

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

Fakultät Nachhaltige Agrar- und Energiesysteme

Fakultät Wald und Forstwirtschaft

Studiengang Management erneuerbarer Energien

Bachelorarbeit

Machbarkeitsstudie einer Mikro-Wasserkraftanlage zur
Netzstabilisierung einer ländlichen Bergregion Tansanias

Verfasser/in: Johannes Ilg

Gutachter/in: Prof. Dr. Andreas Zeiselmair

Datum der Abgabe: 08.08.2025

Kurzfassung

In einer abgelegenen Region des Mbulu Distrikts in Tansania wird eine Mikro-Wasserkraftanlage errichtet, um die Stromversorgung der Dörfer Kwermusl und Swedish Amowa zu verbessern. Trotz eines teilweisen Stromnetzanschlusses sind die Regionen weiterhin von häufigen Stromausfällen betroffen, was insbesondere Einrichtungen wie Krankenhäuser und Schulen vor Herausforderungen stellt. Das Projekt wird von lokalen und internationalen Partnern unterstützt. Mithilfe von Drohnenaufnahmen wurden detaillierte 3D-Modelle der Projektfläche erstellt, um allen Beteiligten einen präzisen Überblick zu geben und Planungsprozesse zu erleichtern. Die Anlage ist im Rahmen einer Doktorarbeit aus technischer Sicht bereits umfassend geplant und soll jährlich stabile Energie für die Region liefern. Ein komplexes Netzwerk von Akteuren, darunter Dorfgemeinschaften, lokale Experten und internationale Organisationen, arbeitet eng zusammen. Die technische Auslegung berücksichtigt regionale Gegebenheiten und strebt nachhaltige, zuverlässige Energieversorgung sowie die Einbindung der Bevölkerung an. Das Projekt dient zudem als Vorzeigemodell für den Ausbau erneuerbarer Energien in ländlichen Gebieten Tansanias.

Abstract

In a remote region of the Mbulu District in Tanzania, a micro-hydropower plant is being constructed to improve the electricity supply for the villages of Kwermusl and Swedish Amowa. Despite partial access to the public power grid, these areas continue to experience frequent outages, which poses particular challenges for essential facilities such as hospitals and schools. The project is supported by both, local and international partners. Using drone imagery, detailed 3D-models of the project site have been developed to provide all stakeholders with an accurate overview and to facilitate planning processes. From a technical perspective, the plant has already been comprehensively designed as part of a doctoral thesis and aims to provide stable energy supply to the region throughout the year.

A complex network of actors, including village communities, local experts, and international organizations, collaborates closely on the initiative. The technical design takes regional conditions into account and seeks not only to ensure a sustainable and reliable energy supply but also to actively involve the local population. Moreover, the project serves as a model for the expansion of renewable energy in rural areas of Tanzania.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen herzlich danken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit in vielfältiger Weise unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt dem Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V., durch dessen finanzielle Förderung die Durchführung der Projektreise überhaupt erst möglich wurde. Ebenso danke ich dem Programm „Internationalisierung der Hochschulen“ des Bayerischen Staatsministeriums für die zusätzliche finanzielle Unterstützung.

Für die überaus herzliche Aufnahme und die hilfreiche Betreuung während meines Aufenthalts am ATC möchte ich mich ebenfalls ganz ausdrücklich bedanken. Ein besonderer Dank gilt zudem Herrn Florian Motte, einem wissenschaftlichen Mitarbeiter an der HSWT, für seine engagierte und kompetente Unterstützung bei der 3D-Modellierung.

Allen genannten Personen und Institutionen spreche ich meine aufrichtige Wertschätzung und meinen Dank aus. Ohne Ihre Mithilfe und Ihr Engagement wäre diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Kurzfassung.....	II
Abstract.....	II
Danksagung.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	8
1.1 Problemstellung.....	8
1.1 Zielsetzung.....	9
1.3 Beteiligte Organisationen	9
1.3.1 Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V.	10
1.3.2 Arusha Technical College.....	10
1.3.3 Rural Energy Agency	10
2 Methodik.....	11
3 Grundlagen und Situation vor Ort	11
3.1 Kurzvorstellung Tansanias.....	12
3.2 Energiesituation in Tansania.....	12
3.3 Energiepolitik in Tansania.....	14
3.4 Wasserkraft in Tansania	14
3.5 Grundlagen der Wasserkraft.....	15
3.6 Grundlagen von Mikro-Wasserkraftanlagen.....	18
4 Mikro-Wasserkraftprojekt Mbulu.....	19
4.1 Geografische Lage	19
4.2 Hydrologische Verhältnisse	21
4.3 Strombedarf vor Ort.....	23
4.4 Technische Auslegung der Anlage	25
4.5 Netzwerk an Beteiligten vor Ort.....	26
4.6 Aktueller Baustatus.....	29
4.7 Stromübertragung zum Dorf	31

4.8 Überwachung der Anlage per Kamera	32
5 UAV-basierte Standortmodellierung	34
5.1 Gaussian Splatting	34
5.2 Optimale Kameraführung	35
5.3 Durchführung der Drohnenaufnahmen	36
5.4 Generierung der Modelle	38
5.5 Ergebnisse	38
6 Finanzierung	41
6.1 Bisherige finanzielle Aufwendungen	43
6.2 Verbleibende Kostenabschätzung	43
7 Gesellschaftlicher Nutzen und lokale Perspektiven	44
7.1 Empirisch belegte Verbesserungen	44
7.2 Wahrnehmung und Erfahrung der lokalen Bevölkerung	45
8 Ausblick	48
9 Fazit	49
9.1 Herausforderungen	49
9.2 Zusammenfassende Einordnung der Ergebnisse	50
Anhang A: Produktblatt XEGA	52
Anhang B: Gesamtkostenaufstellung	53
Anhang C: Interview Ngoma	60
Literaturverzeichnis	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage Tansanias in Afrika	12
Abbildung 2: Verteilung der Stromerzeugungskapazität	13
Abbildung 3: Julius Nyerere Wasserkraftwerk	13
Abbildung 4: Aufbau einer Mikro-Wasserkraftanlage	18
Abbildung 5: Standort Wehr und Turbinenhäuschen	20
Abbildung 6: Standort der Projektfläche in Tansania	20
Abbildung 7: Relief der Projektfläche	20
Abbildung 8: Stufenartiger Wasserfall entlang der Projektfläche	20
Abbildung 9: Netzwerk an Beteiligten vor Ort	26
Abbildung 10: Gruppenfoto Dorfmeeting in Swedish Amowa	28
Abbildung 11: Luftaufnahme Wasserfassung	29
Abbildung 12: Bodenaufnahme Wasserfassung	29
Abbildung 13: Weg durch gesprengtes Felsmassiv	30
Abbildung 14: Gesprengtes Felsmassiv	30
Abbildung 15: Druckrohre	30
Abbildung 16: Stromübertragung zum Dorf	31
Abbildung 17: Holzpfeiler	32
Abbildung 18: Betonpfeiler	32
Abbildung 19: Überwachungskamera	33
Abbildung 20: Positionierung der Kamera	33
Abbildung 21: Prozess Gaussian Splatting	34
Abbildung 22: Vorbereitung der Drohne	36
Abbildung 23: Flugverlauf	37
Abbildung 24: Freischlag mit Macheten	37
Abbildung 25: Dichte Vegetation der Projektfläche	37
Abbildung 26: Gesamtmodell Seitenansicht	39
Abbildung 27: Gesamtmodell Vogelperspektive	39
Abbildung 28: Turbinenhäuschen Seitenansicht	40
Abbildung 29: Turbinenhäuschen Vogelperspektive	40
Abbildung 30: Staustufe Seitenansicht	40
Abbildung 31: Staustufe Vogelperspektive	40
Abbildung 32: Lücken im Modell	41
Abbildung 33: Kostenverteilung der Meilensteine	42
Abbildung 34: Efrem Boniface Niima	46
Abbildung 35: Spezialkühlschrank	47
Abbildung 36: Krankenhaus Kwermusl	47
Abbildung 37: Verwaltungsgebäude Mbulu Distrikt	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Parameter der Mikro-Wasserkraftanlage	25
Tabelle 2: Kostenaufstellung mit unterschiedlichen Pfeilermaterialien	32

Abkürzungsverzeichnis

ATC	Arusha Technical College
EAC	East African Community
ESIA	Environmental and Social Impact Assessment
HDR	High Dynamic Range
HSWT	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
ISO	International Organization for Standardization
KI	Künstliche Intelligenz
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
mAh	Milliamperestunde
MW	Megawatt
REA	Rural Energy Agency
SADC	Southern African Development Community
SIM	Subscriber Identity Module
TZS	Tansania-Schilling
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
V	Volt

1 Einleitung

Die zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie ist ein Schlüsselfaktor für die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung vieler Regionen weltweit. Insbesondere in ländlichen Gebieten ostafrikanischer Länder wie Tansania stellt der Zugang zu Strom oft eine große Herausforderung dar. In diesem Kontext gewinnen klein skalierte, dezentrale Stromerzeugungskonzepte zunehmend an Bedeutung. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit einem Mikro-Wasserkraftprojekt in den nördlichen Bergen Tansanias, nahe der Stadt Mbulu. Ursprünglich wurde die Anlage vom ATC als Inselbetrieb konzipiert, um abgelegene Gemeinden an eine verlässliche Stromversorgung anzuschließen und um gleichzeitig als Lehr- sowie Anschauungsobjekt für Studierende zu dienen. Durch den mittlerweile erfolgten Anschluss der Region an das öffentliche Stromnetz haben sich die Anforderungen an die Anlage jedoch gewandelt. Trotz Netzanschluss sind Stromausfälle bis heute häufig und dauern mitunter mehrere Stunden oder Tage an. Vor diesem Hintergrund soll die Mikro-Wasserkraftanlage nach ihrer Fertigstellung einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilisierung leisten und so die Lebensqualität der Bevölkerung vor Ort nachhaltig verbessern.

1.1 Problemstellung

Die Planungen für die Mikro-Wasserkraftanlage reichen inzwischen schon rund zehn Jahre zurück. Zwar wurde der Bau bereits 2016 begonnen, doch wenig später musste er 2019 aufgrund fehlender finanzieller Mittel wieder eingestellt werden. Die Unterstützung durch die Rural Energy Agency ermöglichte bislang lediglich den Erwerb der Wasserrechte und der Turbine, die Erstellung eines Umweltgutachtens, die Anschaffung der Druckrohre sowie den Baubeginn der Wasserfassung. Damit befindet sich das Projekt immer noch in einer sehr frühen Phase.

Die Dringlichkeit einer zeitnahen Fertigstellung bleibt jedoch nach wie vor hoch. Zwar sind die beiden betroffenen Dörfer inzwischen teilweise an das öffentliche Stromnetz angeschlossen, jedoch ist die Stromversorgung weiterhin von zahlreichen und teils gravierenden Ausfällen geprägt. Diese anhaltenden Unterbrechungen wirken sich unmittelbar auf den Alltag und die Entwicklungsmöglichkeiten der Bevölkerung aus. Besonders kritisch ist die Situation für die dörfliche Infrastruktur. Essentielle Einrichtungen wie das Krankenhaus und die Schule sind auf eine stabile und zuverlässige Energieversorgung dringend angewiesen, um ihre Aufgaben erfüllen zu können.

1.1 Zielsetzung

Deshalb ist es wichtig, das Projekt wieder verstärkt in den Fokus zu rücken und neue Impulse zu setzen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden das ATC sowie die Projektfläche vor Ort besucht, um einen umfassenden Einblick in die aktuelle Situation zu gewinnen. Dabei werden Gespräche mit allen relevanten Akteuren geführt, von den direkt beteiligten Personen und Institutionen über die Dorfbewohner, die von dem Projekt profitieren würden, bis hin zu Professoren des ATC.

Ein besonderer Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der möglichst präzisen Dokumentation des aktuellen Baustatus. Die Projektfläche befindet sich in einer abgelegenen Bergregion des Mbulu Distrikts, ein Ort, den viele der Beteiligten bislang noch nie persönlich gesehen haben. Daher fehlt es oft an einem klaren Bild von den tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort. Um dieses Informationsdefizit zu überwinden, werden mithilfe von Drohnenaufnahmen detaillierte 3D-Modelle der Projektfläche erstellt. So können die Gegebenheiten anschaulich dargestellt und zukünftige Planungsschritte für alle Beteiligten nachvollziehbar gemacht werden. Auf dieser Basis lassen sich konkrete Empfehlungen für das weitere Vorgehen ableiten. Das Ziel dieser Arbeit ist es demnach, das Projekt ganzheitlich zu betrachten und alle Beteiligten auf denselben Wissensstand zu bringen. Hierfür werden auch Erfahrungen und Berichte der Dorfbewohner herangezogen, um die Auswirkungen auf deren alltägliches Leben besser nachvollziehen zu können. Nur so können Zusammenhänge verstanden und die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Fortsetzung des Baus geschaffen werden.

1.3 Beteiligte Organisationen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Akteure vorgestellt, die maßgeblich an der Förderung, Planung und Umsetzung des Projekts beteiligt sind. Der Fokus liegt dabei auf drei zentralen Institutionen, die jeweils unterschiedliche, aber sich ergänzende Aufgaben übernehmen. Das Projekt selbst wurde vom ATC initiiert und durch die Doktorarbeit von Herrn Ngoma bereits umfassend aus technischer Sicht geplant. Für die finanzielle Unterstützung ist die REA zuständig, die Fördermittel bereitstellt und somit zur Umsetzung beiträgt. Darüber hinaus engagiert sich der Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V. um potenzielle Investoren aus dem Raum München auf das Vorhaben aufmerksam zu machen und die Zusammenarbeit mit dem ATC weiter zu vertiefen. So tragen alle drei Partner gemeinsam dazu bei, das Projekt erfolgreich voranzubringen. Im Anschluss werden die beteiligten Organisationen und ihre jeweiligen Aufgabenbereiche näher vorgestellt.

1.3.1 Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V.

Der Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V. wurde 2009 gegründet, hat seinen Sitz in München und engagiert sich seither dafür, den Wissensaustausch zwischen Deutschland und anderen Ländern aktiv zu fördern. Ziel ist es, einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung und zu einem besseren gegenseitigen Verständnis zu leisten. Ein besonderer Schwerpunkt des Vereins liegt auf der Planung und Umsetzung von Infrastrukturprojekten, insbesondere in Afrika und Südamerika. Neben dem bereits in Tansania etablierten „Lab in a Bag“-Projekt in Zusammenarbeit mit dem ATC, widmet sich der Verein nun auch der Unterstützung eines Wasserkraftprojekts im ländlichen Raum nahe der Stadt Mbulu (Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V., n. d.).

1.3.2 Arusha Technical College

Das Arusha Technical College (ATC) wurde 1978 durch eine Kooperation zwischen der Vereinigten Republik Tansania und der Bundesrepublik Deutschland (Westdeutschland) ins Leben gerufen. Die Hochschule hat einen hervorragenden Ruf für ihre praxisnahen Ausbildungsangebote in verschiedenen Ingenieurdisziplinen, darunter Maschinenbau, Bauingenieurwesen, Elektrotechnik und auch erneuerbare Energien. Damit hat sich das ATC als bedeutendes Kompetenzzentrum für technische Bildung und angewandte Forschung in der Region etabliert (ATC, n. d.).

1.3.3 Rural Energy Agency

Die Rural Energy Agency (REA) ist eine eigenständige Behörde, welche dem tansanischen Ministerium für Energie und Mineralien zugeordnet ist. Sie wurde 2007 gegründet und hat die Aufgabe, den Zugang zu modernen Energiequellen in den ländlichen Regionen des tansanischen Festlands zu verbessern. Ziel der REA ist es, die Lebensbedingungen der Landbevölkerung durch die Bereitstellung moderner Energiedienstleistungen nachhaltig zu verändern und damit die wirtschaftliche und soziale Entwicklung zu fördern.

Die REA arbeitet eng mit dem Privatsektor, Nichtregierungsorganisationen, lokalen Gemeinschaften und staatlichen Stellen zusammen. Zu ihren wichtigsten Aufgaben gehören die Förderung, Finanzierung und Umsetzung von Energieprojekten in ländlichen Gebieten, die Entwicklung von Richtlinien und Auswahlkriterien für die Vergabe von Fördermitteln sowie die Unterstützung und Schulung von Projektentwicklern und Dorfgemeinschaften. Durch diese Maßnahmen trägt die REA maßgeblich dazu bei, dass mehr Menschen auf dem Land Zugang zu zuverlässiger und bezahlbarer Energie erhalten (Rural Energy Agency, 2025).

2 Methodik

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zur Datenerhebung vor Ort in Tansania sowie die anschließende Ausarbeitung der Arbeit systematisch dargestellt. Bereits rund sechs Wochen vor dem Aufenthalt am ATC begann eine intensive Einarbeitung in die thematischen Schwerpunkte, insbesondere im Bereich der Wasserkraft sowie der Drohnentechnologie und -richtlinien. Es wurden erste Literaturrecherchen durchgeführt, um ein fundiertes Basiswissen aufzubauen, und parallel organisatorische Vorbereitungen, wie etwa Impfungen und die Organisation der Unterkunft getroffen. Ein weiterer wichtiger Schritt war das Ablegen des Drohnenführerscheins (A1/A3), um die nötigen Genehmigungen für die geplanten Luftaufnahmen zu erhalten. Darüber hinaus ermöglichte eine von Herrn Florian Motte (HSWT) geleitete Einführung umfassende Trainingseinheiten zu Flug- und Aufnahmetechniken, die gezielt auf die Anforderungen des Projektstandorts abgestimmt wurden.

