

## **Titel des Vorhabens /AZ/ Förderzeitraum**

Solare Abwasseraufbereitung und Wiederverwendung für Krankenhäuser in Uganda am Beispiel des Lubaga Krankenhauses in Kampala (Reuse4Hos)

**DBU-AZ:** 35572

**Förderzeitraum:** Oktober 2020 – April 2022

## **Projektpartner**

### **1) Koordination**

Hochschule Karlsruhe (HKA),  
Center of Applied Research (CAR), Moltkestr. 30,  
76133 Karlsruhe  
Prof. Dr. Jan Hoinkis  
T +49 721 / 925 2359, F +49 721 / 925 2361, M +49 157 /  
753 573 25  
jan.hoinkis@hs-karlsruhe.de

Hochschule Karlsruhe  
University of  
Applied Sciences



### **2) Equator Solar Systems Ltd. (EQS)**

Ntinda-Kisaasi Road, Kampala  
Fabian Dold  
DE: +49 151 / 270 977 59, UG: +256 782 / 815 999  
fabian@euatorsolar.co.ug

EQUATORSOLAR

### **3) Uganda Martyrs Hospital Lubaga (HL)**

Mutesa Road, Kampala  
Dr. Andrew M. Ssekitooleko  
M: +256 776 / 200 363  
andrew.ssekitooleko@lubagahospital.org



### **4) Makerere University (MAK)**

Department of Chemistry  
College of Engineering, Design, Art and Technology (CEDAT)  
Wandegeya, Kampala



## **Zusammenfassung**

Krankenhäuser sind die Hauptquelle für Arzneimittelrückstände in kommunalen Kläranlagen ostafrikanischer Städte wie Kampala in Uganda. Im Rahmen des Projekts „Reuse4Hos“ wurde eine robuste und kostengünstige Pilotanlage entwickelt - ein solar betriebener Membranbioreaktor (MBR) mit nachgeschaltetem Aktivkohlefilter (engl. Granular Activated Carbon, GAC) zur Behandlung von Krankenhausabwässern. Die MBR-GAC-Pilotanlage besteht aus einem 25 m<sup>2</sup> großen Ultrafiltrationsmodul, 100 kg GAC Filter, 20 PV Solarmodulen und einem Superkondensator-Energiespeicher zur Erzeugung von Brauch- und Nutzwasser für Toilettenspülung, Reinigung und Bewässerung. Die Pilotanlage arbeitet mit PV Energie mit einem Autonomiegrad von ca. 43%. Stromausfälle von bis zu einer Stunde konnten durch den Energiespeicher überbrückt werden, während Stromausfälle von mehr als einer Stunde durch das PV Stromnetz des Krankenhauses und einem Dieselgenerator abgedeckt wurden. Die Pilotanlage produzierte einen durchschnittlichen Permeatfluss von 10 - 15 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> mit einer TOC (eng, Total Organic Carbon)-Entfernung von 50 %. Es wurde eine Nitrifikation von 80 % und eine Denitrifikation von 20 % zu erreicht. Zusätzlich wurde die Elimination von fünf typischen Mikroverunreinigungen untersucht. Die lange Verweilzeit im MBR führte zu einer biologischen Elimination von 75% von Diclofenac. Die Eliminationsleistung des GAC-Filters fiel von anfänglich 90% (78 BV) nach 4.290 BV auf ca. 25 % ab. Die Pilotanlage ist skalierbar und kann an anderer Stelle in Subsahara-Afrika effizient und kostengünstig eingesetzt werden.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	2
1. Aktuelle Problemstellung und Stand des Wissens und der Technik.....	4
2. Eigene Vorarbeiten und bisherige Aktivitäten auf dem Gebiet .....	4
3. Gegenstand und Ziele des Projekts .....	5
4. Materialien und Methoden .....	6
4.1 Standort der Pilotanlage .....	6
4.2 Pilotanlage.....	7
5. Pilotierung .....	10
5.1 Chemische Parameter .....	10
5.2 Biologische Parameter .....	11
5.3 Spurenstoffentfernung.....	12
5.4 PV Energiesystem .....	13
6. Kostenkalkulation.....	14
7. Zusammenfassung.....	15
8. Referenzen.....	16
9. Verbreitung der Ergebnisse .....	17
10. Modellcharakter und Weiterführung des vorgesehenen Lösungsweges .....	17

## **1. Aktuelle Problemstellung und Stand des Wissens und der Technik**

Krankenhausabwässer sind als besonders problematisch anzusehen, da sie im Vergleich zu kommunalen Abwässern deutlich höher mit Arzneimittelrückständen, d.h. Arzneistoffen und deren Metaboliten belastet sind. Viele Arzneimittelrückstände weisen eine hohe Persistenz auf und werden daher in kommunalen Kläranlagen meist nicht vollständig abgebaut und können sich in der Umwelt anreichern [1]. Zudem sind Krankenhausabwässer stärker mit multiresistenten Keimen belastet als kommunale Abwässer und stellen einen wichtigen Eintrag dieser Keime in die Umwelt dar [2]. Zur Entfernung von Arzneimittelrückständen wurden in Deutschland und in der Schweiz bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt und auch in der sogenannten vierten Reinigungsstufe zur Behandlung des Auslaufs von kommunalen Kläranlagen umgesetzt. Dabei haben sich im Rahmen einer Kosten/Nutzenanalyse insbesondere die Aktivkohlebehandlung und Ozonierung durchgesetzt [3].

In Kampala, der Hauptstadt Ugandas, werden derzeit nur etwa 7% der Abwässer in einer kommunalen Behandlungsanlage behandelt. Wasseranalysen haben dabei insbesondere hohe Konzentrationen von pharmazeutischen Rückständen (Carbamazepin, Trimethoprim etc.) in den offenen Abwasserkanälen der Stadt festgestellt [4]. Da in Kampala häufig Wasser/Abwasser Gemische zur Bewässerung verwendet werden, haben pharmazeutische Rückstände bereits die Nahrungskette erreicht [4]. Krankenhäuser sind als Hauptquelle für pharmazeutische Rückstände bekannt, wobei die Abwässer typischerweise in kommunalen Kläranlagen mitbehandelt werden [5].

Die unzureichende Behandlung von Krankenhausabwässern wurde auch bereits von der Kampala Capital City Authority als wachsendes Problem erkannt und städtische Krankenhäuser werden verstärkt kontrolliert. Dem Lubaga Krankenhaus drohte bereits in der Vergangenheit der Entzug der Lizenz, da die geforderten Grenzwerte nicht eingehalten werden konnten. Ländliche Krankenhäuser hingegen verfügen oft über keine adäquate Abwasserbehandlung.

Die Gesamtzahl der Krankenhäuser in Uganda (öffentliche und private) wird vom Ministry of Health mit 155 angegeben [6]. Das Lubaga Krankenhaus in Kampala, Uganda wurde 1899 von Missionsschwestern gegründet und ist das älteste katholische Krankenhaus in Kampala. Es befindet sich im Besitz der römisch-katholischen Erzdiözese Kampala und ist vom Uganda Catholic Medical Bureau akkreditiert.

Das Abwasser des Krankenhauses wird dezentral auf einfache Weise mittels Absetzbecken und einer Pflanzenkläranlage gereinigt und in einen Entwässerungsgraben eingeleitet. Das in den Absetzbecken entstehende Biogas wird in der Küche zum Kochen verwendet. Die Abwassermenge wird auf 300 m<sup>3</sup> pro Monat geschätzt.

