen der politökonomischen Forschung in AP1	Projektende (2023)	s. Kapitel „Publikationen“
Erweiterung der Datenbasis zu Einflussfaktoren des institutionellen Wandels hin zu einer nachhaltigen Energiewende im ghanaischen Gesundheits- und Energiesektor	während der Laufzeit (2021-22)	21 Stakeholder-Interviews liegen in transkribierter Fassung vor
Erweiterung der Datenbasis zum Einfluss des institutionellen Rahmens auf das Entscheidungsverhalten von Marktakteuren im Zusammenspiel mit vorherrschenden technischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen.	während der Laufzeit (2021-23)	Health-Facility Survey liegt vor (197 ghanaische Gesundheitseinrichtungen)  28 Unternehmensinterviews liegen in transkribierter Fassung vor
Veröffentlichung von Ergebnissen aus AP4 tragen zur Reputation des „Internationalen Zentrums für Nachhaltige Entwicklung“ (IZNE) der H-BRS als interdisziplinärer Think-Tank bei.	Projektende (2023)	Veröffentlichung noch ausstehend; für 2023 geplant

Entwicklung und Veröffentlichung eines Lands- und Sektor-spezifischen Lastmodells für Gesundheitsstationen in Ghana	während der Laufzeit (2021-2022)	Veröffentlichungen liegen vor, s. Kapitel Publikationen
Wissenschaftliche Veröffentlichung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zum Betriebsverhalten für ausgewählte Prognoseszenarien	Projektende (2023)	Veröffentlichungen liegen vor, s. Kapitel Publikationen
Entwicklung eines prognosebasierten Steuerungsalgorithmus zur Optimierung von Energieeffizienz Umweltauswirkungen	während der Laufzeit (2021)	Veröffentlichung noch ausstehend; für 2023 geplant
Die Ergebnisse werden an der H-BRS und bei Co-Lehrveranstaltungen mit den ghanaischen akademischen Partnern genutzt	während der Laufzeit (2021-2022)	Co-Lehrveranstaltungen konnten aufgrund der Corona-Pandemie nicht stattfinden Ergebnisse fließen in Lehrveranstaltungen ein; gesammelte Daten sollen in der Lehre verwendet werden ("forschendes Lernen")

### 10.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Verwertung	Zeithorizont	Ergebnisse
Das erarbeitete Wissen wird deutschen Unternehmen den Zugang zum ghanaischen Markt und der Erweiterung ihrer Geschäftstätigkeit erleichtern (Türöffnerfunktion).	3-5 Jahre nach Projektende	Aufgrund der aktuellen wirtschaftlichen Situation sowie der schwierigen institutionellen Rahmenbedingungen ist der ghanaische Markt aktuell eher als risikoreich einzuschätzen
Ein verstärktes Bewusstsein bei Entscheidungsträgern in Gesundheitseinrichtungen über PV als Alternative steigert die Nachfrage	3-5 Jahre nach Projektende	Potential vorhanden
Ein vertieftes Verständnis politischer Entscheidungsträger über Handlungsoptionen zur Verbreitung von PV-Energielösungen bietet einen Anstoß für Politischen Wandel.	3-5 Jahre nach Projektende	Potential vorhanden, aber wirtschaftliche Krise erhöht voraussichtlich die Attraktivität der Förderung und Nutzung nationaler Erdölressourcen
Durch die Einbindung landes- und kontextspezifischer Daten in die System- und Produktentwicklung werden mittelfristig Qualität und Zuverlässigkeit deutscher Produkte verbessert.	während der Laufzeit und danach (ab 2021)	offen
Durch die Einbindung hochaufgelöster (energie-)meteorologischer Prognosen in die Betriebsführungsstrategie von Inselnetzen werden für den Partner WASCAL neue Geschäftsfelder im Bereich der Energiemeteorologie eröffnet.	3-5 Jahre nach Projektende	realisiert