Nach der Ankunft in Arusha, einer Universitätsstadt im Norden Tansanias, wurden zunächst Kontakte zu den beteiligten Akteuren des ATC aufgebaut. Es folgten erste Interviews mit den Projektverantwortlichen sowie die gemeinsame Besichtigung der vorgesehenen Projektfläche. Besonderes Augenmerk galt dabei den Dörfern, die direkt von der Mikro-Wasserkraftanlage profitieren sollen. Neben der Datenerhebung mittels Drohnenaufnahmen vor Ort fanden Gespräche mit verschiedenen Vertretern der Dorfgemeinschaften statt, darunter lokale Netzbetreiber, medizinisches Personal, Dorfvorsteher, Verwaltungsmitarbeitende sowie langjährige Bewohner. Diese breite Palette an Perspektiven ermöglichte es, ein möglichst ganzheitliches Verständnis der lokalen Situation und des Projektpotenzials zu gewinnen. Zugleich halfen die Gespräche, Herausforderungen frühzeitig zu identifizieren und das lokale Netzwerk der Beteiligten greifbarer zu machen.

Nach der Rückkehr nach Deutschland wurden die gesammelten Drohnen Daten genutzt, um 3D-Modelle der Projektfläche zu erstellen. Diese Modelle sorgen dafür, dass alle Teammitglieder und Entscheidungstragenden auf demselben Wissensstand agieren und erleichtern zukünftige Planungen. Schlussendlich floss der gesamte Datenbestand zusammen mit den dokumentierten Erfahrungen in die Ausarbeitung der Bachelorarbeit ein, die damit eine fundierte Grundlage für die weitere Projektentwicklung bietet.

3 Grundlagen und Situation vor Ort

Nachdem die Zielsetzung und Methodik der Arbeit nun bekannt sind, werden in diesem Kapitel die für das Thema relevanten Grundlagen erläutert. Es erfolgt eine kurze Einführung

in das Land Tansania, gefolgt von einem Überblick über die allgemeine Energiesituation und Energiepolitik des Landes. Zudem werden die grundlegenden Aspekte der Wasserkraft knapp dargestellt. Dieses Kapitel dient dazu, die nachfolgenden Abschnitte inhaltlich einzuordnen und die zentralen Themen der Arbeit zu definieren.

3.1 Kurzvorstellung Tansanias

Tansania ist ein Staat in Ostafrika (siehe Abb. 1) und mit rund 947.000 km^2 fast dreimal so groß wie Deutschland. Das heutige Staatsgebiet entstand nach der Unabhängigkeit des Festlands (früher Tanganyika) 1961 und Sansibars 1963 von Großbritannien. 1964 schlossen sich beide Gebiete zur Vereinigten Republik Tansania zusammen, die heute aus dem Festland und der Inselgruppe Sansibar besteht. Mit etwa 65,5 Millionen Einwohnern (2022) gehört Tansania zu den bevölkerungsreichsten Ländern Ostafrikas, hat aber eine relativ geringe Bevölkerungsdichte. Das Land wächst schnell, jährlich um etwa 2,9 %, und ist sehr jung. Über zwei Drittel der Bevölkerung sind jünger als 25 Jahre.



Abbildung 1: Lage Tansanias in Afrika
Quelle: wikipedia

Die Hauptstadt ist Dodoma im Landesinneren mit etwa 800.000 Einwohnern, während das wirtschaftliche Zentrum die Hafenstadt Daressalam mit rund 5,4 Millionen Einwohnern ist. Tansania ist Mitglied wichtiger regionaler Organisationen wie der Southern African Development Community (SADC) und der East African Community (EAC), zu der auch Burundi, Kenia, Ruanda, Südsudan und Uganda gehören.

Seit März 2021 ist Samia Suluhu Hassan die Präsidentin des Landes und damit auch die erste Frau in diesem Amt. Unter ihrer Führung hat sich das politische Klima verbessert, insbesondere für die Wirtschaft. Arbeitsvisa werden schneller vergeben und das Investitionszentrum wurde direkt dem Präsidentenamt unterstellt, um Investitionen effizienter zu unterstützen (Dittmeyer et al., 2024).

3.2 Energiesituation in Tansania

Diese wachsende Dynamik der tansanischen Wirtschaft hat in den vergangenen Jahren zu einem kontinuierlichen Anstieg des Stromverbrauchs geführt.

Im Dezember 2024 erreichte die gesamte installierte Stromerzeugungskapazität in Tansania 3.404,20 MW und spiegelt damit einen bedeutenden Entwicklungsschritt im Energiesektor des Landes wider. Die Zusammensetzung des Energiemixes (Abb. 2) zeigt einen klaren Schwerpunkt auf erneuerbare Ressourcen und eine stetige Diversifizierung der Stromquellen.



Abbildung 3: Verteilung der Stromerzeugungskapazität

Quelle: Eigene Darstellung

Mit einem Anteil von 2.011,27 MW (59,1 %) dominiert die Wasserkraft die installierte Erzeugungskapazität und unterstreicht ihre zentrale Rolle im tansanischen Stromsystem. Erdgas trägt mit 1.198,82 MW rund 35,2 % zur Gesamtkapazität bei und stellt damit den wichtigsten thermischen Energieträger dar. Schweröl und Diesel kommen gemeinsam auf 101,12 MW (3 %), während Biomasse und Kraft-Wärme-Kopplung 87,99 MW (2,6 %) beisteuern. Solare Photovoltaikanlagen spielen mit aktuell lediglich 5 MW (0,1 %) weiterhin eine untergeordnete Rolle im Erzeugungsmix (African Development Bank Group, 2025, S. 15-16). Die im Frühjahr 2025 erfolgte vollständige Inbetriebnahme eines Großprojekts führte zu einer weiteren Verschiebung des Stromerzeugungsmixes zugunsten der Wasserkraft. Das Julius-Nyerere-Wasserkraftwerk (Abb. 3), welches im Osten Tansanias am Rufiji-Fluss errichtet wurde, beeinflusst mit einer nun installierten Leistung von 2.115 MW den Anteil der Wasserkraft an der Gesamtstromerzeugung erheblich. Das riesige Wasserkraftwerk hat auch davor bereits Strom produziert, jedoch nur in geringerem Ausmaß mit weniger Turbinen (Elsewedy Electric, 2025).



Abbildung 2: Julius Nyerere Wasserkraftwerk

Quelle: Elsewedy Electric

Aktuelle Zahlen, inwiefern das Julius Nyerere Wasserkraftwerk den Gesamtstrommix beeinflusst, gibt es noch nicht. Einem Factsheet des deutschen Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie zufolge wird der Anteil von Wasserkraft für das Jahr 2025 jedoch auf rund 72 % prognostiziert und auch mit der Inbetriebnahme des Großprojekts begründet (AHK Services Eastern Africa Ltd., 2024). Somit ist klar zu erkennen, welchen Stellenwert die Wasserkraft in Tansania hat und zukünftig auch haben wird.

3.3 Energiepolitik in Tansania

Am 26. November 2024 erreichte der Spitzenstrombedarf in Tansania mit 1.888,72 MW einen neuen Höchstwert, was einem Anstieg von 14,9 % gegenüber dem Vorjahreswert entspricht. Vor dem Hintergrund eines prognostizierten jährlichen Nachfragewachstums von fünf bis zehn Prozent plant das Land eine weitere Diversifizierung seines Strommixes. Die kürzlich veröffentlichte Nationale Strategie für Erneuerbare Energien sowie die dazugehörige Roadmap sehen vor, bis zum Jahr 2030 zusätzlich 2.463 MW an Erzeugungskapazität zu installieren (African Development Bank Group, 2025, S. 16).

Der Anteil erneuerbarer Energien am derzeitigen Strommix wird auf 61,8 % geschätzt, bei einer Gesamtkapazität von 3.404,20 MW im Dezember 2024. Die tansanische Regierung hat das Ziel formuliert, diesen Anteil bis 2030 auf 75 % zu erhöhen. Dies soll vor allem durch verstärkte Investitionen in die Sektoren Solarenergie, Windkraft, Geothermie sowie Wasserkraft erreicht werden. Um diese Zielmarke zu realisieren, ist die Hinzufügung von etwa 1.973 MW neuer Erzeugungskapazität aus diesen erneuerbaren Quellen erforderlich. Konkret sollen bis 2030 463 MW Solarenergie, 500 MW Windkraft, 130 MW Geothermie und 880 MW an Wasserkraft errichtet werden (African Development Bank Group, 2025, S. 9).

3.4 Wasserkraft in Tansania

Wie soeben bereits erwähnt, spielt Wasserkraft eine zentrale Rolle im Energiesektor Tansanias und gilt als die wichtigste erneuerbare Energiequelle des Landes. Die Geschichte der Wasserkraftnutzung in Tansania reicht bis in die Kolonialzeit zurück, als viele kleine Wasserkraftwerke vor allem durch Missionare errichtet wurden. Das technisch nutzbare Potenzial wird auf etwa 38.000 MW geschätzt, wobei bislang nur ein kleiner Teil davon tatsächlich erschlossen ist. Die wichtigsten Wasserkraftpotenziale liegen vor allem in den Rift-Tal-Abhängen im Westen, Südwesten und Nordosten des Landes, während das zentrale Flachland aufgrund seiner Topografie weniger geeignet ist. Die Flusseinzugsgebiete Rufiji und Pangani zählen hierbei zu den bedeutendsten Wassereinzugsgebieten in Tansania (Kichonge, 2018, S. 3-4).

Allerdings haben das Wetter und insbesondere die saisonalen Regenperioden sowie Klimaveränderungen erhebliche Auswirkungen auf die Wasserkraft in Tansania. Studien belegen einen signifikanten Rückgang der jährlichen Niederschlagsmengen in Tansania um bis zu 17 % innerhalb des letzten Jahrzehnts (ausgehend vom Jahr 2018), wobei besonders die Regenzeiten März bis Mai und Juni bis September betroffen sind. Der Rückgang von Niederschlägen führt in Verbindung mit steigender Verdunstung zu einer zunehmenden Wasserknappheit, die sich zukünftig noch verstärken wird. Dies wirkt sich negativ auf die Wasserverfügbarkeit für die Stromerzeugung aus, da sowohl legale als auch illegale Wasserentnahmen zunehmen.

Klimabedingte Trockenjahre haben bereits mehrfach die stabile Stromversorgung durch Wasserkraft in Tansania beeinträchtigt. In extrem trockenen Jahren (z.B. 2000, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009 sowie 2015) sank die Wasserkraftproduktion erheblich. Zum Beispiel fiel die Erzeugung im Jahr 2006 auf nur 140 MW, obwohl die installierte Kapazität 561 MW betrug (Kichonge, 2018).

Nichtsdestotrotz spielen vor allem Kleinwasserkraftwerke eine zentrale Rolle bei der Elektrifizierung ländlicher Gebiete, insbesondere in abgelegenen Regionen, die nicht an das nationale Stromnetz angeschlossen sind. Durch ihre Errichtung an potenziellen Standorten in solchen Regionen kann der Zugang zu Strom deutlich verbessert werden, was maßgeblich zur sozioökonomischen Entwicklung beiträgt. Zudem sind Kleinwasserkraftanlagen aufgrund ihrer häufig als Laufwasserkraftwerke ausgelegten Bauweise weniger anfällig gegenüber den Schwankungen der Wasserverfügbarkeit, die durch den Klimawandel verursacht werden. Im Gegensatz zu großen Speicherkraftwerken benötigen sie keine umfangreichen Speichereinrichtungen und nutzen lediglich einen Teil des verfügbaren Wassers in Flüssen. Dadurch sind sie in der Lage, auch bei reduziertem Wasserdurchfluss zuverlässig Strom zu erzeugen, während große Wasserkraftwerke unter solchen Bedingungen oft an Leistungsgrenzen stoßen. Dies macht Kleinwasserkraftwerke besonders robust und flexibel für die Versorgung ländlicher Gebiete trotz klimatischer Herausforderungen (Kichonge, 2018, S. 8).

3.5 Grundlagen der Wasserkraft

Nachdem der Bezug Tansanias zur Wasserkraft erläutert wurde, werden im Folgenden die grundlegenden Prinzipien und Hauptbestandteile der Wasserkraft beschrieben.

Die Energie des fließenden Wassers setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen: der potenziellen Energie, die sich aus der Höhenlage des Wassers ergibt, und der kinetischen Energie, die durch seine Bewegung entsteht. Gemeinsam werden diese beiden Energieformen als Wasserkraft bezeichnet. In einem Wasserkraftwerk wird zunächst die

potenzielle Energie des Wassers genutzt, die durch den Höhenunterschied, die sogenannte Fallhöhe entsteht. Fließt das Wasser abwärts, wandelt sich die potenzielle Energie in kinetische Energie um (Wagner and Mathur, 2011, S. 4). Die Turbine, das Herzstück jeder Anlage, verwandelt die Bewegungsenergie des Wassers in mechanische Rotationsenergie. Diese wiederum wird von einem Generator aufgenommen und in elektrische Energie umgewandelt (Wagner and Mathur, 2011, S. 71).

Die erzeugbare Leistung eines Wasserkraftwerks ist proportional zum Massestrom des Wassers und zur Fallhöhe. Das bedeutet, je mehr Wasser pro Zeiteinheit durch die Turbine fließt und je größer der Höhenunterschied ist, desto mehr elektrische Energie kann erzeugt werden. Darüber hinaus beeinflusst die Gesamteffizienz der Anlage, also das Produkt aus der Turbinen- und der Generatoreffizienz, das Endergebnis maßgeblich. Um das Energiepotenzial optimal auszuschöpfen, wird das Wasserreservoir möglichst hoch angelegt, während die Stromerzeugungseinheit auf einem möglichst niedrigen Niveau installiert wird. So lässt sich die maximale Fallhöhe und damit die größtmögliche nutzbare Energie realisieren (Wagner and Mathur, 2011, S. 43).

Arten der Wasserkraftnutzung:

Wasserkraftanlagen lassen sich im Wesentlichen in drei Haupttypen unterteilen, abhängig von ihrer Funktionsweise und der genutzten Wasserquelle.

Laufwasserkraftwerke nutzen den natürlichen Fluss und den Höhenunterschied eines Flusses direkt zur Stromerzeugung. Sie verfügen entweder über einen direkten Zufluss aus dem Fluss oder über einen Umleitungskanal, besitzen jedoch keinen oder nur einen sehr kleinen Stausee.

Speicherkraftwerke hingegen sammeln das Wasser zunächst in einem hochgelegenen Reservoir, das häufig durch Regen oder Schmelzwasser gespeist wird. Die daraus gewonnene potenzielle Energie des Wassers wird bedarfsgerecht zur Stromerzeugung genutzt, zum Beispiel in Spitzenlastzeiten oder bei saisonalen Schwankungen. Zu den Speicherkraftwerken zählen auch Pumpspeicherkraftwerke, bei denen Wasser zwischen einem oberen und einem unteren Becken gepumpt wird, um Energie zu speichern und bei Bedarf kurzfristig freizusetzen. Sie stellen die einzige Möglichkeit dar, große Mengen elektrischer Energie auf indirektem Wege zu speichern.

Eine dritte Gruppe bilden Meereskraftwerke, die die Energie aus den Ozeanen nutzen. Hierzu zählen Gezeitenkraftwerke, Wellenkraftwerke, Meeresströmungskraftwerke, Meereswärmekraftwerke und Osmosekraftwerke, die jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften des Meeres für die Stromerzeugung nutzen (Wagner and Mathur, 2011, S. 4-12).

Hauptbestandteile:

Die wichtigsten Bestandteile einer Wasserkraftanlage und deren Funktion sind folgende:

- Die **Turbine** ist das Kernstück eines Wasserkraftwerks. Sie wandelt die Energie des Wassers in mechanische Energie um, indem das strömende Wasser auf die Schaufeln trifft und so die Turbinenwelle in Rotation versetzt. Dabei nehmen Druck und Geschwindigkeit des Wassers ab, wodurch Drehmoment entsteht. Je nach Standort und Betriebsbedingungen werden unterschiedliche Turbinentypen eingesetzt, da nur so ein optimaler Wirkungsgrad erreicht werden kann (Wagner and Mathur, 2011, S. 49). Man unterscheidet zwischen Impuls- und Reaktionsturbinen. Bei Impulsturbinen wird die gesamte potenzielle Energie des Wassers bereits vor dem Eintritt in die Turbine in kinetische Energie umgewandelt. Das Wasser trifft als schneller Strahl mit konstantem Druck auf die Turbinenschaufeln und setzt diese durch den Aufprall in Bewegung, wobei der Druck während des Durchströmens unverändert bleibt. Im Gegensatz dazu fließt bei Reaktionsturbinen das Wasser durch den Rotor, wobei sich sowohl Geschwindigkeit als auch Druck kontinuierlich verringern. Die dabei entstehende Reaktionskraft treibt die Schaufeln an, wobei die Turbine vollständig von Wasser umgeben ist (Wagner and Mathur, 2011, S. 72-75).
- Der **Generator** ist neben der Turbine das zentrale Bauteil eines Wasserkraftwerks und wandelt die Drehbewegung der Turbine in elektrische Energie um. Dabei rotieren Spulen in einem Magnetfeld, wodurch Strom erzeugt wird. Die Drehzahl des Generators ist fest an die Netzfrequenz gekoppelt und hängt von der Anzahl der Pol-Paare ab. Große Wasserkraftgeneratoren arbeiten meist mit mehreren Pol-Paaren, da die Turbinen relativ langsam drehen. Für die Einspeisung ins Stromnetz wird dreiphasiger Wechselstrom erzeugt. Turbine und Generator sind über eine Welle direkt verbunden.
- Das **Krafthaus** eines Wasserkraftwerks bildet gemeinsam mit den **Transformatoren** die zentrale Schnittstelle zwischen Generator und Stromnetz. Der Generator produziert zunächst Strom mit einer mittleren Spannung, typischerweise etwa 6.000 V. Um diesen Strom über weite Strecken möglichst verlustarm transportieren zu können, wird die Spannung mithilfe von Transformatoren auf Hochspannungsniveau angehoben. Diese Erhöhung der Spannung ist entscheidend, da dadurch die elektrischen Verluste auf langen Strecken erheblich verringert werden.
- Das **Reservoir** dient als Wasserspeicher, um flexibel auf schwankenden Strombedarf reagieren zu können. Speicherkraftwerke verfügen über ein oberes und ein unteres Wasserniveau, wobei die Maschinen dazwischen liegen. Das Wasser wird zunächst in einem oberen Speicher (meist ein künstlich angelegtes Reservoir) gesammelt, um es bei schwankendem Strombedarf und wechselnder Wasserführung bedarfsgerecht nutzen zu können. In Pumpspeicherkraftwerken gibt es zusätzlich ein unteres

Reservoir. Hier wird Wasser nach der Stromerzeugung gesammelt und in Zeiten mit überschüssigem Strom zurück in den oberen Speicher gepumpt. Solche Systeme gleichen Schwankungen im Strombedarf und -angebot aus und benötigen häufig künstlich angelegte Speicher, wenn natürliche nicht vorhanden sind.