## **2. Eigene Vorarbeiten und bisherige Aktivitäten auf dem Gebiet**

Die Forschungsgruppe von Prof. Hoinkis an der Hochschule Karlsruhe beschäftigt sich schon seit vielen Jahren mit der Reinigung und Wiederverwendung von Abwasser mittels der Membranbioreaktor (MBR) Technologie (siehe z.B. [7]). Im Rahmen des von der EU geförderten Projektes „Integrated aquaculture based on sustainable water recirculating system for the Victoria Lake Basin [8] hatten sich unter der Koordination von Prof. Hoinkis insgesamt 10 Partner aus Europa und Afrika zusammengeschlossen und erfolgreich ein nachhaltiges, kombiniertes Wasserreinigungssystem für die Fischzucht in der Region des Viktoriasees in Kenia entwickelt. Das Reinigungssystem basiert auf einem MBR mit getauchten plattenförmigen Membranen (Kapazität ca. 4 m<sup>3</sup>/Tag). Der MBR wird mit häuslichem Abwasser der Stadt Kisumu gespeist und es wird so aufbereitet, dass es für die Fischzucht (Tilapia) und zur Bewässerung verwendet werden kann. In diesem

Projekt hat die Firma EQS, Kampala, Uganda eine PV Anlage mit einer Leistung von 14 kW<sub>p</sub> zur Energieversorgung des MBR und der Fischtanks geliefert und in das Gesamtsystem integriert.

Das von deutscher Seite in Uganda gegründete Unternehmen EQS ist spezialisiert auf produktive Solaranwendungen mit einem Fokus auf kritische Infrastruktur, wie z.B. Krankenhäuser. Die Vision von EQS ist ein ganzheitliches und nachhaltiges Energiekonzept für das Krankenhaus der Zukunft. Neben Beleuchtung und Betrieb medizinischer Geräte zeigen sich hierbei die Bereitstellung von Trinkwasser und die Behandlung von Abwasser als elementare Bereiche. EQS arbeitet dabei eng mit dem Uganda Catholic Medical Bureau zusammen, der Dachorganisation der Vereinigung katholischer Krankenhäuser, welcher 32 Krankenhäuser angehören [9]. Neben dem Lubaga Krankenhaus hat EQS auch bereits die ländlichen Krankenhäuser in Naggalama und Buluba dabei unterstützt, erste Schritte in Richtung einer grünen und unabhängigen Energieversorgung durch den Einsatz von Energieeffizienz und Solar PV Lösungen zu gehen. Im Bereich der Abwasserbehandlung gibt es einen Mangel an lokal verfügbaren Lösungen, die für den solaren Betrieb geeignet sind.

### 3. Gegenstand und Ziele des Projekts

Das Ziel des beantragten Projektes war die Entwicklung und die Demonstration eines einfachen, solar mit Photovoltaik (PV) betriebenen Membranbioreaktors (MBR) in Kombination mit einer nachgeschalteten Aktivkohleeinheit (eng., Granulated Activated Carbon, GAC). Dazu wurde im Lubaga Krankenhaus eine entsprechende Pilotanlage im Ablauf einer vorhandenen anaeroben Vorbehandlung + Papyrus-Granulat-Filter (PGF) errichtet und betrieben (Abbildung 1).

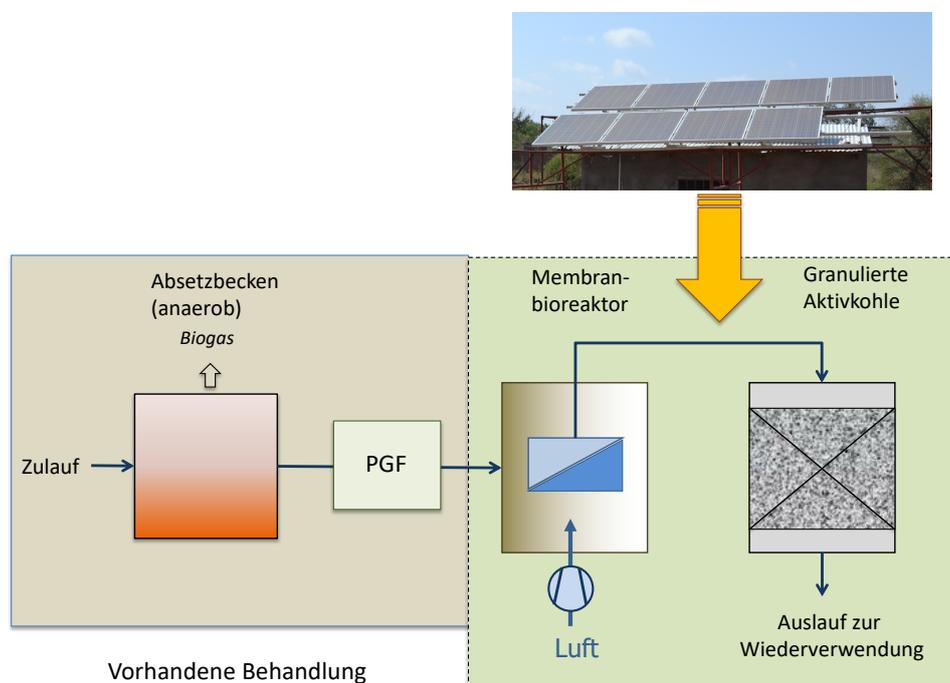


Abbildung 1: Verfahrenskonzept für die Behandlung von Krankenhausabwässern

Aufgrund der Erfahrungen der Hochschule Karlsruhe aus früheren Projekten in Ostafrika war es dabei sehr wichtig, dass die eingesetzten Technologien einfach, robust und mit geringen Kosten (CapEx, OpEx) verbunden sind. Bis auf das Membranmodul und die

Mess- und Regeleinheit waren alle Anlagenkomponenten und Verbrauchsmaterialien (Pumpen, Verrohrung etc.) vor Ort in Uganda verfügbar. Granulierte Aktivkohle die z.B. aus Kokosnussresten hergestellt wird, konnte ebenfalls auf dem lokalen Markt bezogen werden. Darüber hinaus war die Vor-Ort Schulung und die Einbindung lokaler Partner von großer Bedeutung. In diesem Fall wurde neben der Firma EQUATOR SOLAR eine Kooperation mit der Makerere University in Kampala durchgeführt. Diese Partner haben zum einen das solare Energiekonzept begleitet und andererseits die Betreuung Pilotierung unterstützt. Durch die enge Vernetzung mit lokalen Partnern und die Verwendung lokal verfügbarer Materialien wurden Kapazitäten geschaffen werden, die eine lokale Replikation des Piloten ermöglichen.

## 4. Materialien und Methoden

### 4.1 Standort der Pilotanlage

Das Lubaga Hospital in Kampala, Uganda, wurde 1899 von Missionsschwestern gegründet und ist eines der ältesten katholischen Krankenhäuser in Kampala. Es befindet sich im Besitz der römisch-katholischen Erzdiözese Kampala und ist vom Uganda Catholic Medical Bureau akkreditiert (Abbildung 2). Mit 280 Betten, 18.000 stationären und 150.000 ambulanten Patienten ist das Lubaga Hospital eines der größten Krankenhäuser in Kampala. Im Jahr 2019 betrug seine Abwasserkapazität durchschnittlich etwa 300 m<sup>3</sup> pro Monat. Da die Stromversorgung des Krankenhauses durch Instabilität und hohe Kosten gekennzeichnet war (Stromausfälle, Dieselgenerator zur Notstromversorgung), wurde 2017 durch EQS eine Photovoltaikanlage mit 50 KW<sub>p</sub> in Betrieb genommen und 2019 um weitere 20 KW<sub>p</sub> erweitert. Die Solaranlage garantiert eine unterbrechungsfreie Stromversorgung für die kritische Infrastruktur des Krankenhauses und spart mehr als 7.000 EUR Stromkosten pro Jahr.