Projektergebnisse können in anderen Sektoren in Ghana und in vergleichbaren Problemzusammenhängen in anderen Ländern genutzt werden.	im Anschluss an die Laufzeit (ab 2022)	Durch open-access Publikationen sichergestellt
Nutzen und Verwertbarkeit für teilnehmende Firmen: Umsätze werden gesteigert durch (1) Produktivitätssteigerungen durch induzierte Technologieverbesserungen, (2) die verbesserte Anpassung von Produkten an die Nachfrage und verbesserte Marktstrategie aufgrund eines verbesserten Verständnisses vom Zielmarkt (Gesundheitssektor) und institutionellem Umfeld, sowie (3) das Erleichtern von neuen Kooperationsmöglichkeiten.	3-5 Jahre nach Projektende	Steuerungsalgorithmen werden veröffentlicht Zielgruppenorientierte Aufbereitung der Ergebnisse der Analysen der politischen Rahmenbedingungen sowie der Nachfrageseite (Gesundheitseinrichtungen) sind open access zugänglich Ergebnisse der Analysen der Angebotsseite (deutsche und ghanaische Unternehmen) werden open access veröffentlicht werden
Sonstiges		Ergebnisse sollen für Konzeption eines neuen Forschungsprojekts verwendet werden (sofern entsprechende Finanzierungsmöglichkeiten vorhanden)

## 11. Publikationen

### *Journal Artikel*

Chaaraoui, S., Bebber, M., Meilinger, S., Rummeny, S., Schneiders, T., Sawadogo, W., Kunstmann, H., „Day-Ahead Electric Load Forecast for a Ghanaian Health Facility Using Different Algorithms”, MDPI energies, 2021, 14(2), 409. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14020409>

Chaaraoui, S., Houben, S. and Meilinger, S., “Probabilistic End-to-End Irradiance Forecasting Through Pre-trained Deep Learning Models Using All-Sky-Images”, submitted to ASR in 2023

Herman-Czezuch, A., Zemo Mekeng, A., Meilinger, S., Barry, J. & Kimiae, N., 2022. Impact of aerosols on photovoltaic energy production using a spectrally resolved model chain: Case study of southern West Africa, Renewable Energy, Volume 194, 2022, Pages 321-333, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.166>.

Windmanagda Sawadogo, Jan Bliefernicht, Benjamin Fersch, Seyni Salack, Samuel Guug, Belko Diallo, Kehide.O. Ogunjobi, Guillaume Nacoulma, Michael Tanu, Stefanie Meilinger, and Harald Kunstmann. “Hourly global horizontal irradiance over West Africa: A case study of one-year satellite- and reanalysis-derived estimates vs. in situ measurements”, Renewable Energy, Volume 2016, 2023a, 119066, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119066>.

Windmanagda Sawadogo, Jan Bliefernicht, Benjamin Fersch, Seyni Salack, Samuel Guug, Stefanie Meilinger, and Harald Kunstmann. „Global Horizontal Irradiance in West Africa: Evaluation of the WRF-

Solar Model in Convective Permitting Mode with Ground Measurements". Journal of Applied Meteorology and Climatology (AMS), Volume 62(7), 2023b, p.835-851, ISSN 1558-8424, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0186.1>

Zemo-Mekeng, A. and S. Meilinger, "Impact of aerosols on photovoltaic yields in Ghana using spectrally resolved AOD from CAMS", 2023, submitted to Meteorol. Z. (Contrib. Atm. Sci.)

### *Conference Proceedings*

Bebber, M., Meilinger, S., Chaaraoui, S., Rummeny, S., Schneiders, T., Waffenschmidt, E., 2021b. Modellierung und Evaluierung eines PV-Diesel-Hybrid-Systems für ein Krankenhaus in Ghana. Proceedings of the 36th PV-Symposium, 18.-26. May 2021, 348-349.