- Der **Damm (Wehr)** ist ein massives Bauwerk, welches den Fluss aufstaut und so das Reservoir bildet. Er dient dazu, Wasser zu speichern und einen konstanten Durchfluss durch die Turbinen zu ermöglichen und dient darüber hinaus dem Hochwasserschutz sowie als Wasserspeicher für Bewässerungszwecke (Wagner and Mathur, 2011, S. 49-54).
- Die **Druckrohrleitung** leitet das Wasser unter hohem Druck vom Reservoir zu den Turbinen. Sie besteht meist aus Stahl oder Beton und muss sehr stabil gebaut sein, um dem durch die Fallhöhe entstehenden Druck standzuhalten. Ihre Größe und Ausführung werden an die Leistung des Kraftwerks angepasst (Wagner and Mathur, 2011, S. 58).

3.6 Grundlagen von Mikro-Wasserkraftanlagen

Mikro-Wasserkraftanlagen sind Wasserkraftwerke mit einer maximalen elektrischen Leistung von bis zu 100 kW. Sie nutzen die Energie kleiner Flüsse oder Bäche und setzen voraus, dass sowohl ein ausreichender Wasserdurchfluss als auch ein gewisser Höhenunterschied, das sogenannte Gefälle, vorhanden ist. Sie sind in der Regel viel einfacher konstruiert als große Wasserkraftanlagen und benötigen weniger technische Infrastruktur. Abbildung 4 zeigt den grundlegenden, stark vereinfachten Aufbau einer solchen Mikro-Wasserkraftanlage.

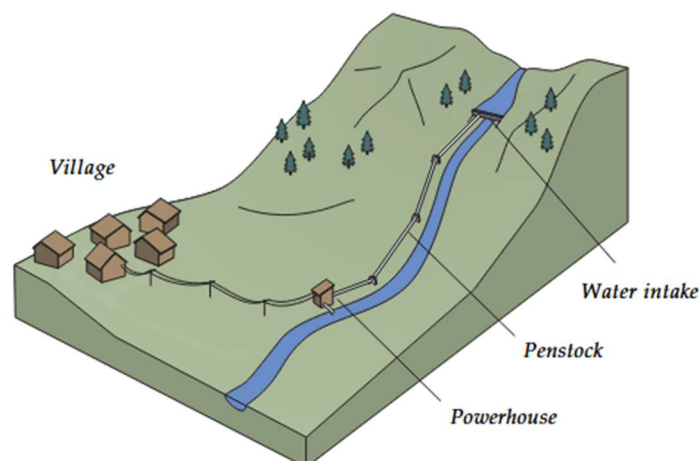


Abbildung 4: Aufbau einer Mikro-Wasserkraftanlage
Quelle: Tapia Córdoba et al., 2019

Das Wasser für Mikro-Wasserkraftanlagen wird in der Regel direkt dem natürlichen Flusslauf entnommen. Anstatt große Speicherseen zu benötigen, genügt meist eine kleine Aufstauung, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Zu den wichtigsten

Komponenten zählen die Wasserfassung (Water intake), die Druckrohre (Penstock) und das Krafthaus (Powerhouse). Nach der Nutzung wird das Wasser wieder in den natürlichen Flusslauf zurückgeführt (Tapia Córdoba et al., 2019, S. 2).

Problem ist nur, dass in der Praxis oft keine langfristigen hydrologischen Messungen für kleinere Gewässer vorliegen, weshalb diese eigenständig vor Ort durchgeführt werden müssen. Der Höhenunterschied wird mittels topografischer Karten, traditioneller Messgeräte oder digitaler Höhenmesser bestimmt. Anschließend legen Fachleute den Standort von Stauwerk und Kraftwerk so fest, dass die Rohrleitung möglichst kurz bleibt, da dies Kosten und Leistung stark beeinflusst. Zudem erfordert die Auswahl und möglichst exakte Dimensionierung der einzelnen Komponenten viel Erfahrung, da bereits kleine Änderungen am Standort oder an der Rohrführung die Leistung und Kosten der Anlage stark beeinflussen können (Tapia Córdoba et al., 2019, S. 3).

Mikro-Wasserkraftanlagen stellen dennoch eine effektive und umweltfreundliche Lösung zur Bewältigung der Energiearmut in ländlichen, isolierten Gebieten dar und sind auch die am weitesten verbreitete Technologie in diesem Segment (Tapia Córdoba et al., 2019, S. 1).

4 Mikro-Wasserkraftprojekt Mbulu

Mit dem vorangegangenen Grundlagenteil wurde eine solide Basis für das Verständnis der weiteren Ausführungen geschaffen. In diesem Kapitel steht nun die Vorstellung des Mikro-Wasserkraftprojekts im Mittelpunkt. Die technische Konzeption der Anlage wurde bereits umfassend von Dr. Ngoma im Rahmen seiner Doktorarbeit erarbeitet. Die nachfolgenden Abschnitte bieten eine prägnante Zusammenfassung seiner zentralen Ergebnisse und beleuchten die wichtigsten technischen Parameter des Projekts.

4.1 Geografische Lage

Die Projektfläche liegt im Norden Tansanias in der Manyara-Region, genauer im Mbulu Distrikt (Abb. 6). Vom Stadtzentrum Mbulu ist der Standort etwa 26 km entfernt. Aufgrund des schlechten Zustands der Straßen dauert die Anfahrt von Mbulu rund eine Stunde. Die nächstgelegenen Dörfer sind Kwermusl und Swedish Amowa, die maßgeblich von der Umsetzung des Projekts profitieren werden.

Die exakten geografischen Koordinaten der Projektfläche sind:

- Punkt 1: -3.960292, 35.607320
- Punkt 2: -3.960801, 35.608343

Die Markierungen auf Abbildung 5 kennzeichnen den Standort des Wehres und den geplanten Platz für das Turbinenhäuschen. Beide Punkte liegen etwa 127 m Luftlinie voneinander entfernt.



Abbildung 5: Standort Wehr und Turbinenhäuschen
Quelle: Google Maps

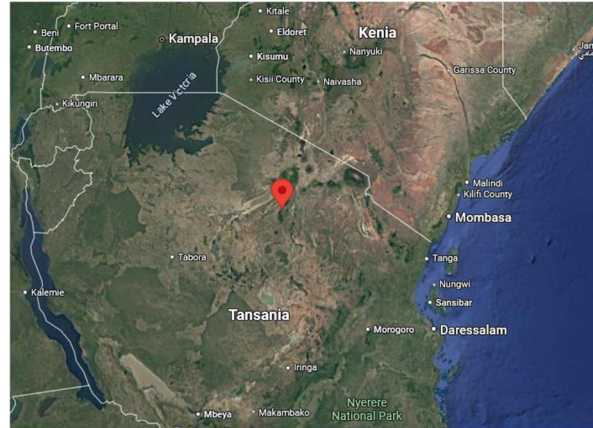


Abbildung 6: Standort der Projektfläche in Tansania
Quelle: Google Maps

Das Gelände am Standort zeichnet sich durch einen sanften Abhang im Flusstal des Hhaynu-Flusses (Abb. 7) aus und weist einen stufenartigen Wasserfall (Abb. 8) entlang der Projektfläche auf. Der Standort liegt in einem Waldgebiet und ist von landwirtschaftlich genutzten Flächen umgeben.

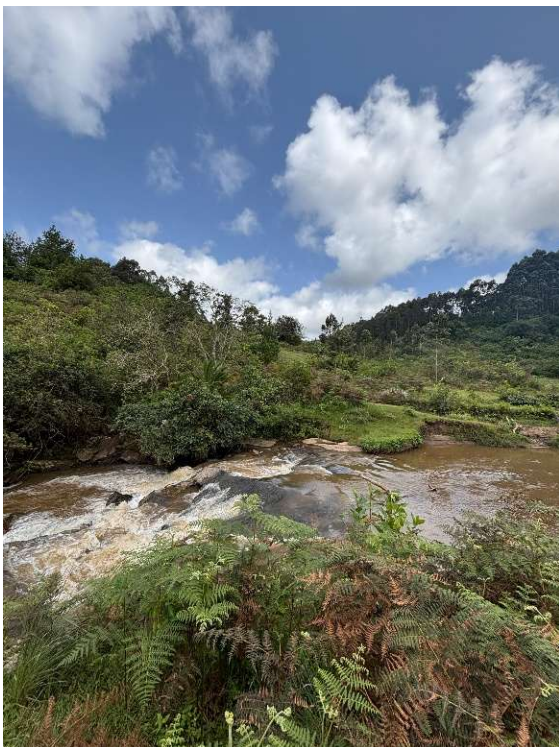


Abbildung 8: Relief der Projektfläche
Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 7: Stufenartiger Wasserfall entlang der Projektfläche
Quelle: Eigene Aufnahme

Aufgrund seiner Lage in einer Höhe von über 1.740 m über dem Meeresspiegel und der teils sehr steilen und schlechten Wege ist der Standort mit dem Auto zwar erreichbar, jedoch braucht es einen geübten Fahrer und ein geländetaugliches Fahrzeug mit Allradantrieb, um dort hinzukommen. Wetterbedingungen wie starke Regenfälle können die Anfahrt zusätzlich erschweren (Ngoma, 2020, S. 69-70).

4.2 Hydrologische Verhältnisse

Die hydrologischen Messungen für das Mikro-Wasserkraftwerk wurden durch umfangreiche Feldarbeit und Datenerhebungen vor Ort durchgeführt, um die notwendigen Eingangsdaten für das Systemdesign, die Modellierung und Simulation zu gewinnen. Ziel war es, das verfügbare Wasserkraftpotenzial zu bestimmen, um die Leistungs- und Energiekapazität des zukünftigen Kraftwerks abzuschätzen.

Durchführung der hydrologischen Messungen:

Zwei Hauptmethoden wurden zur Bestimmung des Wasserdurchflusses (Volumenstroms) des Hhaynu-Flusses angewandt:

1. Die **Schwimmermethode** ist eine einfache und praxisnahe Vorgehensweise, welche darauf basiert, die Zeit zu messen, die ein schwimmendes Objekt benötigt, um eine festgelegte Strecke im Fluss zu durchqueren. Aus der so bestimmten Oberflächengeschwindigkeit wird mithilfe eines Korrekturfaktors, der die Rauheit des Flussbetts berücksichtigt, die mittlere Fließgeschwindigkeit berechnet. In der vorliegenden Studie wurde hierfür ein Wert von 0,65 angesetzt, der für kleinere Flüsse wie den Hhaynu-Fluss als angemessen gilt. Die Messungen erfolgten über eine Distanz von mindestens drei Metern, wobei jeweils mindestens zehn Einzelmessungen durchgeführt wurden (Ngoma, 2020, S. 74).
2. Ergänzend dazu wurde die **Stromzählermethode** angewendet, welche eine höhere Genauigkeit bietet. Hierbei misst ein spezielles Gerät mit rotierendem Propeller die Fließgeschwindigkeit in verschiedenen Tiefen und Breiten des Flussquerschnitts. Für den Hhaynu-Fluss wurde der sechs Meter breite Querschnitt in zwanzig gleich große Segmente unterteilt. In jedem Segment erfolgten Geschwindigkeitsmessungen in drei unterschiedlichen Tiefen (20%, 60% und 80% der Gesamttiefe), um ein möglichst repräsentatives Bild des Durchflusses zu erhalten (Ngoma, 2020, S. 74-75).

Ein zentraler Aspekt beider Methoden war die exakte Vermessung der Flussquerschnittsfläche, da sowohl Breite als auch Tiefe des Flusses variieren können. Durch die Unterteilung in Einzelsegmente konnten Messfehler minimiert werden. An der gewählten Messstelle wurde eine Querschnittsfläche von 4,09 m² festgestellt. Der

Wasserdurchfluss ergibt sich schließlich aus dem Produkt der ermittelten mittleren Fließgeschwindigkeit und der Querschnittsfläche (Ngoma, 2020, S. 79-80).

Neben den Durchflussmessungen wurde auch die Bruttofallhöhe, also der Höhenunterschied zwischen Einlass und Turbinenhäuschen, an drei potenziellen Standorten entlang des Flusses bestimmt. Am favorisierten Standort wurde eine Bruttofallhöhe von 25 m gemessen (Ngoma, 2020, S. 73).

Die beiden angewandten Messmethoden lieferten nahezu identische Ergebnisse. Die Schwimmermethode ergab einen Durchfluss von $0,92 \frac{m^3}{s}$, die Stromzählermethode $0,90 \frac{m^3}{s}$. Zur Validierung wurden diese Werte mit historischen Daten des Hhaynu-Flusses aus den Jahren 1985 bis 2007 abgeglichen, wobei sich ähnliche saisonale Muster und Monatsmittel bestätigten. Die Messwerte lagen innerhalb der Instrumentengenauigkeit von $\pm 7 \%$ (Ngoma, 2020, S. 92).

Die wichtigsten Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bruttofallhöhe: Am Projektstandort beträgt die Bruttofallhöhe 25 m.
- Wasserdurchfluss: Der Hhaynu-Fluss weist eine durchschnittliche Durchflussrate von $0,90 \frac{m^3}{s}$ auf. In den Trockenmonaten, wie beispielsweise im Oktober, sinkt der Durchfluss auf mindestens $0,60 \frac{m^3}{s}$.
- Auslegungsdurchfluss: Unter Berücksichtigung eines notwendigen Umweltabflusses von $0,15 \frac{m^3}{s}$ sowie des Wasserbedarfs für Bewässerungszwecke wurde der technisch nutzbare Auslegungsdurchfluss für die Turbine auf $0,45 \frac{m^3}{s}$ festgelegt. Dieser Wert steht ganzjährig zur Verfügung (Ngoma, 2020, S. 100).

Insgesamt belegen die hydrologischen Messungen, dass der Standort über ein verlässlich nutzbares Wasserkraftpotenzial verfügt, das eine nachhaltige Energieversorgung für die Region ermöglicht.

Im Interview mit Herrn Ngoma wurde auch dieser Teil seiner Arbeit besprochen, der die hydrologischen Gegebenheiten am Projektstandort behandelt. Er versicherte, dass die erhobenen Daten auch weiterhin aussagekräftig und aktuell seien und es keinen Anlass gäbe, die Messungen erneut durchführen zu müssen. Auf Nachfrage bestätigte er zudem, dass im Hhaynu-Fluss keine Fischpopulationen vorkommen, die man bei der Planung der Anlage berücksichtigen müsse (Ngoma, 2025).

4.3 Strombedarf vor Ort

Zu Beginn war die Anlage als autarkes Inselsystem konzipiert, da die umliegenden Dörfer damals noch keinen Zugang zum öffentlichen Stromnetz hatten. Um eine bedarfsgerechte Versorgung sicherzustellen, wurde der Strombedarf des Dorfes im Rahmen einer detaillierten Analyse ermittelt, die auf umfassenden Feldstudien und präzisen Standortmessungen beruhte. Als Grundlage dienten dabei die realen Verbrauchsdaten der Bewohner, deren Energiebedarf zuvor durch Dieselgeneratoren, Kerosin, Batteriespeicher und Solaranlagen gedeckt wurde (Ngoma, 2020, S. 51).

Die Ermittlung des Strombedarfs erfolgte auf Basis einer detaillierten stündlichen Erfassung und Analyse verschiedener Einflussgrößen. Die wichtigsten Parameter und Berechnungsschritte werden nachfolgend anschaulich zusammengefasst.

Der stündliche Energiebedarf wurde unter Berücksichtigung folgender Faktoren bestimmt:

- **Leistung der elektrischen Geräte:** Die pro Stunde benötigte elektrische Leistung.
- **Nutzungsdauer:** Die Zeitspanne in Stunden, während der ein Gerät betrieben wird.
- **Anzahl der Geräte:** Die gleichzeitig verwendete Stückzahl eines Gerätetyps.

Die Berechnungsformel für den stündlichen Energiebedarf lautet:

$$E_{D(hourly)} = \sum_1^n (P_{D(hourly)} \times t)$$

Wobei:

- $E_{D(hourly)}$: Stündlicher Energiebedarf in kWh
- $P_{D(hourly)}$: Stündlicher Leistungsbedarf in kW
- t : Nutzungsdauer in Stunden
- n : Anzahl der Geräte

Das bedeutet, für jedes Gerät wird die benötigte Leistung mit der Nutzungsdauer multipliziert und die Werte aller Geräte werden addiert.