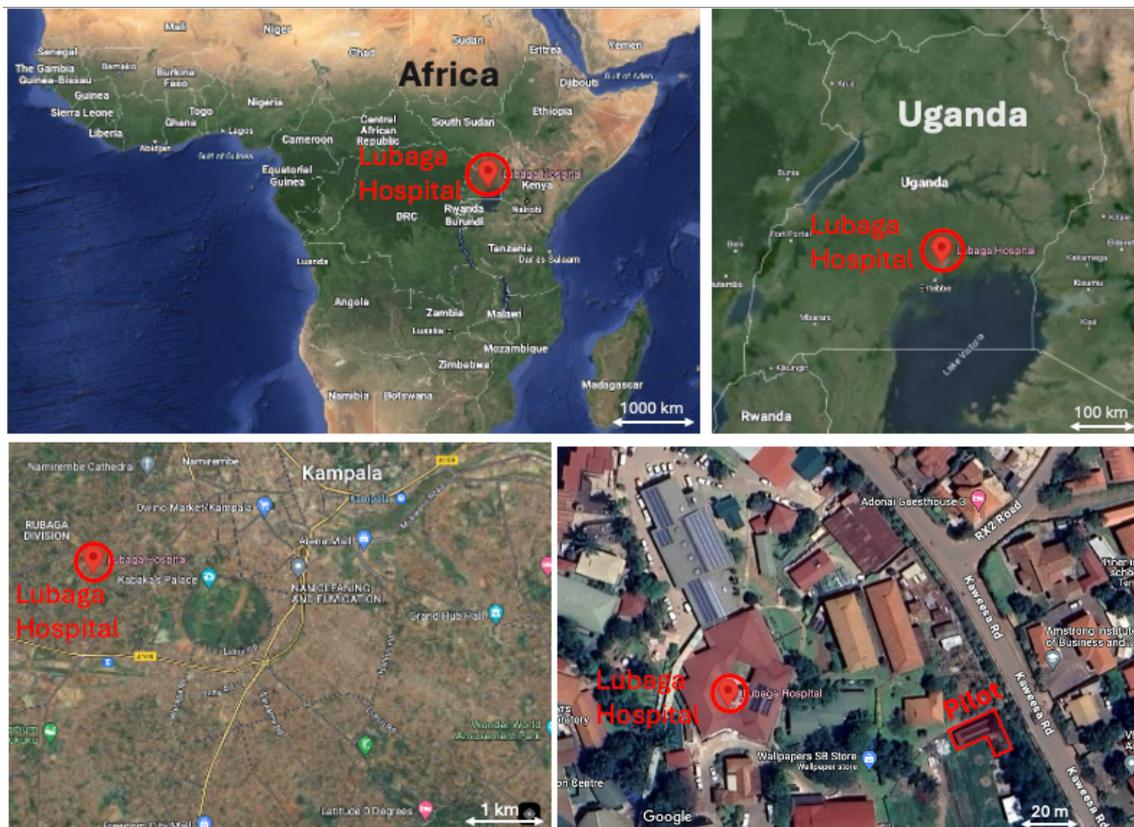


Abbildung 2: Lage des Lubaga Krankenhauses in Kampala, Uganda

## 4.2 Pilotanlage

### 4.2.1 Membranbioreaktor

Das Abwasser wird zunächst durch ein bereits bestehendes anaerobes Behandlungssystem geleitet, das Biogas erzeugt, das zum Kochen in der Krankenhausküche verwendet wird. Anschließend wird es durch einen vorhandenen Papyrus-Granulat-Filter (PGF) geleitet, der einem Puffertank nachgeschaltet ist (Abbildung 3, 4).

Der Zulauf zur neuen Kläranlage wurde mit einer Tauchpumpe (Pedrollo VXCm 15/30) aus dem Pufferbecken (nach dem PGF-Bett) entnommen. Das entnommene Abwasser wurde über einen 1 mm Sieb in den Denitrifikationsbehälter (DN-Tank, 10 m<sup>3</sup>) geleitet, der mit einem Rührwerk (Makita GB6116) ausgestattet ist, um die Denitrifikation unter anoxischen Bedingungen zu gewährleisten. Der Wasserstand im DN-Tank wurde mit einem Niveauschalter auf 7 m<sup>3</sup> gehalten. Eine Tauchpumpe (C.R.I. SLSC-15ES-H) im DN-Behälter förderte Wasser in den aeroben Nitrifikations-/C-Oxidationstank (N-Tank, 10 m<sup>3</sup>). Der Wasserstand im N-Tank wurde durch einen Niveauschalter auf 8 m<sup>3</sup> gehalten. Ein Überlauf vom N-Becken zum DN-Tank ermöglichte die Rückführung des nitrifizierten Abwassers zur Denitrifikation durch Rezirkulation. Die biologische Behandlung erfolgt in den Behältern DN und N. Der N-Tank wurde mit einem Gebläse mit einer Leistung von 12 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (AirMac DBMX200) belüftet. Das Wasser aus dem N-Tank wurde mit einer Tauchpumpe (Pedrollo VXCm 15/30) in den aerobe Filtrationstank (MBR-Tank/F-Tank) gepumpt. Der F-Tank enthält ein getauchtes UF-Modul mit einer Gesamtmembranfläche von 25 m<sup>2</sup> (AQQA 25, Weise Water GmbH, Deutschland). Zwei Gebläse (AirMac DBMX200) sorgen für eine Belüftung von 24 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, um eine Querströmung im Membranmodul zu gewährleisten. Eine Rezirkulationspumpe (C.R.I. PEM-7N) führte Wasser und Belebtschlamm (2,0 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) in den N-Tank zurück.