Meilinger S., Bebber, M., Chaaraoui, S., Schneiders, T., Savadogo, W., "Improving Energy Supply for Health Facilities in Ghana: Impact of Using Forecast-Based Battery Control for a PV-Battery-Diesel-System", 2023, SDEWES Conference Paper

Perez Arredondo, A. M., Alatinga, K., Ewere, E., Agbaam, C., Bender, K. (2023). Exploring the determinants of demand for solar systems in Ghanaian Healthcare Facilities - a choice experiment. Population Medicine, 5(Supplement), A796. <https://doi.org/10.18332/popmed/1639772/popmed/163977>

Ramde, E.W., Rummeny, S., Schneiders, T., Waffenschmidt, E., Chaaraoui, S., Bebber, M., Meilinger, S., "Planning of sustainable and stable micro grids for Ghanaian hospitals with photovoltaics, 2020 SDEWES Conference Paper

### *Working Paper*

Agbaam, C., Perez Arredondo, A. M., Alatinga, K., Bender, K. (2023). The political economy of sustainable energy transition. IZNE Working Paper Series Nr. 23/3. <https://doi.org/10.18418/978-3-96043-109-1>

Bebber, M., Meilinger, S., Chaaraoui, S., Rummeny, S., Schneiders, T., Waffenschmidt, E., 2021. „PV-Diesel-Hybrid-System für ein Krankenhaus in Ghana – Anbindung eines PV-Batteriespeichermodells an ein bestehendes Generatormodell/PV-diesel-hybrid system for a hospital in Ghana – Connection of a PV battery storage model to an existing generator model.“ IZNE Working Paper Series Nr. 21/3. 2021a. <https://doi.org/10.18418/978-3-96043-091-9>

### *Policy Briefs*

Agbaam, C., Perez Arredondo, A. M., Alatinga, K., Bender, K. (2023). Understanding the drivers and barriers of institutional change towards a sustainable energy transition in Ghana. EnerSHeLF Policy Brief No. 3.

Bauhof, J., Bender, K., Meilinger, S. (2023). Photovoltaic energy solutions for Ghana: Considerations for business development. EnerSHeLF Policy Brief No. 1.

Meilinger, S., Abigale, F., Bohn, P. et al. (2023). Enhancing Energy Supply for Healthcare Facilities in Ghana Requires Interdisciplinary Perspectives. EnerSHeLF Policy Brief No. 1.

Perez Arredondo, A. M., Alatinga, K., Ewere, E., Agbaam, C., Bender, K. (2023). Exploring the determinants of demand for solar systems in Ghanaian Healthcare Facilities. EnerSHeLF Policy Brief No. 2.

### *Poster-Präsentationen*

Bebber, M., Meilinger, S., Chaaraoui, S., Rummeny, S., Schneiders, T., & Waffenschmidt, E. Modellierung und Evaluierung eines PV-Diesel-Hybrid-Systems für ein Krankenhaus in Ghana, PV-Symposium 2021, online.

Bebber, M., Meilinger, S., Chaaraoui, S., Rummeny, S., Schneiders, T., & Waffenschmidt, E. Modellierung and evaluation of a PV-diesel hybrid system for a hospital in Ghana, 3rd International Conference on Solar Technologies & Hybrid Mini Grids to improve energy acces, 2021, online.

Perez Arredondo, A. M., Alatinga, K., Ewere, E., Agbaam, C., Bender, K. Exploring the determinants of demand for solar systems in Ghanaian Healthcare Facilities - a choice experiment. Poster presentation at the 17th World Congress on Public Health - A World in Turmoil: Opportunities to Focus on the Public's Health In Rome, Italy May 2023

Rabe, S., Meilinger, S., Bender, K., 2021. Opportunities and challenges for inter- and transdisciplinary collaboration in an international research project – The case of the German-Ghanaian project EnerSHeF (Energy-Self-Sufficiency for Health Facilities in Ghana). International Transdisciplinary Conference, 13.-17. September 2021, online.