Um den durchschnittlichen Energiebedarf pro Stunde über einen Tag zu berechnen, wird der gesamte stündliche Energiebedarf aller 24 Stunden aufsummiert und durch 24 geteilt:

$$E_{D(hourly\ avg)} = \frac{\sum E_{D(hourly)}}{24}$$

Alternativ, wenn die Leistungsaufnahme zwischen zwei Zeitpunkten unterschiedlich ist, kann der Durchschnittswert auch durch eine Trapezregel berechnet werden:

$$E_{D(hourly\ avg)} = \frac{1}{2} (P_{D(hour\ 1)} + P_{D(hour\ 2)}) \times (t_2 - t_1)$$

Wobei:

- $P_{D(hour\ 1)}$: Leistung zum Zeitpunkt t_1
- $P_{D(hour\ 2)}$: Leistung zum Zeitpunkt t_2

Wird der Energiebedarf über einen längeren Zeitraum, zum Beispiel einen Monat, betrachtet, wird der durchschnittliche Tagesbedarf mit der Anzahl der Tage im Monat multipliziert:

$$E_{D(monthly\ avg)} = E_{D(daily\ avg)} \times days/month$$

Der tägliche Durchschnitt ergibt sich wiederum aus dem durchschnittlichen stündlichen Bedarf multipliziert mit 24 Stunden (Ngoma, 2020, S. 52-53).

Die Ergebnisse der Bedarfsanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Auf Basis dieser Formeln, der realen Verbrauchsdaten der vorhandenen Energiequellen und der Nutzungsprofile der elektrischen Geräte im Dorf wurden folgende Ergebnisse berechnet: Das Dorf weist einen durchschnittlichen täglichen Energiebedarf von 1.114,38 kWh auf. Das Lastprofil gestaltet sich dabei ausgesprochen dynamisch und unterliegt im Tagesverlauf erheblichen Schwankungen. Die Spitzenlast erreicht mit 101,8 kW ihren Höhepunkt typischerweise in den Abendstunden zwischen 19:00 und 20:00 Uhr, während die geringste Last mit nur 8,42 kW in den ruhigen Mitternachtsstunden zwischen 01:00 und 04:00 Uhr auftritt (Ngoma, 2020, S. 63).

Zur besseren Planung und Analyse wurde der Energiebedarf in drei Hauptkategorien unterteilt: Den privaten Verbrauch der Haushalte, die produktive Nutzung etwa für Gewerbe und Landwirtschaft sowie die soziale Infrastruktur wie Schulen oder Gesundheitszentren. Diese differenzierte Betrachtung ermöglicht eine bedarfsgerechte und effiziente Auslegung der zukünftigen Energieversorgung (Ngoma, 2020, S. 220-221).

Diese Berechnungen sind jedoch mittlerweile nicht mehr von allzu großer Relevanz. Ursprünglich war das Projekt ausschließlich für Kwermusl vorgesehen, als das Dorf noch rund 234 Häuser zählte. Inzwischen ist die Zahl der Häuser auf etwa 300 angewachsen, und zusätzlich wird nun auch Swedish Amowa in das Vorhaben eingebunden (Niima, 2025). Außerdem ist die Wasserkraftanlage nicht mehr als Inselbetrieb geplant. Stattdessen soll sie künftig zur Stabilisierung des regionalen Stromnetzes beitragen und so die häufigen Stromausfälle in der Region nachhaltig reduzieren (Ngoma, 2025). Dennoch ist die Darstellung der Berechnungen wichtig, um zu verstehen und nachvollziehen zu können, was alles mit der Planung einer Mikro-Wasserkraftanlage einhergeht und woran sich die nachfolgende technische Auslegung der Anlage orientiert hat.

4.4 Technische Auslegung der Anlage

Die technischen Parameter einer Wasserkraftanlage bilden die Grundlage für die Beurteilung ihrer Leistungsfähigkeit, Effizienz und Betriebssicherheit. Im Fall der hier vorgestellten Mikro-Wasserkraftanlage am Hhaynu-Fluss wurden diese Parameter durch umfassende Feldstudien, sorgfältige Datenerhebungen sowie detaillierte Modellierungs- und Simulationsanalysen ermittelt. Folgende Tabelle 1 beinhaltet die wichtigsten technischen Parameter der Anlage:

Tabelle 1: Technische Parameter der Mikro-Wasserkraftanlage

Parameter	Wert	Einheit	Bemerkung
Turbinen- und Generatorparameter			
Turbinentyp	Durchström-Turbine		Geeignet für den Auslegungsdurchfluss und die Fallhöhe; zählt zu den Impulsturbinen
Mechanische Turbinenleistung	79,5	kW	
Elektrische Generatorleistung	75,5	kW	
Maximale Energieversorgung der Wasserkraftanlage	1.812	kWh/Tag	
Turbinenwirkungsgrad (η)	72	%	
Generatorwirkungsgrad	95	%	
Gesamtsystemwirkungsgrad	68,4	%	Üblicher Wert für Anlagen dieser Art
Hydraulische Parameter			
Auslegungs-Wasserdurchfluss	0,45	$\frac{m^3}{s}$	Durchfluss, der das ganze Jahr zur Verfügung steht; Umweltaustritt berücksichtigt
Bruttofallhöhe	25	m	Differenz zwischen Einlauf und Turbine
Länge der Druckleitung	162	m	

Durchmesser der Druckleitung	460	mm	
Wassergeschwindigkeit in der Druckleitung	2,7	$\frac{m}{s}$	
Prozentualer Verlust der Fallhöhe	9,16	%	Liegt unter dem empfohlenen Wert von 10 %; entsteht durch Reibung und Turbulenzen

(Ngoma, 2020, S. 99, 137-140)

Die ursprüngliche Planung der Anlage erfolgte zu einer Zeit, als die umliegenden Dörfer noch keinen Anschluss an das öffentliche Stromnetz hatten. Um die Differenz zwischen der kontinuierlichen Stromerzeugung durch Wasserkraft und dem schwankenden Energiebedarf der Verbraucher auszugleichen, wurde ein Wasserstoff-Energiespeichersystem konzipiert. Dieses System sollte insbesondere dazu dienen, Leistungsspitzen während hoher Nachfrage abzufedern und überschüssige Energie in Zeiten geringer Last effizient zu speichern und nutzbar zu machen (Ngoma, 2020, S. 123).

Herr Ngoma wies jedoch darauf hin, dass die Entwicklung des Wasserstoff-Energiespeichersystems vor allem ein innovativer Bestandteil seiner Doktorarbeit war, der über die eigentliche Projektrealisierung hinausging. In der praktischen Umsetzung wird dieses System nicht integriert, da der überschüssige Strom mittlerweile problemlos ins öffentliche Netz eingespeist werden kann (Ngoma, 2025).

4.5 Netzwerk an Beteiligten vor Ort

Im Rahmen des Mikrowasserkraftprojekts sind zahlreiche Personen und Institutionen beteiligt, deren Verantwortlichkeiten und Beziehungen zueinander komplex und vielfältig sind. Um diese Strukturen übersichtlich darzustellen, wurde ein Diagramm erstellt (Abb. 9), das die Vernetzung der Akteure visualisiert und deren Rollen im Projekt verdeutlicht.

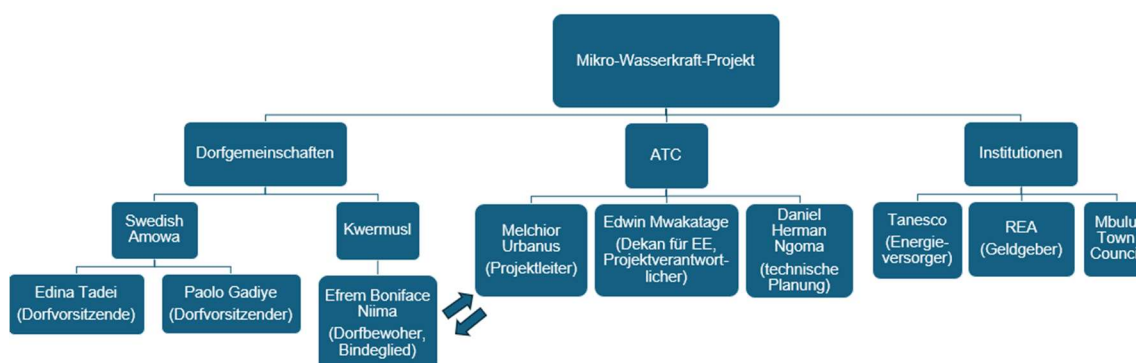


Abbildung 9: Netzwerk an Beteiligten vor Ort

Quelle: Eigene Darstellung

Das Projektteam lässt sich in drei zentrale Gruppen unterteilen, die gemeinsam an der erfolgreichen Umsetzung arbeiten:

- Das Arusha Technical College (ATC) übernimmt die Planung und spielt die zentrale Rolle im Projekt.
- Die Dorfgemeinschaften, die direkt von der neuen Energieversorgung profitieren und sowohl beim Bau als auch beim späteren Betrieb aktiv eingebunden sind.
- Weitere Institutionen, die an der Finanzierung, Umsetzung und dem Betrieb beteiligt sind.

Hauptakteure des ATC und ihre Rollen:

Im Folgenden werden die wichtigsten Vertreter des ATC und ihre jeweiligen Aufgaben im Projekt vorgestellt:

- **Melchior Urbanus** ist der Projektleiter und für die Lehre im Bereich Elektrotechnik am ATC verantwortlich. Aufgrund seiner Herkunft aus der Nähe von Mbulu verfügt er bereits über ein Netzwerk an Kontakten vor Ort und spricht neben Suaheli, der Amtssprache Tansanias, auch Iraqw, die regionale Sprache des Mbulu Hochlands. Gerade im Austausch mit der indigenen Bevölkerung erweist sich die Beherrschung ihrer traditionellen Sprache als großer Vorteil, selbst wenn die meisten vor Ort auch Suaheli sprechen. Dank seiner bestehenden Kontakte und der guten Kenntnis der Region wird die Organisation vor Ort erheblich erleichtert. Darüber hinaus ist seine fachliche Expertise für die elektrotechnische Auslegung der Anlage von zentraler Bedeutung.
- **Daniel Herman Ngoma**, Dozent im Bereich Mechanik, bringt seine langjährige Erfahrung im Bereich der mechanischen Auslegung ein. Seine Promotion befasste sich mit der technischen Planung genau dieser Mikro-Wasserkraftanlage, und er arbeitet eng mit Herrn Urbanus zusammen, um die elektrotechnischen und mechanischen Anforderungen optimal abzustimmen. Somit ist er der erste Ansprechpartner, was Fragen zur technischen Umsetzung betrifft.
- **Edwin Mwakatage**, Dekan der Fakultät für erneuerbare Energien am ATC, sorgt im Hintergrund für einen reibungslosen Ablauf. Seine Leitung eines größeren Wasserkraftprojekts (1,65 MW) am Standort Kikuletwa, einem Campusgelände des ATC mit Fokus auf erneuerbaren Energien, unterstreicht seine umfassende Erfahrung und die Bedeutung seiner Expertise für das aktuelle Vorhaben. Als Projektverantwortlicher muss er alle Handlungsschritte genehmigen, bevor diese umgesetzt werden können. Die aktive Leitung des Projekts hat jedoch Melchior Urbanus inne.

Dorfgemeinschaften und ihre Vertreter:

Zwei Dörfer, Kwermusl und Swedish Amowa, würden von dem Projekt profitieren. Ihre natürliche Grenze bildet der Hhaynu-Fluss, an dessen Ufer auch die Projektfläche liegt. Während sich der Großteil der Infrastruktur der Anlage auf der Seite von Swedish Amowa befindet, wird der erzeugte Strom in Kwermusl ankommen und dort verteilt.

Die Verbindung zwischen dem ATC und den Dorfgemeinschaften wird maßgeblich durch Herrn **Efrem Boniface Niima** gewährleistet. Als gebürtiger Bewohner von Kwermusl kennt er die örtlichen Gegebenheiten bestens und fungiert als Bindeglied zwischen den Dorfbewohnern und dem Projektteam. Insbesondere mit Herrn Urbanus steht er in sehr engem Kontakt. Seine Kontakte und sein Wissen erleichtern die Kommunikation und Organisation vor Ort erheblich.

Auch Frau **Edina Tadei**, die amtierende Dorfvorsitzende, und Herr **Paolo Gadiye**, der derzeitige Dorfvorsitzende von Swedish Amowa, sind über das Projekt informiert und möchten gemeinsam mit den Dorfbewohnern die Umsetzung tatkräftig unterstützen. Der Kontakt zwischen Swedish Amowa und dem ATC ist noch relativ neu, da das Projekt ursprünglich ausschließlich mit Kwermusl geplant war. Inzwischen ist jedoch etwa die Hälfte der Bevölkerung von Swedish Amowa, wie bereits zuvor erwähnt, dank der Verlängerung des öffentlichen Netzes über Kwermusl, ebenfalls an das Stromnetz angeschlossen, sodass das Dorf nun aktiv in das Vorhaben einbezogen wird. Auch sie haben in Gesprächen ihre Unterstützung durch Bereitstellung von Materialien und Arbeitskraft zugesichert.

Folgendes Bild (Abb. 10), das beim Besuch eines Meetings in Swedish Amowa aufgenommen wurde, zeigt, bei der zweiten Person von links beginnend, Edina Tadei, Efrem Boniface Niima, Paolo Gadiye und Melchior Urbanus.



Abbildung 10: Gruppenfoto Dorfmeeting in Swedish Amowa
Quelle: Eigene Aufnahme

Weitere beteiligte Institutionen:

Auf institutioneller Ebene ist insbesondere die **TANESCO** (Tanzania Electric Supply Company Limited) zu nennen, das staatliche Energieversorgungsunternehmen Tansanias (Athumani, 2025). Nach Fertigstellung der Anlage soll TANESCO die Anbindung an das öffentliche Stromnetz koordinieren und als Schnittstelle zwischen dem ATC und den ausführenden Bauunternehmen agieren.

Auch die **REA** ist in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung. Sie ist bislang der Hauptinvestor des Projekts und es laufen bereits Verhandlungen über weitere Förderanträge, um die Umsetzung weiter voranzutreiben. Entsprechend kommt ihr eine zentrale Rolle bei der Finanzierung des Projekts zu.

Darüber hinaus ist auch die **Stadtverwaltung von Mbulu** in das Projekt involviert, da sowohl Kwermusl als auch Swedish Amowa zum Mbulu Distrikt gehören. Herr Urbanus stand bislang in regelmäßigem Kontakt mit einer Mitarbeiterin der Verwaltung, die jedoch kürzlich in eine andere Region versetzt wurde. Daher wird aktuell nach einem neuen Ansprechpartner gesucht.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Diagramm die verschiedenen Akteure und ihre Kooperationen anschaulich visualisieren und so zu einem besseren Verständnis für das Netzwerk vor Ort beitragen kann.

4.6 Aktueller Baustatus

Das Projekt befindet sich derzeit noch in einer sehr frühen Bauphase. Bereits 2016 wurde mit dem Bau der Wasserfassung begonnen, wobei auf den folgenden Bildern (Abb.11 und 12) die ersten Betonierungsarbeiten sichtbar sind.



Abbildung 11: Luftaufnahme Wasserfassung
Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 12: Bodenaufnahme Wasserfassung
Quelle: Eigene Aufnahme

Für die Verlegung der ersten Meter der Druckrohre unmittelbar nach dem Reservoir wurden gezielte Sprengungen im Felsen durchgeführt, wie auf den Abbildungen 13 und 14 zu erkennen ist. Durch die kontrollierte Detonation konnte das Felsmassiv so geöffnet werden, dass ein etwa 100 cm breiter Durchgang entstand, ausreichend, um die Rohre zu verlegen und den Zugang für die Arbeiter zu gewährleisten. Jedoch sind die Sprengungsarbeiten auch noch nicht vollständig abgeschlossen.



Abbildung 13: Weg durch gesprengtes
Felsmassiv
Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 14: Gesprengtes Felsmassiv
Quelle: Eigene Aufnahme

Im Jahr 2019 wurden die Bauarbeiten jedoch aufgrund fehlender finanzieller Mittel eingestellt. Abgesehen vom Erwerb der Wasserrechte, einer erfolgreich abgeschlossenen Umweltprüfung und der Beschaffung der Druckrohre (Abb. 15) sind bislang demnach noch keine weiteren baulichen Maßnahmen am Standort umgesetzt worden.



Abbildung 15: Druckrohre
Quelle: Eigene Aufnahme

Da am Projektstandort seit rund sechs Jahren keine Bauarbeiten mehr stattgefunden haben, ist das Gelände bei der jüngsten Begehung stark zugewachsen gewesen. Um Zugang zur Fläche zu erhalten, mussten vier der Anwohner mit Macheten zunächst einen Weg durch die dichte Vegetation freischlagen. Bevor die Bauarbeiten fortgesetzt werden können, ist es daher erforderlich, das Areal zunächst umfassend zu räumen und entsprechend vorzubereiten, um einen reibungslosen und sicheren Arbeitsablauf zu gewährleisten.

4.7 Stromübertragung zum Dorf

Die Projektfläche liegt etwas außerhalb der umliegenden Ortschaften, sodass der erzeugte Strom zunächst über eine Distanz von 5,78 km bis nach Kwermusl transportiert werden muss (Abb. 16). Dort wird der Strom dann in das öffentliche Netz eingespeist.



Abbildung 16: Stromübertragung zum Dorf
Quelle: Ngoma, 2020

Diese Strecke führt durch eine landschaftlich reizvolle, aber zugleich herausfordernde Umgebung mit dichter Vegetation und hügeligem Gelände (Ngoma, 2020, S. 69). Um eine fundierte Einschätzung zu den Kosten und zur Machbarkeit der Stromleitung zu erhalten, wurde das Büro des staatlichen Energieversorgers TANESCO in Mbulu aufgesucht. Die TANESCO ist für die Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie auf dem tansanischen Festland verantwortlich.