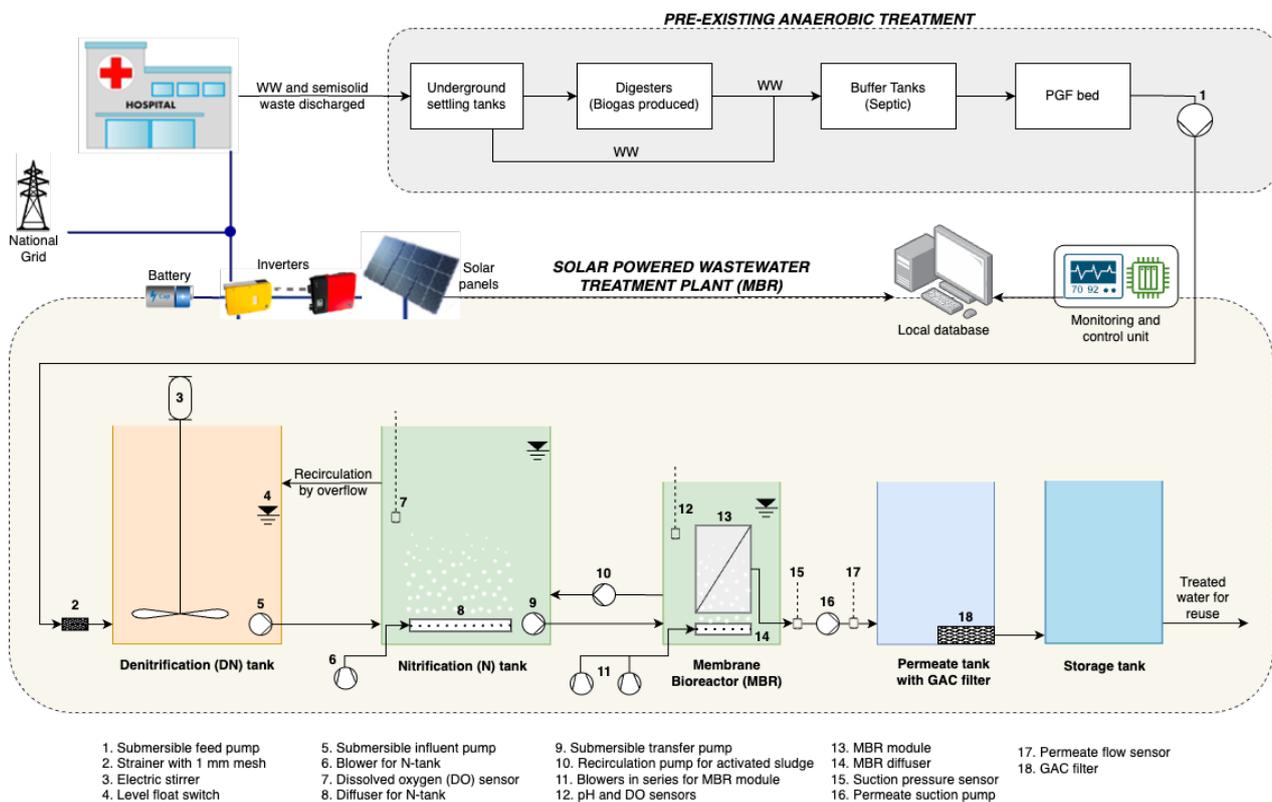


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Pilotanlage



Abbildung 4: Bildliche Darstellung der Pilotanlage

#### 4.2.2 Aktivkohlebehandlung

Die Größe und die Leerbettkontaktzeit (engl., Empty Bed Contact Time, EBCT) des Filters mit granulierter Aktivkohle (engl., Granular Activated Carbon, GAC) wurden auf der Grundlage mehrerer veröffentlichter Langzeiterfahrungen festgelegt. Die EBCT von Pilot- und großtechnischen GAC-Filtern zur Entfernung von Spurenstoffen wie Diclofenac, Carbamazepin und Sulfamethoxazol lag typischerweise im kurzen bis mittleren Bereich (2 - 30 Minuten) und die Anzahl der Bettvolumina (BV) bis zum Durchbruch zeigte eine große Bandbreite, abhängig von den spezifischen Bedingungen, von ca. 1.000 - 25.000 [10-13]. Benstoem et al. [11]. konnten in ihrer Metastudie keine eindeutige Korrelation zwischen EBCT und der Anzahl der BV bis zum Durchbruch finden. Für die vorliegende Studie wurde die EBCT auf 15 Minuten festgelegt, basierend auf einem MBR-Abwasserstrom von  $300 \text{ l h}^{-1}$ . Auf Basis dieser Daten wurde das Gesamtvolumen des GAC-Filters auf 75 l (38 kg) berechnet. Das GAC-Filtermaterial (AquaSorb™ CX-MCA, Jacobi) wurde in einem Kunststoffgitter am Boden des Ablaufs eines  $5 \text{ m}^3$ -Behälters installiert. Der GAC-Filter wurde nach der ersten Pilotphase durch einen 250-Liter-Behälter mit 100 kg des gleichen GAC-Filtermaterials ersetzt.

#### 4.2.3 PV Energieversorgung

Ein 7 kWp PV-System, bestehend aus 20 PV-Modulen (je 350 Wp, LR4-60HIH 350 M, LONGi Green Energy Technology Co. Ltd, China), PV-Wechselrichter (Nennleistung 6 Kilowatt (kW), Sunny Boy 6.0 SB6.0-1AV-41, SMA Solar Technology AG, Deutschland), Batterie-Wechselrichter (Nennleistung 4,6 kW, Sunny Island SI6. 0H-12, SMA Solar Technology AG, Deutschland) und Superkondensatorbatterie mit 3,55 kWh (Shanghai Green Tech Co. Ltd (GTCAP), GTEM-48V3600-BAAM102R, China) wurden von EQS, Kampala, installiert (Abbildung 5). Das PV-System wurde an das bestehende Stromnetz des Krankenhauses angeschlossen, so dass das MBR-Pilotprojekt teilweise autark versorgt werden konnte. Die Wasseraufbereitungsanlage wurde nachts ausschließlich über das bestehende Stromnetz versorgt. Das Notstromdieselaggregat des Krankenhauses versorgte die Wasseraufbereitungsanlage bei längeren Stromausfällen. Die Superkondensatorbatterie wurde mit überschüssigem Solarstrom geladen, um eine unterbrechungsfreie Stromversorgung zu gewährleisten. Überschüssiger Strom, der in der Batterie gespeichert wurde, wurde in das Netz zurückgespeist. Die Stromversorgung und der Stromverbrauch wurden in Echtzeit überwacht.

#### 4.2.4 Messwerterfassung

Ein Echtzeit-Überwachungssystem (Pacific Main, OxyGuard International A/S, Farum, Dänemark) mit analogen und digitalen Erweiterungen wurde installiert, um die wichtigsten Systemparameter wie gelöster Sauerstoff (DO), pH-Wert, Permeatfluss und Druck im F-Tank aufzuzeichnen. Analoge DO-Sonden von OxyGuard International A/S wurden im N-Tank und im F-Tank sowie eine pH-Sonde im F-Tank installiert. Der Durchflussmesser (SM7100, IFM Electronic GmbH, Essen, Deutschland) wurde zur Messung des Permeatflusses und die Drucktransmitter (G1/4", Otom® Group GmbH, Bräunlingen, Deutschland) zur Messung des Permeatdrucks (entspricht dem Transmembrandruck (TMP) des Membranmoduls) verwendet.