Yousif, R., N. Kimiae, S. Meilinger, K. Bender, F. K. Abagale, E. Ramde, T. Schneiders, H. Kunstmann, B. Diallo, S. Salack, S. Denk, J. Bliefernicht, W. Sawadogo, S. Guug, S. Rummeny, P. Bohn, S. Chaaraoui, S. Schiffer, M. Abass, and E. Amekah (2022). Measurement data availability within EnerSHeF. EMS Annual Meeting Abstracts, 2022, <https://doi.org/10.5194/ems2022-530>

### *Vorläufe, Reden, Vorlesungen, Podcasts*

Agbaam, C. (2023). EnerSHeF: Energy-Self-Sufficiency for Health Facilities in Ghana, DAAD-Konferenz "Applied Sciences as drivers for regional innovation ecosystems in Africa", Brüssel

Bender, K. (2023), Technology and health sector development: The case of PV-based energy solutions, SDD UBIDS Eminent Global Scholar Lecture Series, Wa, Ghana

Chaaraoui, S., Houben, S. & Meilinger, S., 2022. End to End Global Horizontal Irradiance Estimation Through Pre-trained Deep Learning Models Using All-Sky-Images, EMS Annual Meeting Abstracts, Vol. 19, EMS2022-505, 2022. <https://doi.org/10.5194/ems2022-505>

Meilinger et al., "Impact of Harmattan and West African Monsoon on Solar Energy Systems", ARTS Seminar, Uni Bonn, 10.06.2021, online.

Meilinger, S., "Partnerschaften für eine Nachhaltige Transformation der Energiesysteme am Beispiel Ghana", Ringvorlesung des PK NRW, 4.11.2021, online.

Meilinger, S., Herman-Czezuch, A., Zemo, A., Bebber, M., 2021. Impact of dust storms and urban air pollution on PV-power systems: Case studies from Ghana. EMS Annual Meeting, online, 6.–10. September 2021, EMS2021-419, <https://doi.org/10.5194/ems2021-419>

S. Meilinger, M. Abas, F. Abigale, M. Bebber, S. Chaaraoui, S. Denk, E. Ramde, E. Dodzi Amekah, S. Rummeny, W. Sawadogo, T. Schneiders, A. Zemo. "Energy Supply for Health Facilities in Ghana: A forecast-based battery control of a PV-battery-diesel-system", 4th International Conference on Solar Technologies & Hybrid Mini Grids to improve energy access, Palma de Mallorca, Spain, April 26 - 28, 2023

Sawadogo, W., Bliefernicht, J., Fersch, B., Salack, S., Guug, S., Ogunjobi, K. O., Nacoulma, G., Tanu, M., Meilinger, S. & Kunstmann, H., 2022. In Situ Based Performance of Satellite- and Reanalysis-derived

Hourly Global Horizontal Irradiance Products over West Africa. EMS Annual Meeting Abstracts, Vol. 19, EMS2022-52, 2022. <https://doi.org/10.5194/ems2022-52>

Scholz, T. (Moderator), 2021. Klimaschutz international [Audio-Podcast]. In EnergieAgenturNRW-Erneuerbare Energien, 09. August 2021, <https://www.energieagentur.nrw/mediathek/Podcast/erneuerbare-energien-episode-21>

### *Organisierte öffentliche Konferenzen, Symposien oder Workshops*

EnerSHeLF Closing Symposium am 14. Februar 2023 (online)

Stakeholder-Workshop in Accra am 7. März 2023, gefolgt von Besuchen bei Interessengruppen und Forschungseinrichtungen zwischen dem 8. und 13. März 2023

### *Abschlussarbeiten*

Bebber, M., 2021. Entwicklung einer prognosebasierten Batteriesteuerung eines PV-Batterie-Diesel-Hybrid-Systems für ein Krankenhaus in Ghana. Master Thesis, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.