Im Gespräch mit Herrn Ing. Hiyobo Athumani, dem Bezirksleiter von TANESCO in Mbulu, wurde bestätigt, dass der Bau der Stromleitung in diesem Gebiet grundsätzlich keine größeren Schwierigkeiten bereiten sollte. Folgende Tabelle 2 veranschaulicht, dass die zu erwartenden Kosten maßgeblich davon abhängen, ob Beton- oder Holzpfiler zum Einsatz kommen:

Tabelle 2: Kostenaufstellung mit unterschiedlichen Pfeilermaterialien

Material	Kosten pro km Leitung	Vorteile	Nachteile
Betonpfeiler	Ca. 19.800 €	Sehr wetterbeständig, kaum brandanfällig	Höhere Investitionskosten
Holzpfeiler	Ca. 14.850 €	Günstiger in der Anschaffung	Weniger langlebig, anfälliger für Witterung und Brand

Diese prognostizierten Kosten würden, bei einer Gesamtlänge von 5,78 km, bei Holzpfeilern (Abb. 17) einen Gesamtpreis von etwa 86.000 € ergeben und bei Betonpfeilern (Abb. 18) rund 114.000 €.



Abbildung 17: Holzpfeiler
Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 18: Betonpfeiler
Quelle: Eigene Aufnahme

Die Entscheidung für das geeignete Material sollte daher sorgfältig unter Berücksichtigung der finanziellen Möglichkeiten sowie der langfristigen Zuverlässigkeit getroffen werden. Betonpfeiler bieten eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen, während Holzpfeiler zwar kostengünstiger sind, jedoch eine geringere Lebensdauer und Stabilität aufweisen (Athumani, 2025).

4.8 Überwachung der Anlage per Kamera

Um die Überwachung der Projektfläche effizient und unkompliziert zu gestalten, fiel die Entscheidung auf den Einsatz einer Überwachungskamera. Da das Gelände sehr abgelegen und schwer zugänglich ist, ermöglicht die Kamera eine schnelle und ortsunabhängige visuelle Kontrolle. So kann der Baufortschritt jederzeit aus der Ferne beobachtet werden. Auch nach Fertigstellung der Anlage bleibt die Kamera nützlich. Sie

dient dazu, den störungsfreien Betrieb zu überprüfen und beispielsweise ungewöhnliche Wasserstände frühzeitig zu erkennen.

Nach sorgfältigem Vergleich verschiedener Modelle fiel die Wahl auf die wetterfeste XEGA XG-02 4G LTE-Überwachungskamera, welche auf Abbildung 19 zu sehen ist. Ausgestattet mit einem flexibel montierbaren 5-Watt-Solarmodul und einem leistungsstarken 9000-mAh-Akku, ist sie für einen autarken Betrieb bestens geeignet.



Abbildung 19:
Überwachungskamera
Quelle: Xegatech

Besonders für den Einsatz in abgelegenen Gebieten erweist sie sich als vorteilhaft, da sie mit einer SIM-Karte ausgestattet ist. Dadurch können die Kamerabilder unabhängig vom Standort an ein Endgerät übertragen werden, vorausgesetzt, es besteht Mobilfunkempfang und ausreichend Tageslicht. Beides ist am gewählten Standort gegeben. Dank integrierter Nachtsichtfunktion kann die Anlage auch bei Dunkelheit zuverlässig überwacht werden (siehe Anhang A).

Vor der Installation wurde zunächst eine passende SIM-Karte ausgewählt, die flexibel mit Guthaben aufgeladen werden kann. So entstehen nur dann Kosten, wenn die Kamera tatsächlich genutzt wird. Außerdem wurden die Kamera sowie die Verbindung zum Endgerät vor dem ersten Einsatz am ATC umfassend getestet, um einen reibungslosen Betrieb sicherzustellen.

Bei der Begehung der Projektfläche wurden verschiedene Standorte für die Kamera diskutiert. Die Wahl fiel schließlich auf einen Baum, von dem aus sowohl die Wasserfassung, das Wehr, der Zuleitungskanal, das Reservoir als auch der Wasserstand des Flusses gut einsehbar sind. Dank des schwenkbaren Kamerakopfes können alle relevanten Bereiche flexibel per Fernsteuerung überwacht werden. Folgende Abbildung 20 zeigt die Positionierung der Kamera, wobei diese durch einen roten Punkt dargestellt wird.



Abbildung 20: Positionierung der Kamera
Quelle: Eigene Aufnahme

Nach Rücksprache mit Herrn Urbanus wurde jedoch beschlossen, die Kamera erst mit Beginn der Bauarbeiten zu installieren. Da aktuell noch keine Bauaktivitäten stattfinden, wäre eine frühzeitige Installation mit einem erhöhten Risiko für Beschädigung oder Diebstahl verbunden. Herr Urbanus und sein Team werden die Kamera daher erst zum Baustart an der vorgesehenen Position montieren.

5 UAV-basierte Standortmodellierung

Aufgrund der abgeschiedenen Lage der Dörfer und der schwierigen Zugänglichkeit des Projektgebiets konnten einige der verantwortlichen Personen das Gelände bislang nicht persönlich besuchen. Um dennoch allen Beteiligten einen umfassenden Eindruck der örtlichen Gegebenheiten zu vermitteln, wurden gezielt Drohnenaufnahmen vor Ort durchgeführt. Die daraus entstandenen Modelle erweisen sich als äußerst hilfreich. Sie erleichtern nicht nur die zukünftige bauliche Planung und ermöglichen eine anschauliche Visualisierung, sondern tragen auch dazu bei, Missverständnisse im Planungsprozess zu vermeiden.

In den folgenden Kapiteln werden die eingesetzten Techniken und Programme vorgestellt, der Ablauf der Drohnenaufnahmen beschrieben und schließlich die fertigen Ergebnisse präsentiert.

5.1 Gaussian Splatting

3D-Gaussian-Splatting (3DGS) ist eine innovative Methode zur Echtzeit-Darstellung und -Wiedergabe von 3D-Szenen, die für die 3D-Modell-Generierung eingesetzt wurde. Sie revolutioniert die Neudarstellung von Szenen, die mittels mehrerer Fotos oder Videos erfasst wurden, indem sie eine hohe visuelle Qualität mit wettbewerbsfähigen Trainingszeiten und Echtzeit-Rendering-Geschwindigkeiten kombiniert (Kerbl et al., 2023, S. 1).

Die Methode beruht auf folgenden Komponenten (Abb. 21), die zusammen eine effiziente und qualitativ hochwertige Darstellung ermöglichen:

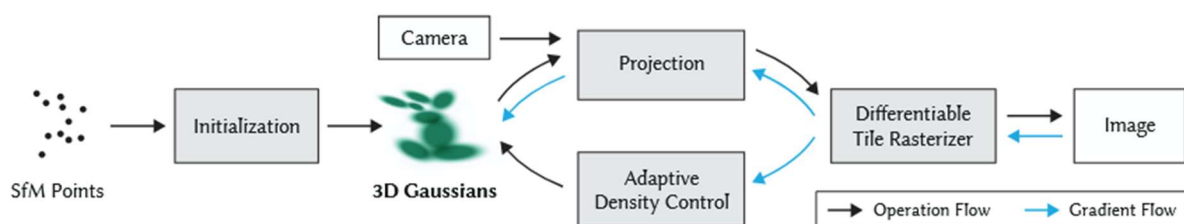


Abbildung 21: Prozess Gaussian Splatting
Quelle: Kerbl et al., 2023

Initialisierung mit SfM-Punkten

Die Szene wird als eine Vielzahl von 3D-Gaußschen Verteilungen modelliert. Jede dieser Verteilungen ist durch ihre Position, Form (Kovarianz), Deckkraft und Farbe (mittels kugelharmonischer Koeffizienten) definiert. Diese Gaußschen Verteilungen sind besonders flexibel und werden initial aus wenigen, durch Structure-from-Motion (SfM) gewonnenen Punkten, auch genannt Punktwolken, erzeugt.

Adaptive Optimierung und Dichtekontrolle

Die Parameter der Gaußschen Verteilungen werden gezielt optimiert. Dabei wird die Dichte der Gaußschen Verteilungen dynamisch angepasst. In Bereichen mit unzureichender Abdeckung werden zusätzliche Gaußsche Verteilungen erzeugt oder bestehende aufgeteilt, während überflüssige, transparente oder zu große Verteilungen entfernt werden. So bleibt die Szenenbeschreibung präzise und effizient.

Projektion

Die 3D-Gaussians werden in den 2D-Bildraum projiziert, um gerendert zu werden. Dies geschieht unter Beibehaltung der Eigenschaften einer differenzierbaren volumetrischen Darstellung.

Schneller, differenzierbarer Renderer

Ein spezialisierter, kachel-basierter Rasterizer projiziert die Gaußschen Verteilungen zügig als 2D-Splats auf das Bild. Für ein korrektes Blending werden diese Splats in jedem Frame nach ihrer Tiefe sortiert. Der gesamte Rendering-Prozess ist vollständig differenzierbar, was eine effektive Optimierung der Szene ermöglicht (Kerbl et al., 2023, S. 4-6).

Die Methode bietet mehrere entscheidende Vorteile. Sie liefert eine ebenso hohe oder sogar bessere Bildqualität als bisherige Verfahren, wie beispielsweise Mip-NeRF 360. Gleichzeitig verkürzt sich die Trainingszeit erheblich, statt vieler Stunden genügen bereits wenige Minuten, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Darüber hinaus ermöglicht die Methode eine flüssige Echtzeit-Visualisierung mit mindestens 30 Bildern pro Sekunde. Dadurch lassen sich hochwertige 3D-Szenen besonders schnell und ohne lange Wartezeiten darstellen, was sowohl für interaktive Anwendungen als auch für die effiziente Nutzung in der Praxis von großem Vorteil ist (Kerbl et al., 2023).

5.2 Optimale Kameraführung

Um eine Szene optimal für das Training eines 3D-Strahlungsfeldes zu erfassen, sollte die Kamera stets bewegt werden, wobei die Brennweite während der gesamten Aufnahme konstant bleibt. Die Szene wird idealerweise aus möglichst vielen verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen, etwa indem die Kamera auf mehreren Ringen mit unterschiedlichen Höhen und Neigungen um das Objekt geführt wird. Statische Szenen

sind wichtig: Bewegte Objekte, wechselnde Lichter oder Schatten sowie Linsenreflexionen sollten vermieden werden, da sie zu Artefakten führen können. Kurze Belichtungszeiten und kleine Blenden helfen, Unschärfe zu vermeiden. Falls nötig, kann eine höhere ISO gewählt werden, da Rauschen weniger problematisch ist als Unschärfe. Automatische Belichtung und Weißabgleich sollten möglichst deaktiviert und, wenn möglich, HDR-Aufnahmen genutzt werden. Für das Training werden meist 400 Bilder mit mindestens 30 % Überlappung empfohlen, wobei Videos von ein bis zwei Minuten oder Serienaufnahmen mit zwei bis drei Bildern pro Sekunde ausreichen. Diese Hinweise sind allesamt als Richtlinien zu verstehen, weshalb kleinere Abweichungen dennoch zu guten Ergebnissen führen können (Jawset Visual Computing, 2025).

5.3 Durchführung der Drohnenaufnahmen

Die Drohnenaufnahmen wurden unter Anwendung der beschriebenen Techniken an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Bei dem eingesetzten Drohnen-Modell handelt es sich um die DJI Mavic Air 2, die, wie auf Abbildung 22 zu sehen ist, gerade für den Flug vorbereitet wird.



Abbildung 22: Vorbereitung der Drohne
Quelle: Eigene Aufnahme

Am ersten Tag fanden fünf Ringflüge über den oberen Bereich der Projektfläche statt, wo künftig das Wehr und der Zuleitungskanal entstehen sollen. Dabei wurde gezielt darauf geachtet, verschiedene Höhen und Blickwinkel einzubeziehen, um möglichst detailreiche Aufnahmen zu erhalten.

Am zweiten Tag, an dem mehr Zeit zur Verfügung stand, konzentrierten sich die Flüge auf den unteren Abschnitt der Fläche, den zukünftigen Standort des Turbinenhäuschens. Hier wurden drei weitere Ringflüge in unterschiedlichen Höhen und Perspektiven durchgeführt.

Zusätzlich wurde die Strecke zwischen Turbinenhaus und Wehr mehrfach abgeflogen, um die gesamte Projektfläche umfassend zu dokumentieren. Folgende Abbildung 23 veranschaulicht die Flüge.

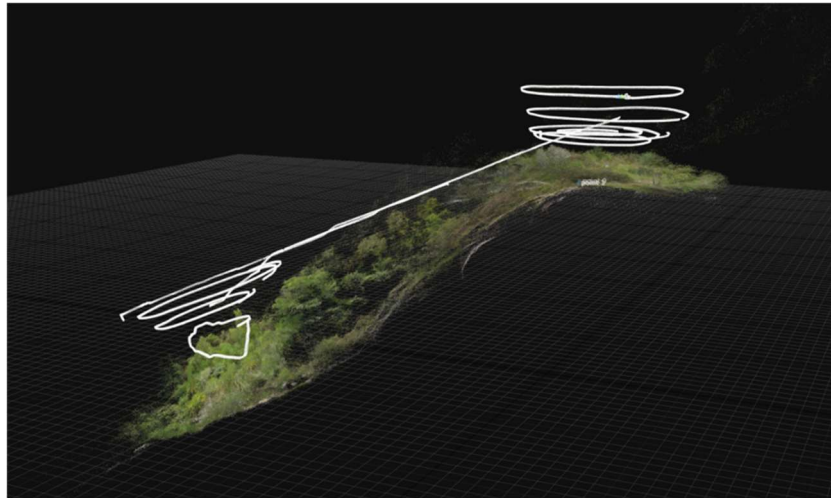


Abbildung 23: Flugverlauf

Quelle: Jawset Postshot

Sowohl Flüge über Land, zur Erfassung des geplanten Druckrohrverlaufs, als auch über Wasser, zur anschaulichen Darstellung der örtlichen Gegebenheiten, wurden durchgeführt.

Für die Aufnahmen im Bereich des Turbinenhäuschens musste das Gelände zunächst mit Macheten von dichter Vegetation befreit werden (Abb. 24 und 25), um klare und aussagekräftige Videos zu ermöglichen und den geplanten Standort des Gebäudes deutlich sichtbar zu machen. Das dabei entstandene Videomaterial umfasst circa 25 Minuten Flugzeit.



Abbildung 25: Freischlag mit Macheten

Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 24: Dichte Vegetation der Projektfläche

Quelle: Eigene Aufnahme

5.4 Generierung der Modelle

Mit Hilfe von Florian Motte, einem wissenschaftlichen Mitarbeiter der HSWT, wurde die Modellgenerierung durchgeführt. Zuerst wurden im Rahmen der Datenauswertung die aufgezeichneten Videodaten mit RealityScan in über 8000 Einzelbilder (Frames) zerlegt. Im Anschluss erfolgte innerhalb derselben Software sowohl das exakte Kamera-Alignment als auch die Generierung einer Sparse Point Cloud, also einer spärlichen Punktwolke, welche die grundlegende Struktur einer Szene abbildet. Diese ermöglichte es, das Gesamtszenario mitsamt aller geflogenen Flugpfade und Kamerapositionen anschaulich zu visualisieren.

Für die 3D-Rekonstruktion mittels Gaussian Splatting wurde die Software PostShot von Jawset eingesetzt. Erste Ansätze, die auf der Verwendung der vollständigen Bilddatensätze basierten, brachten jedoch äußerst lange Rechenzeiten von mehr als fünf Tagen sowie unbrauchbare Resultate mit sich. Um die Effizienz und Qualität zu steigern, erfolgte daraufhin eine gezielte Auswahl besonders hochwertiger Einzelbilder. So konnten für das Modell des Wasserfassungsstandorts und das Modell des Turbinenhäuschenstandorts jeweils rund 2000, für das Gesamtmodell (vom Eintritt bis zum Auslass) etwa 200 Bilder identifiziert und verwendet werden.

Während der Modellierung mit PostShot wurde das Single-Camera-Setup aktiviert, sodass eine einheitliche Kamerakalibrierung zum Tragen kam. Die originalen Bildauflösungen wurden für den gesamten Prozess beibehalten, ein Downscaling unterblieb vollständig. Für jedes Teilmodell wurde ein Trainingsumfang von 30.000 Iterationen festgelegt. Eine Iteration bezeichnet in diesem Kontext einen einzelnen Durchlauf, bei dem eine bestimmte Berechnung mit den jeweils aktuellen Werten ausgeführt wird. Die gesamte Prozessierung aller drei Modelle nahm insgesamt etwa vier Tage in Anspruch.

Es ist hervorzuheben, dass die mit RealityScan extrahierten Punktwolken ausschließlich der Visualisierung und Dokumentation dienten, und nicht als direkte Eingabedaten für das Gaussian-Splatting-Verfahren in PostShot herangezogen wurden.

5.5 Ergebnisse

Nach Abschluss der gesamten Prozessierung konnten die drei Einzelmodelle mithilfe der Anwendung SuperSplat erfolgreich zu einem umfassenden, großen 3D-Modell zusammengefügt werden. SuperSplat ermöglicht es dabei, mehrere 3D-Modelldateien direkt per Drag-and-drop im Browser zu laden, auszurichten und als Gesamtmodell darzustellen (SuperSplat, 2025). Die intuitive Oberfläche erlaubt es, die einzelnen Modelle flexibel zu positionieren, zu skalieren und gemeinsam zu visualisieren, sodass ein realistischer Eindruck der gesamten Projektfläche entsteht. In Abbildung 26 ist dieses

zusammengesetzte Modell in seinem vollen Umfang aus einer leicht schrägen Perspektive zu sehen, während Abbildung 27 die vollständige Fläche aus der Vogelperspektive darstellt.