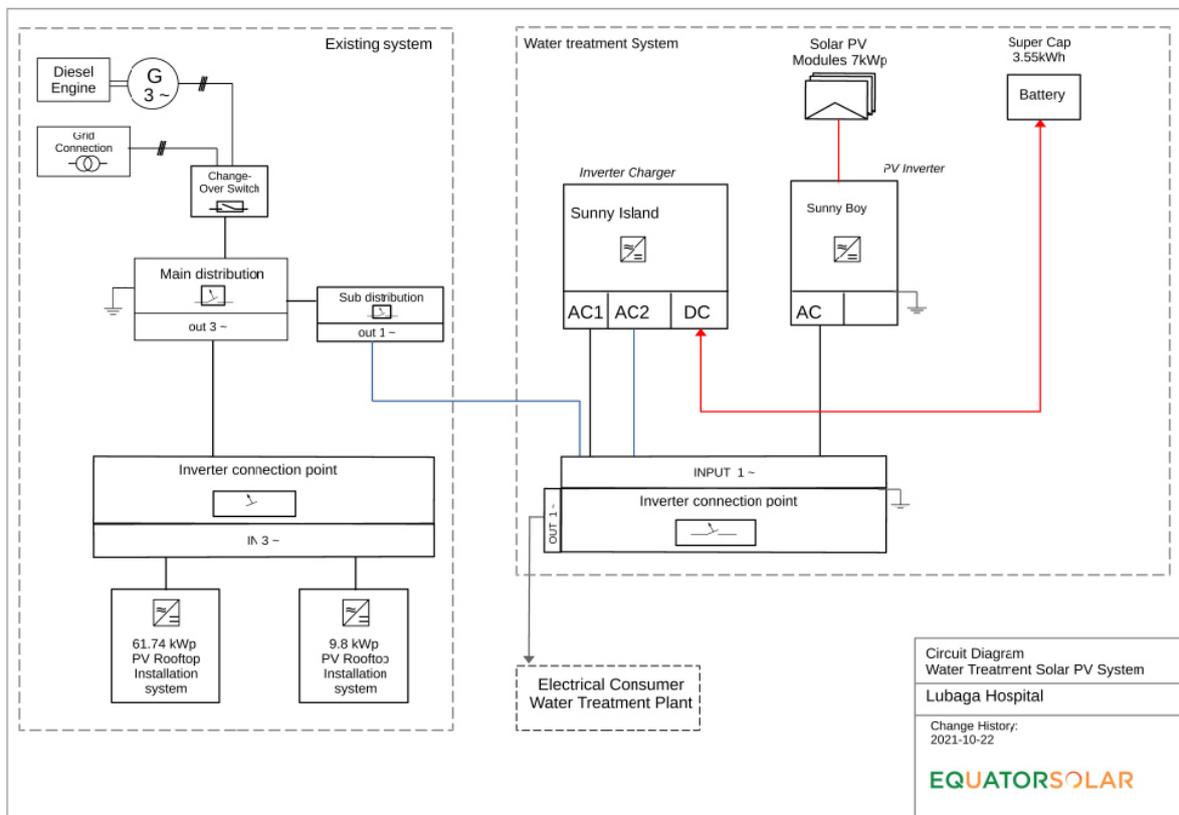


Abbildung 5: Schematische Darstellung des PV Energieversorgungsystems

#### 4.2.5 Wasseranalyse

Die Wasserproben wurden mittels spektrophotometrischer Küvettentests (Spectroquant® NOVA 60A) auf chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und Orthophosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) analysiert (Tabelle 1). Nur wenige ausgewählte Proben des MBR-Permeats wurden auf Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) analysiert, um die Stickstoffbilanz zu ergänzen. Der gesamte organische Kohlenstoffgehalt (TOC) wurde mit dem TOC-L CPH/CPN (Shimadzu, Darmstadt, Deutschland) gemessen. Die elektrische Leitfähigkeit (EC) und der pH-Wert wurden mit den Handmessgeräten Cond 315i bzw. pH 325 (WTW GmbH, Weilheim, Deutschland) gemessen.

Tabelle 1 Küvettentests zur Analyse des Abwassers und des behandelten Wassers

Parameter	Nr. Küvettentest	Messbereich [mg l <sup>-1</sup> ]	Standardabweichung der Methode [mg l <sup>-1</sup> ]
CSB	114541 (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)	25 – 1500	± 4,7
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	114544 (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)	0,5 – 16,0	± 0,400
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	114542 (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)	0,5 – 18,0	± 0,013
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	100474 (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)	0,05 – 5,00	± 0,024
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	LCK341 (Hach Lange GmbH, Düsseldorf, Germany)	0,015 – 0,600	± 0,015

Die Permeatpumpe wurde intermittierend für 10 Minuten im Saugmodus und 2 Minuten im Relaxationsmodus betrieben. Der Wasserfluss wurde bis zum Tag 47 zwischen 12 und 16 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Durchschnitt 13 ± 2,1 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) gehalten, dann ist er unter 10 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> gefallen. Nach der chemischen Reinigung mit Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) stieg er auf 25 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> und fiel innerhalb weniger Tage auf 10-15 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Der Transmembrandruck (TMP) blieb bis zum Tag 47 konstant bei etwa 125 ± 20 mbar bei einer mittleren Permeabilität von 120 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>, danach fiel er um mehr als 30 % (70 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>). Nach der Reinigung stieg sie auf 200 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup> an und stabilisierte sich innerhalb weniger Tage bei 126 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>.

## 5. Pilotierung

### 5.1 Chemische Parameter

Tabelle 2 zeigt die Mittelwerte der chemischen Parameter während der 2,5-monatigen Pilotphase.

Der durchschnittliche CSB im Zulauf war niedrig (164 ± 23 mg l<sup>-1</sup>), da der Zulauf zum MBR bereits die bestehende anaerobe Behandlung und eine kleine Pflanzenkläranlage durchlaufen hatte (siehe 4.2.1). Der durchschnittliche CSB im Ablauf des MBR betrug 82 ± 19 mg l<sup>-1</sup> und somit beträgt die durchschnittliche CSB-Eliminationsleistung 50 %. Diese geringe Eliminationsleistung könnte durch einen höheren Anteil an schwer abbaubaren Verbindungen verursacht werden, die durch die Behandlung nicht entfernt werden konnten. Eine längere Akklimatisierungszeit, d.h. ein längerer Betrieb des MBR kann die Eliminationsleistung erhöhen. Der niedrige CSB-Wert des MBR-Permeats macht es jedoch geeignet für die Wiederverwendung, z.B. für die Toilettenspülung oder die Bewässerung.

Die Nitrifikation erreichte nach Zugabe von Belebtschlamm aus der kommunalen Kläranlage Bugolobi in Kampala am Tag 16 eine stabile Rate von etwa 81 %. Der N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Wert sank von durchschnittlich 76 ± 5,1 mg l<sup>-1</sup> im Zulauf auf 14,4 ± 3,6 mg l<sup>-1</sup> im Ablauf. Ein Rückgang der Nitrifikationsrate am Tag 50 ging mit einem Anstieg von NO<sub>2</sub><sup>-</sup> von unter 1,0 mg l<sup>-1</sup> auf 3,8 mg l<sup>-1</sup> einher. Dies deutet auf eine Hemmung der Nitrifikation hin. Ab Tag 60 lag der NO<sub>2</sub><sup>-</sup> Gehalt jedoch wieder unter 0,5 mg L<sup>-1</sup>, so dass die Nitrifikationsrate wieder anstieg. Dies könnte auf eine Hemmung durch Sulfid aufgrund der anaeroben Vorbehandlung hinweisen. Delgado Vela et al. [14] zeigten, dass nitritoxidierende Bakterien anfälliger für die Hemmung durch Sulfid sind als ammoniumoxidierende Bakterien und folglich der Nitrifikationsprozess zur Nitratbildung behindert werden könnte.

Die Denitrifikationsrate stieg nach Tag 25 an und nahm dann bis Tag 36 ab. Die Rezirkulationsrate vom N-Behälter zum DN-Behälter wurde am Tag 52 von  $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  auf  $2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  reduziert, um die abnehmende Denitrifikationsrate umzukehren. Infolgedessen stieg die Denitrifikationsrate an. Allerdings ist die Denitrifikationsrate mit ca. 20% aufgrund des niedrigen Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnisses (C/N) im System immer noch relativ niedrig. Der durchschnittliche TOC-Wert des Zulaufs betrug  $20 \pm 2,8 \text{ mg l}^{-1}$  und der durchschnittliche N- $\text{NO}_3^-$  Wert nach der Nitrifikation (MBR-Ablauf) betrug  $50 \pm 5 \text{ mg l}^{-1}$ , was einem C/N-Verhältnis von 0,4 entspricht. Es sollte eine ausreichende C-Quelle vorhanden sein, um eine Nitrifikation zu ermöglichen. Das optimale C/N-Verhältnis hängt von den Bedingungen im biologischen System ab, so dass das typische C/N-Verhältnis im Bereich von 2,6 - 5,5 liegt [15].

Die Nitrifikation erfolgt bei niedrigeren C/N-Verhältnissen durch endogene Atmung mit geringerer Geschwindigkeit und kann zu höheren Nitritkonzentrationen führen [16]. Die Denitrifikationsrate könnte durch Zugabe einer zusätzlichen C-Quelle weiter erhöht werden. Dies hängt jedoch von der möglichen Wiederverwendung des behandelten Wassers ab. Beispielsweise kann sich eine höhere  $\text{NO}_3^-$ -Konzentration als Nährstoff positiv auswirken, wenn das Permeat zur Bewässerung verwendet wird, da der größte Teil der Stickstoffaufnahme mit dem im Bodenwasser gelösten  $\text{NO}_3^-$  erfolgt.  $\text{NH}_4^+$  ist aufgrund seiner austauschbaren Bindungen mit Bodenpartikeln weniger mobil als  $\text{NO}_3^-$  [17].