Quittek, M. (2023). Energieversorgung für Gesundheitseinrichtungen in Ghana: Chancen und Risiken PV-basierter Energielösungen aus Unternehmensperspektive. Bachelor Thesis, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg. *Abschluss November 2023*

Zemo-Mekeng, 2022. „Einfluss von Sandstürmen und Luftverschmutzung auf Photovoltaikerträge im südlichen Westafrika“, Master Thesis, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.

### *Für 2023 geplante Publikationen*

Agbaam, C., Perez Arredondo, A. M., Alatinga, K., Bender, K., Determinants of Institutional Change towards a Sustainable Energy Transition in the Health and Energy sectors in Ghana: A Political Economy Analysis of Solar Photovoltaics [Submitted to World Development].

Bauhof, J., Bender, K., Meilinger, S., Inter- and transdisciplinary collaboration in an international research project – The case of the German-Ghanaian project EnerSHeLF (Energy Supply for Health Facilities in Ghana)

S. Chaaraoui, S. Houben, and S. Meilinger, "Probabilistic End-to-End Irradiance Forecasting Through Pre-trained Deep Learning Models Using All-Sky-Images," Advances in Science and Research (befindet sich im peer-review Prozess)

S. Chaaraoui, S. Meilinger, S. Houben, and T. Schneiders, "A probabilistic model predictive control approach for PV-diesel hybrid systems in Ghana's health sector using seamless state prediction methods," IEEE Access (noch nicht eingereicht)

Perez Arredondo, A. M., Alatinga, K., Ewere, E., Agbam, C., Bender, K. (2023). Exploring the determinants of demand for solar systems in Ghanaian Healthcare Facilities - a choice experiment. (noch nicht eingereicht)

# Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b> /	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht
<b>3. Titel</b> Energieversorgung für Gesundheitseinrichtungen in Ghana (EnerSHeLF) - Schlussbericht	
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Bender, Katja Meilinger, Stefanie Agbaam, Callistus Perez Arredondo, Ana Maria Chaaraoui, Samer Bauhof, Jonas Antonini, Samantha	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 31.03.2023
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b>
	<b>7. Form der Publikation</b> Document Control Sheet
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> Hochschule Bonn-Rhein-Sieg	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b> /
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03SF0567A
	<b>11. Seitenzahl</b> 38
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> BMBF	<b>13. Literaturangaben</b> 40
	<b>14. Tabellen</b> 3
	<b>15. Abbildungen</b> 12
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b> /	
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b> /	
<b>18. Kurzfassung</b> Die Analysen von AP1 zeigen, dass die Verbreitung von Solarenergie in Ghana in einem langfristigen Prozess mit 3 Phasen erfolgt. Sowohl interne als auch externe Faktoren spielen dabei eine wichtige Rolle. Einheitliche Interessen im Energiesektor und sinkende PV-Preise haben politische Veränderungen begünstigt. Das Energieministerium unterstützt sowohl Solar-PVs als auch fossile Brennstoffe, was die Verbreitung von PV erschwert. Die Entdeckung von Öl- und Gasressourcen hat den Fortschritt behindert und regulatorische Rahmenbedingungen sind unsicher. Im Gesundheitssektor hat erst kürzlich ein institutioneller Wandel begonnen. Private Gesundheitseinrichtungen in Ghana nutzen bisher wenig Solar-PV, obwohl sie mit häufigen Stromausfällen und finanziellen Verlusten konfrontiert sind. Hybridsysteme werden als vielversprechende Option angesehen, um die Zuverlässigkeit der Stromversorgung zu gewährleisten. In AP3 wurden Messungen durchgeführt, deren Daten zur Modellvalidierung und zur Verbesserung von KI-basierten Algorithmen verwendet wurden. In AP4 wurden Untersuchungen zu IDR und TDR durchgeführt und Vorschläge für zukünftige IDR- und TDR-Projekte gemacht. AP6 war für die Projektkoordination zuständig. Insgesamt zielt das Projekt darauf ab, die Verbreitung von PV-Lösungen im ghanaischen Gesundheitssektor voranzutreiben, um den Zugang zu Gesundheitsdiensten zu verbessern und die Nachhaltigkeit des nationalen Energiesystems zu stärken. Es ist wichtig, dass das Energieministerium eine klare Strategie für erneuerbare Energien entwickelt und regulatorische Rahmenbedingungen schafft, die Investitionen in PV-Projekte attraktiv machen. Im Gesundheitssektor bieten sich Chancen für strategische Partnerschaften zwischen dem Gesundheits- und dem Energiesektor, um die Stromversorgung zu verbessern und die Nutzung von PV-Lösungen zu fördern. Es ist jedoch wichtig, die Herausforderungen in Bezug auf Kosten und Wartung zu berücksichtigen und weitere Untersuchungen durchzuführen.	
<b>19. Schlagwörter</b> Nachhaltige Entwicklung, Erneuerbare Energien, PV-Lösungen, Stromversorgung, prognosebasierte Steuerung, Gesundheitssektor, Reformprozess, Präferenzmessung, politische Ökonomie, institutioneller Wandel, Ghana, Afrika, Interdisziplinäre Forschung, Transdisziplinäre Forschung	
<b>20. Verlag</b> /	<b>21. Preis</b> /