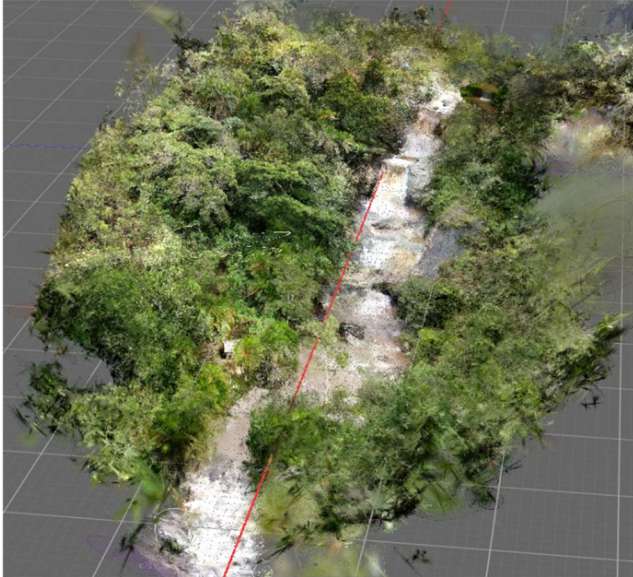


Abbildung 27: Gesamtmodell Seitenansicht
Quelle: SuperSplat



Abbildung 26: Gesamtmodell Vogelperspektive
Quelle: SuperSplat

Zusätzlich wurden im Rahmen der Standortmodellierung zur anschaulichen Darstellung ein Turbinenhäuschen sowie eine Staustufe in das Modell integriert. Ziel war es, sichtbar zu machen, wie die geplanten Bauwerke die Projektfläche künftig prägen könnten und deren exakte Lage im Modell zu verdeutlichen. Hierfür kamen die KI-Anwendungen ChatGPT und Gemini zum Einsatz, um realistische Bilder des Turbinenhäuschens und der Staustufe zu generieren. Diese Bilddaten wurden anschließend mit den videobasierten KI-Tools Veo2, Veo3 und Sora zu Videosequenzen verarbeitet, in denen die Bauwerke aus verschiedenen Perspektiven zu sehen sind. Die daraus entstandenen Videos dienen als Grundlage, um nach dem gleichen Verfahren wie bei den Drohnenaufnahmen, ein detailliertes 3D-Modell der Objekte zu erstellen und dieses in das Projektflächenmodell zu integrieren. So konnte ein möglichst realistisches Bild des zukünftigen Projektgebiets vermittelt werden. Auf folgenden Abbildungen 28 und 29 sind nähere Aufnahmen des Turbinenhäuschens im Modell zu sehen.



Abbildung 30: Turbinenhäuschen Seitenansicht
Quelle: SuperSplat



Abbildung 31: Turbinenhäuschen Vogelperspektive
Quelle: SuperSplat

Auch für das zukünftige Wehr bzw. die Staustufe wurde ein Modell mit dem soeben geschilderten Verfahren erstellt, und wie auf folgenden Abbildungen 30 und 31 zu sehen ist, ebenfalls mit in das Gesamtmodell integriert.



Abbildung 28: Staustufe Seitenansicht
Quelle: SuperSplat



Abbildung 29: Staustufe Vogelperspektive
Quelle: SuperSplat

In den mittleren Bereichen des Modells ist die Detailgenauigkeit nicht so hoch ausgeprägt wie bei der Staustufe oder dem Standort des Turbinenhäuschens. Der Grund hierfür liegt darin, dass aufgrund der beträchtlichen Länge der Fläche in der Modellmitte keine Ringflüge mit der Drohne durchgeführt werden konnten. Dadurch entstanden bei der Bildaufnahme Lücken, insbesondere hinsichtlich bestimmter Seitenansichten, was sich in der anschließenden Prozessierung bemerkbar machte. In diesen Zonen weist das Modell deshalb einzelne Verzerrungen und kleinere Lücken auf, wie auch in Abbildung 32 zu erkennen ist.



Abbildung 32: Lücken im Modell
Quelle: SuperSplat

Nichtsdestotrotz ist das Ergebnis äußerst anschaulich geworden und ermöglicht eine vollständige Erfassung der Projektfläche. Die Integration der Staustufe sowie des Turbinenhäuschens ist ebenfalls gelungen und ergänzt das Modell in sinnvoller Weise. Dadurch entsteht ein umfassender Eindruck der örtlichen Gegebenheiten, selbst ohne die Projektfläche jemals persönlich besucht zu haben. Dies wird voraussichtlich zukünftige Planungsprozesse erleichtern und dazu beitragen, Missverständnisse im Verlauf zu minimieren.

6 Finanzierung

Im Folgenden werden nun die finanziellen Eckdaten des Projekts beleuchtet. Die detaillierte Kostenaufstellung für das Mikro-Wasserkraftprojekt, welche vom ATC bereitgestellt wurde, ist im Anhang B dargestellt und umfasst insgesamt 13 zentrale Projektmeilensteine. Diese bilden die wichtigsten Abschnitte im Ablauf des Vorhabens ab, angefangen bei vorbereitenden Maßnahmen wie dem ersten Community Meeting bis hin zur finalen Installation der Stromübertragungsinfrastruktur. Grün markierte Meilensteine wurden bereits durchgeführt/erworben.

Jeder Meilenstein ist in einzelne Aktivitäten untergliedert, die jeweils mit Mengenangaben, Einheiten, Einheitskosten und Gesamtkosten spezifiziert sind. Zu den ersten Arbeitsschritten zählen die Durchführung von Informationsveranstaltungen in der Projektregion sowie die Erarbeitung rechtlicher Grundlagen, einschließlich der Beschaffung von Grundstücksdokumenten und der Einholung wasserrechtlicher Genehmigungen. Diese vorbereitenden Maßnahmen machen nur einen geringeren Teil der Gesamtkosten aus.

Ein deutlich größerer Kostenanteil entfällt auf die mittleren und späteren Phasen des Projekts, insbesondere die technischen und baulichen Umsetzungen. So entstehen im

Bereich der Bauarbeiten („Civil Work“) hohe Gesamtkosten, da Materialtransporte, Grabungsarbeiten und bauliche Konstruktionen wie Kanäle, Wasserfassungen oder Fundamentierungen realisiert werden müssen. Auch im Bereich der elektromechanischen Systeme, etwa für Turbinen, Druckrohre und Anlagentechnik, sowie für den Netzanschluss und die Stromübertragung sind bedeutende finanzielle Aufwendungen vorgesehen. Die Beschaffung von Transformatoren, Strommasten und Leitungen macht einen wesentlichen Anteil am Gesamtbudget aus.

Darüber hinaus sind Mittel für das Projektmanagement, das Monitoring sowie Umwelt- und Sozialverträglichkeitsprüfungen (ESIA) eingeplant, die zur nachhaltigen Qualitätssicherung, Akzeptanz und rechtlichen Absicherung beitragen.

Die vorliegenden Projektkosten wurden in der Landeswährung Tansania-Schilling (TZS) ermittelt und zur besseren Veranschaulichung zum bisherigen Monatskurs des 01.07.2025 bis zum 16.07.2025, welcher 0,00033 beträgt, in Euro umgerechnet (Europäische Kommission, 2025). Die Umrechnung erfolgte mit Hilfe dieser Formel:

$$\text{Betrag (TZS)} \times \text{Monatskurs Juli (Euro)}$$

So errechnet sich der Preis in Euro für die Wassernutzungsrechte beispielsweise wie folgt:

$$5.200.000 \text{ TZS} \times 0,00033 = 1.716 \text{ €}$$

Die Gesamtheit der kalkulierten Kosten beläuft sich auf rund 797.503.000 TZS, beziehungsweise 263.176 €. Das nachfolgende Diagramm (Abb. 33) stellt die Kostenverteilung der einzelnen Meilensteine dar.

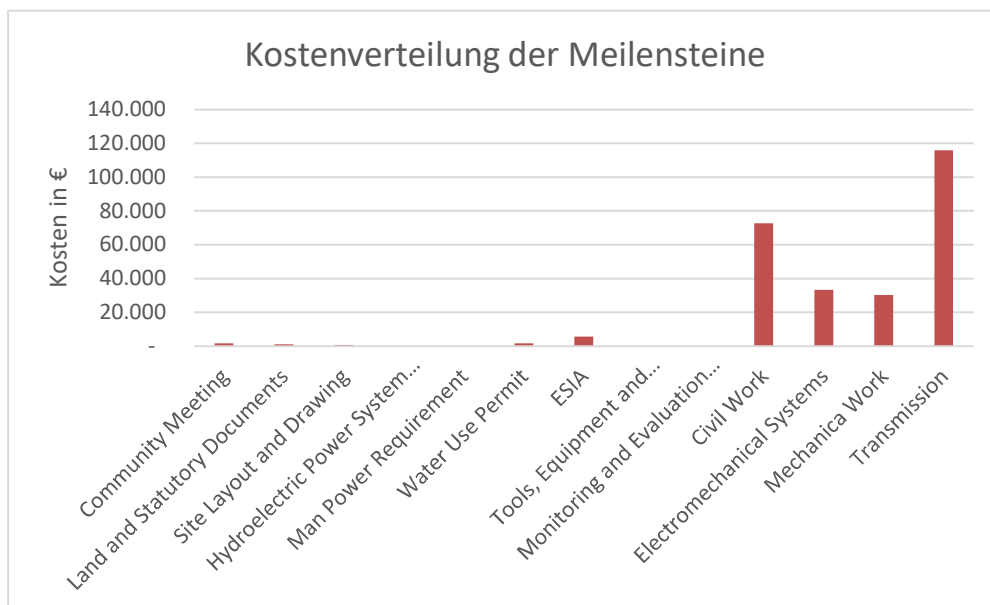


Abbildung 33: Kostenverteilung der Meilensteine
Quelle: Eigene Darstellung

Daraus wird ersichtlich, dass mit knapp 116.000 € nahezu die Hälfte der gesamten Projektkosten auf die Stromübertragung zum Dorf (Transmission) entfällt. Diese Kostenschätzung liegt in einem ähnlichen Rahmen wie die Einschätzung des TANESCO-Ingenieurs Hiyobo Athumani, was die Höhe der geplanten Ausgaben als realistisch erscheinen lässt.

Auch die Projektmeilensteine Mechanische Arbeiten (Mechanic Works), Elektromechanische Systeme (Electromechanical Systems) sowie die Bauarbeiten (Civil Works) tragen mit 30.205 €, 33.254 € bzw. 72.633 € erheblich zu den Gesamtkosten bei. Im Gegensatz dazu fallen die Ausgaben für andere Meilensteine, mit Ausnahme der Umweltverträglichkeitsprüfungen (ESIA) zu rund 5.676 €, vergleichsweise gering aus.

Insgesamt ermöglicht die strukturierte Kostenaufstellung einen umfassenden Überblick über Ressourcenbedarf, Umfang und wirtschaftliche Auswirkungen der jeweiligen Projektschritte. Die Gliederung nach Meilensteinen unterstützt dabei eine transparente Budgetplanung und dient als Grundlage für spätere Projektkontrollen.

6.1 Bisherige finanzielle Aufwendungen

Da die Umsetzung des Projekts bereits begonnen hat, sind folgerichtig auch erste finanzielle Mittel investiert worden. Die bisher aufgewendeten Gelder betreffen insbesondere die ersten sieben Meilensteine und belaufen sich auf etwa 11.064 €.

Darüber hinaus wurden auch bereits Komponenten aus Meilenstein 9 beschafft, nämlich die elektromechanische Turbine (65 kW) sowie die Druckrohre (Penstock, 120 m Länge, 350 mm Durchmesser). Für diese beiden Positionen fielen Kosten in Höhe von 7.425 € bzw. 12.870 € an.

Insgesamt wurden somit bereits 31.359 € in das Projekt investiert. Diese Mittel stammen ausschließlich von der REA, die derzeit als einziger Geldgeber fungiert.

6.2 Verbleibende Kostenabschätzung

Zieht man die bisher investierten Mittel von der prognostizierten Gesamtsumme des Projekts ab, ergibt sich ein verbleibender Finanzierungsbedarf von rund 231.817 €, der für die vollständige Umsetzung der Mikro-Wasserkraftanlage noch erforderlich ist.

Laut Aussage von Herrn Ngoma befindet sich das ATC aktuell in weiterführenden Verhandlungen mit der REA, um zusätzliche finanzielle Mittel zu akquirieren. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese allein nicht ausreichen werden, um den gesamten Finanzierungsbedarf zu decken. Daher ist das Projektteam derzeit aktiv auf der Suche nach weiteren Investoren, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene (Ngoma, 2025).

7 Gesellschaftlicher Nutzen und lokale Perspektiven

Sollte es gelingen, die finanziellen Mittel zu beschaffen, wird die neue Mikro-Wasserkraftanlage nach ihrer Fertigstellung nicht nur als innovative Lehr- und Demonstrationsanlage für Studierende am ATC dienen, sondern vor allem den Gemeinden Kwermusl und Swedish Amowa spürbare Vorteile bringen.

Um die vielfältigen positiven Effekte dieser Anlage umfassend darzustellen, werden im Folgenden zunächst die wichtigsten Ergebnisse einer wissenschaftlichen Studie vorgestellt. Im Anschluss werden diese Erkenntnisse durch persönliche Eindrücke und Stimmen aus Interviews mit der lokalen Bevölkerung komplementiert, um ein umfassendes Bild des Verbesserungspotenzials vor Ort zu vermitteln.

7.1 Empirisch belegte Verbesserungen

Betrachtet wird hierfür eine Studie der Fachzeitschrift „Environmental Science: Advances“, welche von der Royal Society of Chemistry herausgegeben wird. Diese Studie aus dem Jahr 2024 untersuchte, welchen Einfluss die ländliche Elektrifizierung auf die Lebensbedingungen der Haushalte in Tansania hat, wobei der Mbulu Distrikt als Fallstudie dient.

Die Studie untersuchte die Auswirkungen anhand von Daten aus 447 Haushalten in elektrifizierten und nicht-electrifizierten Regionen. Im Fokus standen Einkommen, Gesundheit, Bildung, Vermögensbesitz und Umweltaspekte (Matimbwa and Mng'ong'o, 2024, S. 1).

Nach der Elektrifizierung stieg das Haushaltseinkommen durchschnittlich um 45 %. Fast die Hälfte der Befragten verdiente nun monatlich über 1.000.000 TZS, was zuvor nur auf 6 % zutraf. Möglich wurde dies durch längere Geschäftszeiten und den Einsatz elektrischer Geräte, wie beispielsweise Getreidemöhlen oder Bewässerungspumpen, die neue Einkommensquellen eröffneten.

Auch die Gesundheitsversorgung verbesserte sich deutlich. 36 % der Haushalte konnten sich Medikamente leisten (vorher 13 %), und medizinische Einrichtungen profitierten von moderner Technik, besseren Lagerungsmöglichkeiten für Impfstoffe und Behandlungen nach Sonnenuntergang. Das gestiegene Einkommen erleichterte zudem den Zugang zu Krankenversicherungen.

Im Bildungsbereich besuchten nach der Elektrifizierung 31 % der Kinder Privatschulen (zuvor 11 %). Eltern konnten nun Lehrmaterialien und Transport finanzieren. Außerdem ermöglichte Strom Lernen auch nach Einbruch der Dunkelheit.

Die Lebensbedingungen verbesserten sich ebenfalls. Der Anteil der Haushalte in Lehmhäusern sank von 22 % auf 10 %. Viele konnten ihre Häuser renovieren und Produktionsgüter oder Haushaltsgeräte wie Kühlschränke anschaffen, was zusätzliche Einkommensmöglichkeiten schuf.

Die Ernährungssicherheit nahm zu, da mehr Haushalte Lebensmittel kaufen und moderne landwirtschaftliche Betriebsmittel nutzen konnten, was Schädlingsprobleme verringerte und die Nahrungsmittelproduktion steigerte.

Ökologische Vorteile zeigten sich durch die geringere Nutzung von Brennholz und Holzkohle, was zur Walderhaltung beiträgt. Elektrifizierung förderte moderne, nachhaltige Landwirtschaft, den Einsatz erneuerbarer Energien wie Solarstrom und reduzierte Kohlenstoffemissionen sowie die Luftverschmutzung in Innenräumen. Dies wiederum verbesserte Gesundheit, Sicherheit und Biodiversität.

Die Studie schlussfolgert, dass ländliche Elektrifizierung Einkommen, Gesundheit, Bildung und Lebensqualität deutlich verbessert und zudem positive Effekte auf Umweltmanagement und Nachhaltigkeit hat. Sie empfiehlt, die Ausweitung der Stromversorgung in ländlichen Gebieten weiter voranzutreiben (Matimbwa and Mng'ong'o, 2024).

7.2 Wahrnehmung und Erfahrung der lokalen Bevölkerung

Nachdem die empirisch belegten Vorteile der ländlichen Elektrifizierung für die Bevölkerung aufgezeigt wurden, ist es ebenso wichtig, die persönlichen Eindrücke und Erfahrungen der von diesem Projekt betroffenen Menschen in den Mittelpunkt zu rücken. Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse aus Gesprächen mit Anwohnerinnen und Anwohnern sowie Verantwortlichen dargestellt. So entsteht ein umfassendes Bild, das nicht nur messbare Verbesserungen, sondern auch die individuellen Wahrnehmungen und Herausforderungen der Menschen vor Ort widerspiegelt.