Eine Phosphatelimination war in der ursprünglichen Projektplanung nicht vorgesehen, da Phosphat ein wertvoller Nährstoff für die Bewässerung ist. Daher wurde nur die Phosphor-/Orthophosphat-Bilanz ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) der Anlage untersucht. Im Ablauf der Kläranlage wurde keine Phosphatreduktion festgestellt. Der mittlere  $\text{P-PO}_4^{3-}$  Wert im Zu- und Ablauf des MBR wurde mit  $30,4 \pm 2,2$  bzw.  $29,4 \pm 6,3 \text{ mg l}^{-1}$  gemessen. Auch im Ablauf des GAC-Filters wurde keine Veränderung festgestellt.

Bei Bedarf könnte eine Phosphatelimination jedoch leicht in die bestehende Kläranlage integriert werden, indem eine chemische Fällungseinheit in das DN- oder N-Becken eingebaut wird. Mburu et al. [18] haben im Pilotmaßstab gezeigt, dass  $\text{PO}_4^{3-}$  durch Zugabe von Aluminiumsulfat,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , als chemisches Koagulationsmittel in den MBR-Tank weiter reduziert werden kann.

Tabelle 2 Wasserqualität im Zulauf und Ablauf der Pilotanlage

Parameter	Einheit	Zulauf PGF*	Zulauf MBR*	Ablauf MBR*
pH	—	$7,10 \pm 0,15$	$7,0 \pm 0,3$	$6,3 \pm 0,9$
Elektr. Leitfähigkeit	$\mu\text{S cm}^{-1}$	$1128 \pm 40$	$1148 \pm 37$	$874 \pm 63$
CSB	$\text{mg l}^{-1}$	$716 \pm 65$	$164,0 \pm 23$	$82 \pm 19$
TOC	$\text{mg l}^{-1}$	$183 \pm 50$	$20,0 \pm 2,7$	$10,5 \pm 1,2$
N- $\text{NH}_4^+$	$\text{mg l}^{-1}$	$76,7 \pm 3,1$	$76,0 \pm 5,1$	$14,4 \pm 3,6$
N- $\text{NO}_3^-$	$\text{mg l}^{-1}$	$0,6 \pm 0,5$	$0,4 \pm 0,2$	$50 \pm 5$
P- $\text{PO}_4^{3-}$	$\text{mg l}^{-1}$	$9,70 \pm 0,36$	$30,4 \pm 2,2$	$29,4 \pm 6,3$

\* Mittelwert mehrerer Analysen

## 5.2 Biologische Parameter

Der N-Tank wurde mit einem Belüfter ausgestattet, um den aeroben C-Abbau und die Nitrifikation zu gewährleisten (siehe 4.2.1). Ein Diffusor im F-Tank unterhalb des Membranmoduls, der mit zwei Gebläsen verbunden ist, sorgt für ausreichende Querströmungen, um Fouling der Membranen zu reduzieren. Ma et al. [19] zeigten, dass der biologische Abbau von Mikroverunreinigungen bei einer relativ langen hydraulischen

Verweilzeit (engl. Hydraulic Retention Time, HRT) von 20-30 Stunden aufgrund von Co-Metabolismus, Metabolismus und/oder Ioneneinfang effizienter ist. Ausgehend von einem durchschnittlichen Volumenstrom von 7,7 m<sup>3</sup> pro Tag betrug die gesamte HRT der biologischen Behandlung in dieser Arbeit 59 Stunden, wenn alle drei Tanks - N-Tank, DN-Tank und F-Tank - berücksichtigt werden (Gesamtfüllvolumen: 8 + 7 + 4 m<sup>3</sup> = 19 m<sup>3</sup>), was deutlich länger ist als die typische HRT von MBRs, selbst wenn der Abbau von Mikroverunreinigungen berücksichtigt wird. Die Pilotanlage wurde jedoch so konzipiert, dass eine zukünftige Erweiterung durch Hinzufügen eines weiteren MBR-Moduls im F-Tank möglich ist, um die Kapazität mindestens zu verdoppeln.

Die organische Beladung oder das Verhältnis von Nährstoffen zu Mikroorganismen (F/M) ist einer der wichtigsten Auslegungs- und Kontrollparameter für biologische Abwasserbehandlungsverfahren. MBRs werden mit einem niedrigeren F/M-Verhältnis als konventionelle Belebtschlammssysteme ausgelegt, um hohe Membranverschmutzungsraten und niedrige Sauerstofftransporteffizienzen zu vermeiden [20]. Der typische Bereich des F/M-Verhältnisses für MBRs liegt bei 0,08 - 0,24 kgCOD/kg MLSS [20]. Während der Pilotphase betrug die durchschnittliche Schlammkonzentration (engl., Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS) aller drei Becken  $4,7 \pm 2 \text{ g L}^{-1}$  und das durchschnittliche F/M-Verhältnis wurde mit 0,016 kgCOD/kgMLSS berechnet, was aus dem gleichen Grund wie bei der längeren HRT (siehe oben) unter dem typischen Bereich für MBR liegt. In keiner Phase der Pilotversuche wurde Schlamm aus den drei Behältern abgezogen, was bedeutet, dass die SRT theoretisch unbegrenzt ist.

### 5.3 Spurenstoffentfernung

Nach Austausch des Aktivkohlefilters an der Pilotanlage (siehe 4.2.2) wurden typische Vertreter von Spurenstoffen in Krankenhäusern über einen Zeitraum von ca. 4.300 BV untersucht. Anfänglich wurde nach 78 BV ein hoher Abscheidegrad von 90 % für alle untersuchten Spurenstoffe erreicht (Tabelle 3). Die Eliminationsleistung des GAC-Filters fiel jedoch nach 4.290 BV auf etwa 25 % ab. Die Eliminationsleistung für den Hauptkontaminanten Diclofenac stieg im MBR deutlich auf 75 % an. Auch die TOC-Elimination verbesserte sich von ca. 50 % auf 70 %. Dies könnte durch die Akklimatisierung des Schlamms aufgrund der langen hydraulischen Verweilzeit (HRT) und der Schlammverweilzeit (SRT) erklärt werden. Vieno und Sillanpää [21] fanden heraus, dass eine lange SRT (> 150 Tage) und HRT (> 2-3 Tage) die Elimination von Diclofenac in der biologischen Abwasserbehandlung signifikant erhöhen kann.