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2082265-3

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b> /	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)		
<b>3. title</b> Energy-Self-Sufficiency For Health Facilities in Ghana (EnerSHeF) – Final Report			
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Bender, Katja Meilinger, Stefanie Agbaam, Callistus Perez Arredondo, Ana Maria Chaaraoui, Samer Bauhof, Jonas Antonini, Samantha	<b>5. end of project</b> 31.03.2023	<b>6. publication date</b>	<b>7. form of publication</b> Document Control Sheet
<b>8. performing organization(s) name, address</b> Hochschule Bonn-Rhein-Sieg	<b>9. originators report no.</b> /	<b>10. reference no.</b> 03SF0567A	<b>11. no. of pages</b> 38
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> BMBF	<b>13. no. of references</b> 40	<b>14. no. of tables</b> 3	<b>15. no. of figures</b> 12
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b> /			
<b>17. presented at (title, place, date)</b> /			
<b>18. abstract</b> The analyses of WP1 show that the dissemination of solar energy in Ghana is a long-term process with 3 phases. Both internal and external factors play an important role. Unified interests in the energy sector and declining PV prices have favoured policy changes. The Ministry of Energy supports both solar PVs and fossil fuels, making PV dissemination difficult. The discovery of oil and gas resources has hindered progress, and regulatory frameworks are uncertain. Institutional change has only recently begun in the health sector. Private health facilities in Ghana have made little use of solar PV, although they face frequent power outages and financial losses. Hybrid systems are considered as a promising option to ensure reliability of power supply. In WP3, measurements were performed and the data were used for model validation and improvement of AI-based algorithms. In WP4, research on IDR and TDR was conducted and recommendations for future IDR and TDR projects were made. WP6 was responsible for project coordination. Overall, the project aims at promoting the dissemination of PV solutions in Ghana's health sector to improve access to health services and strengthen the sustainability of the national energy system. It is important that the Ministry of Energy develops a clear renewable energy strategy and creates regulatory frameworks that make investments in PV projects attractive. In the health sector, there are opportunities for strategic partnerships between the health and energy sectors to improve electricity supply and promote the use of PV solutions. However, it is important to consider the challenges related to cost and maintenance and to conduct further research.			
<b>19. keywords</b> Sustainable development, renewable energy, PV solutions, power supply, forecast-based control, health sector, reform process, preference measurement, political economy, institutional change, Ghana, Africa, interdisciplinary research, transdisciplinary research			
<b>20. publisher</b> /	<b>21. price</b> /		

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2082331-3