Die Interviews wurden mit Unterstützung eines Dolmetschers geführt, da nahezu alle Bewohner ausschließlich Suaheli oder Iraqw sprechen.

Perspektive der Dorfbewohner: Efrem Boniface Niima

Das ausführlichste Gespräch fand mit Herrn Efrem Boniface Niima (Abb. 34) statt, der sein gesamtes Leben in Kwermusl verbracht hat und die lokalen Gegebenheiten gut kennt. Nach seiner Auskunft zählt das Dorf etwa 300 Haushalte, von denen rund die Hälfte erst seit 2022/2023 im Rahmen eines REA-Programms an das öffentliche Stromnetz angeschlossen wurde. Die Elektrizität wird vorrangig für Beleuchtung, Fernseher und elektronische Geräte wie beispielsweise Mobiltelefone genutzt, während zum Kochen weiterhin Biomasse verwendet wird. Trotz des Fortschritts ist die Stromversorgung durch häufige und teils tägliche Ausfälle geprägt, deren Ursachen in Wartungsarbeiten, Erzeugungsengpässen oder Leitungsdefekten liegen. Besonders kritisch sind diese



Abbildung 34: Efrem Boniface Niima

Quelle: Eigene Aufnahme

Unterbrechungen in den Abendstunden, wenn Licht benötigt wird. Herr Niima sieht in einer stabilen und nachhaltigen Energieversorgung einen entscheidenden Schritt, um insbesondere die Versorgung kritischer Infrastrukturen wie Krankenhäusern zu gewährleisten. Er betonte zudem die Bereitschaft der Dorfgemeinschaft, sich aktiv am Bau des Kraftwerks zu beteiligen (Niima, 2025).

Bedeutung für das Gesundheitswesen: Krankenhaus Kwermusl

Das örtliche Krankenhaus (Abb. 35) ist in besonderem Maße auf eine verlässliche Energieversorgung angewiesen. Im Gespräch mit Dr. Peter Panga wurde deutlich, dass die Einrichtung unter den häufigen Stromausfällen leidet und daher improvisierte Lösungen nutzt. Ein spezieller Kühlschrank (Abb. 36) für Medikamente und Impfstoffe wird tagsüber mit Solarstrom betrieben und nachts durch Eisblöcke gekühlt, die während der Sonnenstunden produziert werden. Dieses System ist jedoch stark wetterabhängig und stößt bei längeren Schlechtwetterperioden an seine Grenzen.



Abbildung 36: Krankenhaus Kwermusl
Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 35: Spezialkühlschrank
Quelle: Eigene Aufnahme

Dr. Panga hob hervor, dass mit einer stabilen Stromversorgung auch anspruchsvollere medizinische Behandlungen vor Ort möglich wären, wodurch lange und beschwerliche Wege in entfernte Kliniken entfallen könnten. Zudem wären dann auch Behandlungen nach Einbruch der Dunkelheit möglich. Ein zuverlässiges Netz würde somit die gesundheitliche Versorgung der Bevölkerung signifikant verbessern (Panga, 2025).

Einbindung weiterer Dörfer: Swedish Amowa

Auch im benachbarten Swedish Amowa, vertreten durch die Dorfvorsteherin Edina Tadei und den Dorfvorsteher Paolo Gadiye, wurde die aktuelle Situation geschildert. Das Dorf umfasst etwa 249 Haushalte, von denen ebenfalls nur etwa die Hälfte über eine Stromanbindung verfügt. Die Bewohner sind ebenso von häufigen Ausfällen betroffen. Die Gesprächspartner betonten die Bereitschaft der Dorfgemeinschaft, das Projekt sowohl mit Arbeitskraft als auch mit Baumaterialien zu unterstützen. Da ein Großteil der geplanten Kraftwerksinfrastruktur auf der Seite von Swedish Amowa errichtet werden soll, ist eine enge Zusammenarbeit beider Dörfer vorgesehen, so dass beide von den Vorteilen profitieren können (Tadei and Gadiye, 2025).

Perspektive der Verwaltung: Mbulu Town Council

Auf Verwaltungsebene wurde das Projekt im Gespräch mit der Personalreferentin Kuluthum Seif thematisiert. Die Stadtverwaltung Mbulu (Abb. 37) unterstützt die Umsetzung des Vorhabens ausdrücklich. Darüber hinaus verfolgt die Verwaltung Pläne, den

nahegelegenen Stufenwasserfall touristisch zu erschließen und hat bereits erste Infrastrukturmaßnahmen, wie den Bau einer Informationshütte, initiiert. Der Ausbau der Zufahrtsstraßen zum Fluss, welcher von der Stadt durchgeführt werden soll, soll nicht nur den Tourismus fördern, sondern auch den Transport von Baumaterialien für das Kraftwerk erleichtern. Die Stadtverwaltung sieht zudem Potenzial für eine wirtschaftliche Belebung der Region durch die Kombination beider Projekte. Darüber hinaus wurde auf die geplante Installation einer Wasserpumpe für die Schule in Kwermusl hingewiesen, da dort derzeit kein fließendes Wasser zur Verfügung steht. Auch dieses Vorhaben ist auf eine verlässliche Stromversorgung angewiesen (Seif, 2025).



Abbildung 37: Verwaltungsgebäude Mbulu Distrikt

Zusammenfassende Bewertung

Die Interviews und der Kontakt zu den Menschen vor Ort verdeutlichen die zentrale Bedeutung der Mikro-Wasserkraftanlage für die Region. Die derzeitigen Herausforderungen, insbesondere die unzuverlässige Stromversorgung, beeinträchtigen sowohl die Lebensqualität der Bevölkerung als auch die Funktionsfähigkeit wichtiger Einrichtungen wie Krankenhäuser und Schulen. Die breite Unterstützung aus der Bevölkerung und von Seiten der Verwaltung unterstreicht das große Interesse an einer nachhaltigen Lösung. Eine störungsfrei arbeitende Mikro-Wasserkraftanlage würde nicht nur bestehende Probleme beseitigen, sondern auch die Grundlage für eine positive soziale und wirtschaftliche Entwicklung der Dörfer schaffen.

8 Ausblick

Nachdem die Ergebnisse und der aktuelle Projektstand umfassend dargestellt wurden, ergibt sich darauf aufbauend die Notwendigkeit, die weiteren Schritte entsprechend zu planen und umzusetzen. Sobald zusätzliche finanzielle Mittel zur Verfügung stehen, ist es essentiell, die begonnene Bauphase zügig wiederaufzunehmen, um Fortschritte im Gesamtprojekt zu erzielen.

Als nächsten Projektschritt empfiehlt Herr Ngoma die Vorbereitung der Projektfläche. Aufgrund des langen Baustopps ist diese erheblich zugewachsen und muss zunächst von der bestehenden Vegetation befreit werden, bevor weitere Bauarbeiten beginnen können. Im Anschluss sollen die zivilen Bauarbeiten wiederaufgenommen werden. Hierbei ist

vorgesehen, zunächst das Einlaufbauwerk zu errichten, für das vor allem lokal verfügbarer Zement benötigt wird. Ist dieses Fundament gelegt, folgen im Anschluss die Fertigstellung des Kanals und des Reservoirs, die eine zentrale Rolle für die Wasserspeicherung und -führung innerhalb der Anlage übernehmen. Im Anschluss an die Fertigstellung dieser grundlegenden Baustrukturen sind umfangreiche Tests sämtlicher Komponenten vorgesehen, um deren Funktionstüchtigkeit und Sicherheit zu gewährleisten. Erst danach schließt sich der Bau der Rohrleitungen und die Errichtung des Maschinenhauses an, in dem die technische Ausrüstung installiert wird. Die Anbindung an das Dorf durch Stromanschlüsse und Leitungen erfolgt abschließend, wenn sämtliche vorangegangenen Bau- und Installationsarbeiten erfolgreich beendet wurden. Dieses strukturierte Vorgehen gewährleistet einen reibungslosen Ablauf und legt die Basis für den erfolgreichen Betrieb der Mikro-Wasserkraftanlage (Ngoma, 2025).

9 Fazit

Abschließend werden in diesem Kapitel die Herausforderungen reflektiert, die sowohl während des Aufenthalts in Tansania als auch im Verlauf der inhaltlichen Auseinandersetzung mit dem Projekt deutlich geworden sind. Im Anschluss erfolgt eine zusammenfassende Betrachtung der erzielten Ergebnisse der Arbeit.

9.1 Herausforderungen

Trotz der sehr umfassenden und professionellen Projektplanung stehen die Verantwortlichen weiterhin vor bedeutenden Herausforderungen. Eine zentrale Problematik stellt der Transport großer Anlagenteile, wie der Turbine und dem Generator zur Projektfläche dar. Insbesondere die teils schwer befahrbaren Wege, wie bereits erläutert, verstärkt durch nasse Witterungsbedingungen, erfordern den Einsatz von Spezialfahrzeugen. Diese stellen wiederum besondere Anforderungen an die Zugänglichkeit des Geländes. Die Stadtverwaltung in Mbulu hat im Interview bereits angekündigt, die entsprechenden Straßen auszubauen. Es bleibt jedoch entscheidend, mit der Stadtverwaltung im Dialog zu bleiben, um rechtzeitig abzuklären, ob die Baumaßnahmen vor dem geplanten Transport abgeschlossen sein werden.

Ein weiteres zentrales Thema ist die offene Finanzierung. Für die Fertigstellung fehlt nach wie vor ein erheblicher Teil der kalkulierten Mittel. Zwar befindet sich das ATC in vielversprechenden Verhandlungen mit der REA bezüglich zusätzlicher Fördermittel, doch ist davon auszugehen, dass diese allein den Bedarf nicht vollständig decken werden. Es wurden daher ergänzende Strategien mit Herrn Ngoma diskutiert, wie beispielsweise die Möglichkeit, gebrauchte Bauteile von in Deutschland oder Europa betriebenen Wasserkraftanlagen zu günstigeren Konditionen zu erwerben oder diese vor Ort

aufzubereiten. Diese Option könnte nicht nur Kosten für Neuteile reduzieren, sondern auch einen nachhaltigen Beitrag leisten. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, gezielt nach deutschen und europäischen Organisationen oder Unternehmen zu suchen, die thematisch passende Projekte unterstützen und potenziell als Fördernde gewonnen werden können.

Selbstverständlich ist es von ebenso großer Bedeutung, die bei der Umsetzung auftretenden Herausforderungen frühzeitig zu identifizieren und konstruktiv zu adressieren. Das Aufkommen solcher Beobachtungen ist keineswegs als negativ zu bewerten, sondern stellt vielmehr einen notwendigen ersten Schritt im Lösungsprozess dar. Nun gilt es, diese Probleme aktiv anzugehen sowie die erarbeiteten Lösungsansätze kritisch zu reflektieren und zu vergleichen.

9.2 Zusammenfassende Einordnung der Ergebnisse

Nichtsdestotrotz wurde das zu Beginn formulierte Hauptziel der Arbeit, nämlich alle Beteiligten auf einen einheitlichen Informationsstand zu bringen und ein möglichst detailliertes Bild der Rahmenbedingungen zu vermitteln, eindeutig erreicht. Die präzise Analyse der Ergebnisse von Herrn Ngoma macht deutlich, dass die Mikro-Wasserkraftanlage aus technischer und hydrologischer Perspektive bereits sorgfältig durchdacht ist und das zugrundeliegende Konzept als tragfähig einzuschätzen ist. Die erstellten 3D-Modelle und das erarbeitete Überwachungskamera-Konzept bieten dabei einen erheblichen Mehrwert, indem sie eine passgenaue Anpassung zukünftiger Planungen an die örtlichen Gegebenheiten ermöglichen und eine kontinuierliche Überwachung der Projektfläche während der weiteren Bauphasen erlauben. Dies erhöht die Transparenz und schafft allen Beteiligten eine fundierte Grundlage, um effizientere und schnellere Entscheidungen zu treffen.

Auch die umfassende Kostenplanung wurde sorgfältig geprüft, um realistisch und nachvollziehbar die noch bestehenden Finanzierungslücken darzustellen. Die transparente Aufgliederung der Kostenstruktur zeigt, dass alle relevanten Komponenten berücksichtigt wurden. Das Projekt wurde somit aus technischer, wirtschaftlicher und sozialer Sicht ganzheitlich beleuchtet und umfassend dargestellt. Außerdem wird durch die Arbeit ersichtlich, unter welchen Bedingungen die Menschen vor Ort leben und welchen erheblichen Mehrwert eine erfolgreiche Umsetzung für ihre Lebensqualität und Zukunftsaussichten generieren könnte. Zudem eröffnet die Anlage dem ATC neue Perspektiven für eine praxisnahe, anschauliche Ausbildung von Fachkräften, was der Verbreitung des notwendigen Know-hows in der Region und darüber hinaus eine wertvolle Grundlage bietet.

Erklärung

Im Rahmen der Erstellung dieser Bachelorarbeit wurde das KI-gestützte Tool Perplexity zur sprachlichen Überarbeitung der Textbausteine eingesetzt. Die Unterstützung bezog sich ausschließlich auf orthographische, grammatikalische und stilistische Korrekturen, um die sprachliche Klarheit und Lesbarkeit zu verbessern.

Die inhaltliche Ausarbeitung der Arbeit erfolgte vollständig eigenständig. Der Einsatz des KI-Tools hatte keinerlei Einfluss auf die fachliche Substanz oder die methodische Durchführung der Arbeit. Soweit ich auf fremde Materialien, Texte oder Gedankengänge zurückgegriffen habe, enthalten meine Ausführungen vollständige und eindeutige Verweise auf die Urheber und Quellen. Alle weiteren Inhalte der vorgelegten Arbeit stammen von mir im urheberrechtlichen Sinn, soweit keine Verweise und Zitate erfolgen. Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn die vorstehende Erklärung sich als unrichtig erweist.

Anhang A: Produktblatt XEGA

Technische Spezifikationen

Modellnummer	Produktabmessungen	
	XG-02 3G/4G/LTE	18 x 17 x 13 cm; 1,37 Kilogramm
Stromversorgung	5W Solarmodul mit 9000mAh Batteriekapazität. Unterstützt bewegungsgesteuerte Aufzeichnung, aber NICHT 24/7 ununterbrochene Aufzeichnung.	Alarm
		Senden Sie eine Warnmeldung oder einen Warnruf über Ubox app. Lichtwarnung kann eingeschaltet werden
Video	2K-3MP HD. Live-Ansicht. Farb- und Infrarot-Nachtsicht.	System
		Android/iOS-Geräte anstelle von PC und NVR.
Installationsvorschlag	Besser installiert werden 8,2-9,8ft (2,5-3m) aus dem Boden für eine bessere Sicht und Bewegung Alarm auslösen.	Speichermodus
		Sie unterstützt bis zu einer 128 GB SD-Karte (nicht im Lieferumfang enthalten) und enthält eine kostenfreie 30-Tage Testzeit des Cloud-Speichers.
Betriebstemperatur	-10°C to 60°C (-14°F to 140°F)	Wasserdichtigkeit
		IP66
Manuelle Drehung	Die kamera kann bewegte Objekte nicht automatisch verfolgen, aber sie kann über die Ubox App um 355° horizontal und 95° vertikal schwenken und neigen.	Gesichtsfeld
		Horizontal: 355°; Vertikal: 95°
Verbinden	3G/4G/LTE: Sie können SIM-Karten von Deutsche Telekom, AG, Vodafone, O2, SFR, Orange, Bouygues, TIM, etc. verwenden. (Im Lieferumfang ist eine eiot-SIM-Karte enthalten)	

Anhang B: Gesamtkostenaufstellung

ARUSHA TECHNICAL COLLEGE							
REA MBULU PROJECT							
PROJECT COST MATRIX							
SN	Milestone	Indicator	Activities	BoQ	Unit	Unit Cost	Total Cost
1	community Meeting conducted	village General Assembly Qorum reached (150 villagers).180 villagers attended	communication with village leaders	9	hrs	5.000	45.000
			Meeting Venue Prepared	2	hrs	5.000	10.000
			Meeting Agenda prepared	3	hrs	5.000	15.000
			Transportation to the meeting place	4	days	200.000	800.000
			Invitation of General Assembly Meeting Members	4	men days	50.000	200.000
		General assembly meeting minutes taken	Registration of Participants	1	Register and pen	5.000	5.000
			Secretary Selection/Apointment				-
			Minutes taken	1	Notebook and Pen	3.000	3.000
			Stationery Procurement	1	Rim	10.000	10.000
			Typing and Printing of Minutes	20	Pages	1.000	20.000
			Minutes Dissemination	1	Postage	10.000	10.000
		Picture Taken	Camera	1	Hiring	30.000	30.000
			Photographing	10	hrs	5.000	50.000
			Picture Selection and Storage	1	hr	5.000	5.000
			Picture Printing	3	hrs	5.000	15.000
		MoU Signed	Discussion of MoU (MTC, ATC and Village Council)	1	Refreshment, Meals and travel		-
			Transport	4	days	200.000	800.000
			Travelling Allowance	28	days	100.000	2.800.000
			Printing	4	Copies	1.000	4.000