Tabelle 3 Analyse ausgewählter Spurenstoffe\*

BV	Spurenstoff*	Erfassungsgrenze [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]	Zulauf MBR [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]	Ablauf MBR [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]	Ablauf A- Kohlefilter [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
78	Carbamazepine	0.1	2.7	2.3	0.12
	Irbesartan	0.1	0.4	0.3	< 0.10
	Diclofenac	0.1	21.1	19.7	1.30
	Sulfamethoxazol	0.1	3.5	3.1	0.40
	Clarithromycin	0.1	2.4	1.1	0.10
4290	Carbamazepine	0.1	1.2	1.2	0.90
	Irbesartan	0.1	1.4	1.1	< 0.10
	Diclofenac	0.1	22.0	5.5	4.10
	Sulfamethoxatol	0.1	1.7	0.4	0.30
	Clarithromycin	0.1	4.1	<0.1	0.30

\*Messungen am Engler-Bunte Institut (EBI), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

## 5.4 PV Energiesystem

Im Folgenden wird die tägliche Energiebilanz am Beispiel eines typischen sonnigen Tages diskutiert (Abbildung 6). Die Energieerzeugung des PV- und Batteriesystems (PV + Batterie) ist als graue Linie dargestellt, die Netzeinspeisung als blaue Linie und der Energieverbrauch der gesamten Pilotanlage als orange Linie. An diesem Tag kam es um 2:20 Uhr zu einem Stromausfall und die Batterie lieferte Strom bis 3:30 Uhr (die Batterie lieferte einen Backup von ca. 1 Stunde). Danach wurde der Strom wieder aus dem Netz bezogen, so dass die Batterie wieder aufgeladen werden konnte. Dies ist in Abb. 6 durch die positiven Leistungswerte der Netzeinspeisung und die negativen Leistungswerte des PV- und Batteriesystems dargestellt. Die Energieerzeugung durch das PV-System begann nach Sonnenaufgang um 6:52 Uhr und die maximale PV-Leistung erreichte etwa 5 kW am Nachmittag zwischen 12:00 und 14:00 Uhr. Nach Sonnenuntergang um 18:58 Uhr wurde kein Strom mehr von der PV-Anlage erzeugt und der Strom wurde vollständig aus dem Netz bezogen. Basierend auf den Daten einer Wetterstation (Global Irradiation), die 12 km von der Pilotanlage im Aquarius Kigo Resort entfernt ist, wurde der durchschnittliche Wirkungsgrad der PV-Paneele mit 14 % berechnet. Die maximale Leistung betrug an einem typischen bewölkten Tag nur 4 kW (Abbildung 7).

Die Gesamtenergieproduktion der PV-Anlage an diesem sonnigen Tag betrug  $E_p = 33,3$  kWh und der Gesamtenergieverbrauch der Pilotanlage über 24 Stunden lag bei  $E_c = 32,2$  kWh. Somit reichte die Gesamtenergieproduktion an diesem sonnigen Tag aus, um den gesamten Energiebedarf der Anlage zu decken. Zur Überbrückung von kurzen Stromausfällen von einer Stunde wurde ein kostengünstiger Energiespeicher (mit einem Superkondensator mit einer Kapazität von  $E_{st} = 3,5$  kWh) eingesetzt, da das Krankenhaus bereits an das Stromnetz angeschlossen war und über ein Diesel-Notstromaggregat verfügt. Somit wurde die Hauptenergieversorgung während der Nacht durch das öffentliche Netz sichergestellt ( $E_g = 17,6$  kWh). Tagsüber wurde die überschüssige Energie der PV-Anlage ( $E_{p,sur} = 17,5$  kWh) in das öffentliche Netz eingespeist oder im Krankenhaus verbraucht. Basierend auf den Energiedaten eines typischen Sonnentages kann der Grad der Energieautonomie (eng., Degree of Autonomy, DoA) theoretisch wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} \text{DoA} &= \frac{E_p - E_g + E_{st}}{E_p} & (1) \\ &= \frac{33.3 - 17.6 + 3.5}{33.3} \\ &= 0.6 \text{ oder } 60 \% \end{aligned}$$

An einem bewölkten Tag betrug die PV-Gesamtproduktion 14,8 kWh (Abbildung 7), was zu einer deutlich niedrigeren DoA führen würde. Die durchschnittliche Energie, die von der PV-Anlage erzeugt und von der Pilotanlage pro Tag und Jahr verbraucht werden kann, wird in Tabelle 6 auf der Grundlage der Daten aus dem Pilotversuch geschätzt. Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher DoA von 43 %.

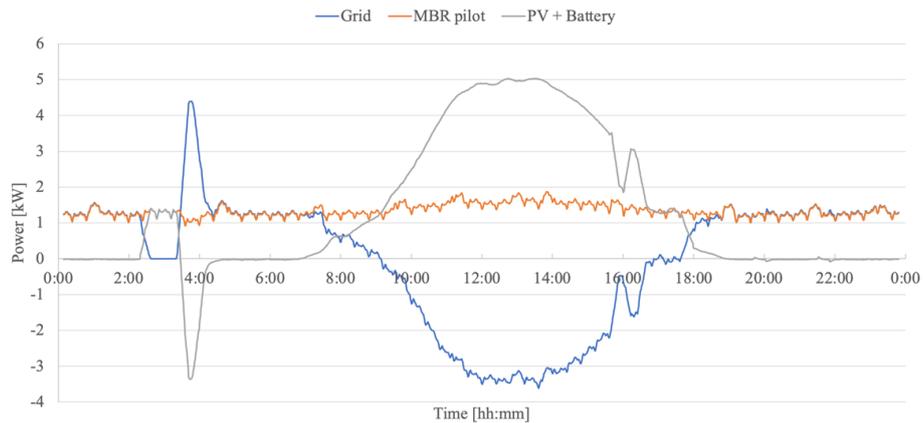


Abbildung 6: Energiebilanz der Pilotanlage an einem sonnigen Tag

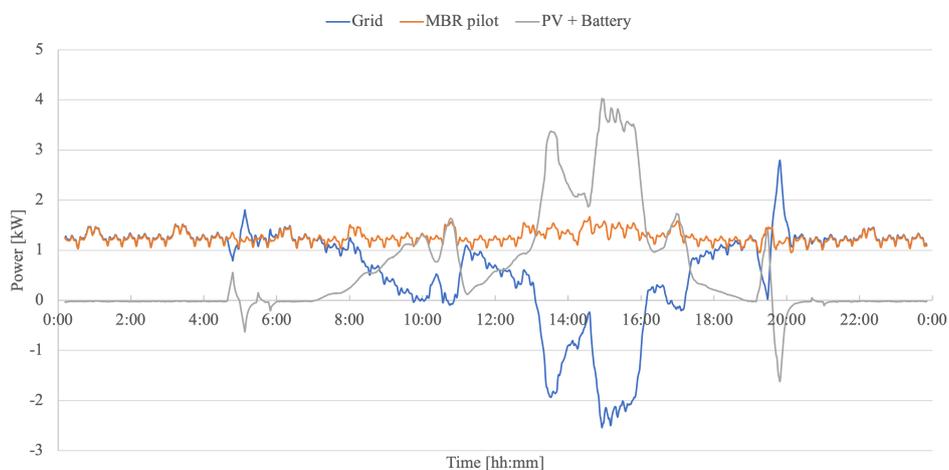


Abbildung 7: Energiebilanz der Pilotanlage an einem bewölkten Tag

## 6. Kostenkalkulation

Die Kostenkalkulation für das Pilotsystem ist in Tabelle 4 dargestellt. Der größte Teil der Gesamtinvestitionskosten (CapEx) von 42 % entfiel auf das PV- und Batteriesystem zur Stromversorgung und 25 % auf die Sensoren und das Steuerungssystem. Die Betriebskosten (OpEx) betragen ca. 40% für Strom und Wartung. Die Pilotanlage kann ca. 2.800 m<sup>3</sup> Abwasser pro Jahr behandeln (ca. 7,7 m<sup>3</sup> Permeat pro Tag), wodurch jährlich ca. 7.000 Euro durch die Einsparung von Frischwasser eingespart werden können (20 l Kanister Leitungswasser kosten in Uganda ca. 0,05 - 0,14 Euro [22, 23]). Darüber hinaus kann die überschüssige Energie, die von der PV-Anlage während der Tageslichtstunden produziert wird, dem Krankenhaus zur Verfügung gestellt werden und mehr als 370 Euro pro Jahr einsparen (unter der Annahme, dass mindestens 6 kWh überschüssige Energie für 9 Monate pro Jahr produziert wird und 1 kWh elektrische Energie in Uganda ca. 0,10 Euro kostet [24]). Unter Berücksichtigung der Betriebskosten ergibt sich eine Gesamtkostenreduktion von 7.370 - 2.086 = 5.284 Euro. Somit ist die Amortisationszeit der Investitionskosten des Pilotprojekts recht lang, was für ein Pilotprojekt zu erwarten ist. Aus den Betriebskosten ergeben sich Kosten für das aufbereitete Wasser von 0,75 Euro pro m<sup>3</sup>. Die Anlage kann jedoch weiter optimiert werden. Beispielsweise kann die Wasseraufbereitungskapazität der Pilotanlage durch den Einbau zusätzlicher Membranmodule in den Filtrationsbehälter um den Faktor 2 bis 3 erhöht werden. Eine

solche Erweiterung wird die Einsparungen deutlich erhöhen und die Amortisationszeit verkürzen.