			Signing Ceremony	2	Refreshment	50.000	100.000
			MoU Dissemination	1	Postage	10.000	10.000
2	Land and Statutory Documents Acquired	List of Village and Town Council Leaders	Printing/photocoping	1	Printing	5.000	5.000
		Joint Meeting Conducted (ATC, MTC and Village Leaders)	Communication	3	hrs	5.000	15.000
			Site Visit and Allocation				-
			Registration	2	Notebook and Pen	5.000	10.000
			Photographing	10	hrs	5.000	50.000
			Chairperson and Secretary Selection				-
			Meeting Minutes Taken	1	Typing and Printing	10.000	10.000
		Site Allocated	Travelling Allowance	20	Days	100.000	2.000.000
			Transport	4	Days	200.000	800.000
			Site Clearance	1	5 Matchet, 3 Axes, 5 Picks, 3 Spades	200.000	200.000
			GPS Procurement	2	Hiring	30.000	60.000
			Data Presentation/Verification and Uploading	3	hrs	5.000	15.000
3	Site Layout and Drawing (Site Map/Plan Development/ Detailed Drawing of site)	Site Map	Data Collection	2	Men days	40.000	80.000
			Drawing of Map	10	Men days	40.000	400.000
		Plan Develop	Site Plan Development	10	Men days	40.000	400.000
		Topography	Surveying	2	Men days	40.000	80.000
		Hydrology	Data Collection	2	Men days	40.000	80.000

		Geotechnical Studies	Data Analysis	10	Men days	40.000	400.000
			Data Collection	2	Men days	40.000	80.000
			Data Analysis	10	Men days	40.000	400.000
		Materials Availability	Civil	1	Men day	40.000	40.000
			Mechanical	1	Men day	40.000	40.000
			Electrical	1	Men day	40.000	40.000
			IT	1	Men day	40.000	40.000
4	Hydroelectric Power System Assesement	Water Intake	Develop Assessment Criteria	2	Men day	40.000	80.000
		Water Canal	Develop Assessment Criteria	2	Men day	40.000	80.000
		Forebay	Develop Assessment Criteria	2	Men day	40.000	80.000
		Penstock	Develop Assessment Criteria	2	Men day	40.000	80.000
		Power House	Develop Assessment Criteria	2	Men day	40.000	80.000
		Tail Race	Develop Assessment Criteria	2	Men day	40.000	80.000
		Staircase to the Power House	Develop Assessment Criteria	2	Men day	40.000	80.000
5	Man Power Requirement	Site Engineer Identification	Develop ToR	1	Men day	40.000	40.000
			Advitize the Position	1	Advert		-
			Prepare the Interview Question	2	hrs	5.000	10.000
			Assessment Score Criteria	1	Men day	40.000	40.000
			Conduct Interview	1	refreshment, stationery and printing		-
			Assessing Interview	1	man day	40.000	40.000
			Candidate Selection				-
		Artisans Hired	Develop ToR	1	Men day	40.000	40.000
			Advitize the Position	1	Advert		-
			Prepare the Interview Question	2	hrs	5.000	10.000

			Assessment Score Criteria	1	Men day	40.000	40.000
			Conduct Interview	1	refreshment, stationery and printing		-
			Assessing Interview	1	man day	40.000	40.000
			Candidate Selection				-
		2 Community Liason Person Selected	Develop ToR	1	Men day	40.000	40.000
			Advitize the Position	1	Advert		-
			Prepare the Interview Question	2	hrs	5.000	10.000
			Assessment Score Criteria	1	Men day	40.000	40.000
			Conduct Interview	1	refreshment, stationery and printing		-
			Assessing Interview	1	man day	40.000	40.000
			Candidate Selection				-
6	Water Use Permit	certificate of water use permit	Measurement of quacity of water and certificate award	1	Trip	5.200.000	5.200.000
7	ESIA	certificate of Environmental Impact Assesement	stakeholder Consultation	100	men Day	40.000	4.000.000
			Numeration of Enviromental Expert team	2	expertize	4.000.000	8.000.000
			Consutants from NEMC	1	trip	5.200.000	5.200.000
8	Tools, Equipment and Construction Materials Acquired	Two Computer Tablet Bought	elaborate the procurement procedures relevant to REA/Government	1	hrs	5.000	5.000
		5 Hedge Harmer Bought	Identify brand for quality controlling	3	hrs	5.000	15.000
		5 Heavy Chisel Bought	Preparation of Document for Procurement	3	hrs	5.000	15.000

		5 shovel bought	Inspection of procured materials/equipment/ documents	2	hrs	5.000	10.000
			Identify Storage Facilities	1	hrs	5.000	5.000
		D6/7 hired	Preparation of Bid/tender	2	hrs	5.000	10.000
		Concrete mixer Hired	Bid Evaluation	2	hrs	5.000	10.000
			Contract Preparation	2	hrs	5.000	10.000
9	Monitoring and Evaluation Plan	Preparation of Monitoring Plan	Preparation of Monitoring Plan	2	men days		-
		Communication	Conduct weekly progress/planning meeting	20	Lumpsum		-
			Site Meeting/Internal Evaluation	4	trip		-
			online Meeting	20	hrs	5.000	100.000
			WhatsApp Communication	20	hrs	5.000	100.000
			Daily site Activities Progress through camera installed in the site	2			-
			Preparing reporting/ planning template (REA)	2	man day	40.000	80.000
			Filling the Report	1	man day	40.000	40.000
10	Civil Work	Casual labour	Loading and Off loading materials	60	men days	40.000	2.400.000
			clearing bushes	15	men days	40.000	600.000
			Supporting labour to tech engineering	160	men days	40.000	6.400.000
			Digging of Canals	20	men days	40.000	800.000
			work quality supervisors	180	men days	60.000	10.800.000
		Technicians	Prepare formwork	40	men days	50.000	2.000.000
			construction of open channel	50	men days	50.000	2.500.000

			Preparation concrete with proper ratios	80	men days	50.000	4.000.000
			construction of forebay	50	men days	50.000	2.500.000
			construction of penstock support	50	men days	50.000	2.500.000
		Steel work	Arranging steel bars according to structural drawings	120	men days	50.000	6.000.000
		Site Engineer	suppervission of site works	80	men days	180.000	14.400.000
		Construction Materials	Sand	120	cubic meter	90.000	10.800.000
			Aggregate	180	cubic meter	120.000	21.600.000
			Brick	6000	pcs	3.000	18.000.000
			steel bars	180	tonnes	360.000	64.800.000
			Cement 42.5 N	2000	bags	25.000	50.000.000
11	Electromechanical Systems	Personel	Carrying penstock	100	men days	40.000	4.000.000
			Technician	150	men days	50.000	7.500.000
			Electromechanical supervision	85	men days	120.000	10.200.000
		Electromechanical Installation	Electromechanical machine 65 kW	1	pc	22.500.000	22.500.000
			trasporting turbine from Arusha to Mbulu	1	truck	5.000.000	5.000.000
			Butterfly	1	pc	4.000.000	4.000.000
			Belt drive with turbine shaft coupling	1	pc	8.570.000	8.570.000
			Penstock 120m 350mm diameter	120	m	325.000	39.000.000
12	Mechanica Work	Fabrication of Gates	fabrication of standard gates	3	pc	15.780.000	47.340.000
		Construction of bridge	Bridge which will be used workers and people leaving around the project	1	PC	27.890.000	27.890.000

		Casual labour	Assisting technical Personnel	60	Men Day	40.000	2.400.000
		Technicians	Performing Construction work	70	Men Day	70.000	4.900.000
		Mechanical Engineer	Supervision work	40	Men Day	120.000	4.800.000
		Transport	Transporting materials to site	1	Trip	4.200.000	4.200.000
13	Transmission	Transformers	procurement of 100kVA	2	pc	25.000.000	50.000.000
		Poles	poles for carrying transmission wire to the Kwermusl Village	154	pcs	354.000	54.516.000
		Wire	16 sq mm wire with insullation	19800	m	7.500	148.500.000
		Earth wire	10 sq mm steel conductor	6300	m	3.200	20.160.000
		Installation Accessories	Insulators, bolts and cross arm	1	various	44.900.000	44.900.000
		Transportation	Transporting materials to site	2	Trips	4.200.000	8.400.000
		Casual labour	Digging holes, loading, Off loading	250	Men day	40.000	10.000.000
		Technicians	Erecting poles, fixing cross arm, fixing insulators and installing wires	150	men day	50.000	7.500.000
		Electrical Engineer	Supervision of Installation work	60	Men day	120.000	7.200.000

Anhang C: Interview Ngoma

Interview mit Daniel Herman Ngoma am 22.05.2025

1. **Wissen Sie schon über alle Parameter der Anlage Bescheid?**

Antwort:

Ja, die Wasserkraftanlage ist aus technischer Sicht bereits sehr detailliert und umfassend durchgeplant. Alle relevanten Parameter wie beispielsweise der Wasserdurchfluss und die Geländehöhen sind bekannt und in der Auslegung berücksichtigt.

2. **Gibt es technische Probleme beim Bau des Wasserkraftwerks?**

Antwort:

Nein, aber es gab technische Herausforderungen bezüglich der Druckleitungsstrecke zur Turbine. Einige Felsen lagen im geplanten Verlauf der Leitung und mussten durch gezielte Sprengarbeiten entfernt werden. Diese zusätzlichen Arbeiten trieben die Gesamtkosten weiter in die Höhe. Des Weiteren ist mit zusätzlichen Kosten zu rechnen, da die Projektfläche aktuell stark zugewachsen ist und diese für den Baubeginn zuvor noch dementsprechend präpariert werden muss.

3. **Wird das von Ihnen entwickelte Wasserstoff-Energiespeichersystem umgesetzt?**

Antwort:

Nein, die Entwicklung dieses Wasserstoff-Energiespeichersystems wird nicht Bestandteil der fertigen Anlage werden. Das war hauptsächlich ein innovativer Bestandteil seiner Arbeit, der damals vom Doktorvater gefordert wurde. Diese zusätzliche Komponente ist durch den Anschluss an das öffentliche Stromnetz ohnehin nicht mehr notwendig.

4. **Welche Leistung soll erzielt werden?**

Antwort:

Geplant ist eine elektrische Leistung von etwa 75 kW. Die Anlage nutzt einen Höhenunterschied von 25 m.

5. **Wie viele Haushalte sollen damit versorgt werden?**

Antwort:

Nach Berechnungen könnten etwa 234 Haushalte mit Strom versorgt werden. Diese Zahl dient allerdings nur als Richtwert, um die Größenordnung zu verdeutlichen. Es wäre zu kostenintensiv, jedes einzelne Haus direkt anzuschließen. Des Weiteren ist das nach Anbindung der Dörfer an das öffentliche Stromnetz auch nicht mehr von allzu großer Relevanz. Der aktuelle Plan sieht vor, den Strom ins öffentliche Netz einzuspeisen, um das regionale Stromnetz zu stabilisieren oder größere Abnehmer wie Schulen und Krankenhäuser direkt zu versorgen.

6. **Ist kritische Infrastruktur wie das Krankenhaus auf den Betrieb angewiesen?**

Antwort:

Ja, insbesondere das Krankenhaus ist auf eine zuverlässige Stromversorgung angewiesen, da dort zunehmend mehr medizinisches Equipment eingesetzt wird. Aktuell erfolgt die Stromversorgung noch über Generatoren, sodass durch das Kraftwerk künftig erhebliche Kraftstoffkosten eingespart werden könnten.

7. **Sind die hydrologischen Daten noch aktuell?**

Antwort:

Ja, die Daten sind noch aktuell. Es besteht kein Grund die Messungen erneut durchführen zu müssen.

8. **Unterscheidet sich der Betrieb bei Regenzeit zur Nicht-Regenzeit?**

Antwort:

Nein, grundsätzlich unterscheidet sich der Betrieb nicht zwischen Regen- und Trockenzeit. Sollte es jedoch in der Regenzeit zu Überflutungen kommen, verfügt die Anlage über spezielle Schutzmechanismen, die eine Überflutung verhindern. In dieser Hinsicht bestehen keine besonderen Risiken.

9. **Gibt es Fischpopulationen, die berücksichtigt werden müssen?**

Antwort:

Im Fluss gibt es keine Fischpopulation, die berücksichtigt werden müssen.

10. **Was fehlt noch zur Fertigstellung?**

Antwort:

Bisher wurde nur ein kleiner Kanal gebaut. Es fehlen noch der Generator und die gesamte elektrische Ausrüstung. Zusätzlich wird ein Sandfilter benötigt, um den Kanal sauber zu halten. Am Ende des Kanals soll ein sogenanntes Reservoir errichtet werden, um einen konstanten Wasserdurchfluss zur Turbine zu gewährleisten. Außerdem muss das Turbinenhäuschen selbst und zum Schluss natürlich auch noch die Stromleitung zum Dorf gebaut werden.

11. **Was muss Ihrer Meinung nach als Nächstes geschehen? Wie sieht der weitere Ablauf aus?**

Antwort:

Als nächstes stehen die zivilen Bauarbeiten an, insbesondere der Bau des Einlaufbauwerks. Dafür wird vor allem Zement benötigt, der vor Ort verfügbar ist. Anschließend folgen der Kanal und das Reservoir. Nach deren Fertigstellung werden alle Komponenten getestet. Erst danach werden die Rohrleitungen und das Maschinenhaus gebaut. Die Anbindung an das Dorf erfolgt erst, wenn die anderen Arbeiten abgeschlossen sind.

12. **Wie wollen Sie den Strom zum Dorf bringen? Gibt es bereits Pläne für die Stromleitungen?**

Antwort:

Bisher existieren noch keine Stromleitungen. Das Dorf liegt etwa 6 km entfernt, das Gelände ist hügelig, aber die Verlegung der Leitungen ist grundsätzlich machbar.

13. **Haben Sie schon alle Gelder von der REA erhalten?**

Antwort:

Nein, aktuell laufen noch Verhandlungen, um weitere finanzielle Unterstützung zu erhalten. Diese werden jedoch voraussichtlich nicht für eine vollständige Umsetzung ausreichen, weshalb man nach weiteren Investoren auf der Suche sei.

Literaturverzeichnis

- [1] African Development Bank Group, 2025. Tanzania - National Energy Compact.
- [2] AHK Services Eastern Africa Ltd., 2024. Tanzania.
- [3] ATC, n. d. Arusha Technical College [WWW Document]. URL <https://www.atc.ac.tz/about> [Zugriff am 21.05.2025].
- [4] Athumani, H., 2025. Interview TANESCO [28.05.2025].
- [5] Dittmeyer, H., Pflomm, G., McKenzie, S., Ringo, P., Zittlau, F., 2024. Tanzania: Dezentrale Energieversorgung mit erneuerbaren Energien.
- [6] Elsewedy Electric, 2025. Milestone Reached with Full Completion of Julius Nyerere Hydropower Plant in Tanzania - Elsewedy Website [WWW Document]. URL <https://www.elsewedyelectric.com/en/page?v=News+Room&i=Milestone+Reached+with+Full+Completion+of+Julius+Nyerere+Hydropower+Plant+in+Tanzania> [Zugriff am 14.07.25].
- [7] Europäische Kommission, 2025. InforEuro – Wechselkurs des Euro [WWW Document]. URL https://commission.europa.eu/funding-tenders/procedures-guidelines-tenders/information-contractors-and-beneficiaries/exchange-rate-inforeuro_de [Zugriff am 16.07.2025].
- [8] Jawset Visual Computing, 2025. Capturing Guidelines [WWW Document]. URL <https://www.jawset.com/docs/d/Postshot+User+Guide/Capturing+Guidelines> [Zugriff am 06.07.2025].
- [9] Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkühler, T., Drettakis, G., 2023. [2308.04079] 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering.
- [10] Kichonge, B., 2018. The Status and Future Prospects of Hydropower for Sustainable Water and Energy Development in Tanzania. Journal of Renewable Energy 2018, 6570358. <https://doi.org/10.1155/2018/6570358>
- [11] Matimbwa, H., Mng'ong'o, M., 2024. Household welfare improvement in the Mbulu district of Tanzania: does rural electrification matter? Environmental Science: Advances 3, 1586–1597. <https://doi.org/10.1039/D4VA00259H>
- [12] Ngoma, D.H., 2025. Experteninterview technische Planung [22.05.2025].
- [13] Ngoma, D.H., 2020. Design and development of a community based micro-hydro turbine system with hydrogen energy storage to supply electricity for off-grid rural areas in Tanzania (PhD Thesis). Newcastle University.
- [14] Niima, E.B., 2025. Interview Bewohner [26.05.2025].
- [15] Panga, P., 2025. Interview Krankenhaus [27.05.2025].

- [16] Rural Energy Agency, 2025. REA [WWW Document]. URL <https://rea.go.tz/About-Us2> [Zugriff am 21.05.2025].
- [17] Seif, K., 2025. Interview Mbulu Town Council [28.05.2025].
- [18] SuperSplat [WWW Document], 2025. URL <https://playcanvas.com/supersplat/editor> [Zugriff am 25.07.2025].
- [19] Tadei, E., Gadiye, P., 2025. Interview Dorfverwaltung Swedish Amowa [27.05.2025].
- [20] Tapia Córdoba, A., Gutiérrez Reina, D., Millán Gata, P., 2019. An Evolutionary Computational Approach for Designing Micro Hydro Power Plants. *Energies* 12, 878. <https://doi.org/10.3390/en12050878>
- [21] Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V., n. d. [WWW Document]. Verein zur Förderung des internationalen Wissensaustauschs e.V. URL <https://www.knowledgexchange.org/> [Zugriff am 21.05.2025].
- [22] Wagner, H.-J., Mathur, J., 2011. Introduction to Hydro Energy Systems: Basics, Technology and Operation, Green Energy and Technology. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20709-9>
- [23] Wikipedia [WWW Document], 2025. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Tansania> [Zugriff am 29.06.2025]
- [24] XEGA [WWW Document], 2025. URL <https://de.xegatech.com/products/xega-02-aussen-solar-3mp-ptz-ueberwachungskamera-akku?srsId=AfmBOorfJr03aSHRoiBNFpF931IEgo1ss2UpAQBcw2BenDbqyYu6hBSV> [Zugriff am 05.07.2025]