Tabelle 4. CapEx und OpEx für die Pilotanlage

CapEx	Komponenten in Euro	% von gesamten CapEx
PV + Batterie (incl. Installation)	17.000	42
UF Modul	2.880	7
Sensor- & Regelungssystem	10.000	25
Sonstiges (Tanks, Pumpen etc.)	10.750	26
<b>Gesamt CapEx</b>	<b>40.630</b>	<b>100</b>

OpEx	Komponenten in Euro pro Jahr	% von gesamten OpEx
Elektrizität*	826	40
Membranersatz**	360	17
Unterhalt***	900	43
<b>Gesamt OpEx</b>	<b>2.086</b>	<b>100</b>

\*Berechnet nach Kostenmix [25]

Energy off peak, 00:00 – 06:00 hours: 0,069 Euro

Energy shoulder, 6:00 – 18:00 hours: 0,124 Euro

Energy peak, 18:00 – 00:00 hours: 0,167 Euro

\*\* Erwartete Lebensdauer von 8 Jahre

\*\*\*Arbeitszeit und Ersatzteile

## 7. Zusammenfassung

Mit diesem Projekt wurde zum ersten Mal eine solarbetriebene MBR-Pilotanlage in einem typischen Krankenhaus in Ostafrika (Kampala, Uganda) installiert und betrieben. Für die Pilotanlage wurden mit Ausnahme des Membranmoduls und der Überwachungseinheit nur lokal verfügbare Teile verwendet. Der F-Tank wurde mit einem 25 m<sup>2</sup> PES-Membranmodul ausgestattet, das einen durchschnittlichen Permeatfluss von 10-15 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bei einem Saugdruck von 125 mbar erzeugte. Die Anlage zeigte eine CSB- und TOC-Eliminationseffizienz von etwa 50 % und eine hohe Nitrifikationsrate von 80 %. Die durchschnittliche Denitrifikationsrate lag bei 20 %. Die Eliminationsleistung für typische pharmazeutische Rückstände stieg auf ca. 90 % (78 BV), nachdem der nachgeschaltete GAC-Filter ausgetauscht worden war. Die Abscheideleistung des GAC-Filters sank auf ca. 25 % bei 4290 BV. Der signifikante Anstieg der Eliminationsleistung für Diclofenac im MBR um 75 % könnte auf die Akklimatisierung des Schlammes aufgrund der langen HRT und SRT zurückzuführen sein. Die Eliminationsleistung des GAC-Filters fiel nach 4.290 BV auf ca. 25 % ab. Die Qualität des behandelten Abwassers aus der Pilotanlage war ausreichend für die Wiederverwendung zur Bewässerung des Krankenhausbereichs, für die Toilettenspülung und für Reinigungszwecke.

Die Pilotanlage mit 20 PV-Modulen mit einer Gesamtleistung von 7 kWp erzeugte durchschnittlich 26,7 kWh pro Tag. Der durchschnittliche tägliche Stromverbrauch lag bei 30,6 kWh. Die Superkondensatorbatterie (Kapazität 3,55 kWh) war in der Lage, kurze Stromausfälle (ca. 1 Stunde) zu überbrücken. Der Grad der Energieautonomie betrug ca. 43%, d.h. ein Großteil der Energie wurde von den PV-Paneeelen geliefert, während die typischen Stromausfälle vom Netz und von einem Dieselgenerator überbrückt wurden.

## 8. Referenzen

- [1] Söregard, M, Campos-Pereira, H., Ullberg, M., Lai, F.Y., Golovko, O., Ahrens, L., Mass loads, source apportionment, and risk estimation of organic micropollutants from hospital and municipal wastewater in recipient catchments, *Chemosphere*, 234 (2019) 931-941
- [2] Hocquet, D., Muller, A., Bertrand, X., What happens in hospitals does not stay in hospitals: antibiotic-resistant bacteria in hospital wastewater systems, *Journal of Hospital Infection*, 93 (2016) 395-402
- [3] Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW, <http://www.koms-bw.de>
- [4] Björnberg, E., Elenström, A.K., Pharmaceuticals in the Environment – Concentrations Found in the Water, Soil, Crops in Kampala, Examensarbete, Uppsala Universitet (2016)
- [5] Verlicchi, P., Galetti, A., Masotti, L., Management of hospital wastewaters: The case of the effluents of a large hospital situated in a small town, *Water Science & Technology*, 61 (2010) 2507-19
- [6] <https://health.go.ug/affiliated-institutions/hospitals> (eingesehen 20.10.2023)
- [7] Hoinkis, J., Deowan, S.A., Panten, V., Figoli, A., Huang, R.R., Drioli, E., Membrane Bioreactor (MBR) Technology – a promising approach for industrial wastewater reuse, *Procedia Engineering*, Vol.33 (2012) 234-241
- [8] <https://www.vicinaqua.eu> (eingesehen 20.10.2023)
- [9] <https://www.ucmb.co.ug/> (eingesehen 20.10.2023)
- [10] Baresel, C., Harding, M., Fang, J., Ultrafiltration/granulated active carbon-biofilter: Efficient removal of a broad range of micropollutants, *Applied Sciences*, 9(4) (2019) 710
- [11] Benstoem, F., Nahrstedt, A., Boehler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H., Pinnekamp, J., Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater—A meta-analysis of pilot- and large-scale studies, *Chemosphere*, 185 (2017) 105-118
- [12] Bitterwolf, S., Boehler, M., Siegrist, H., Joss, A., Elimination von Spurenstoffen durch granulierten Aktivkohle (GAK) Filtration: Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Furt-Bülach, Dübendorf (2017)
- [13] Nguyen, L.N., Hai, F.I., Kang, J., Price, W.E., Nghiem, L.D., Removal of trace organic contaminants by a membrane bioreactor-granular activated carbon (MBR-GAC) system. *Bioresource Technology* 113, (2012) 169–173
- [14] Delgado Vela, J., Dick, G.J., Love, N.G., Sulfide inhibition of nitrite oxidation in activated sludge depends on microbial community composition, *Water Research*, 138, (2018) 241–249.
- [15] Chiu, Y.-C., Chung, M.-S., Determination of optimal COD/nitrate ratio for biological denitrification, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 51 (2003) 43-49
- [16] Mathys, R.G., Nitrifikation/Denitrifikation-Neue Aspekte und Verfahren. *Gas, Wasser Abwasser*, 74 (1994) 89–103
- [17] Beeckman, F., Motte, H., Beeckman, T., Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation. *Current Opinion Biotechnology*, 50 (2018) 166-173
- [18] Mburu, J., Hoinkis, J., Njogu, P.M., Kinyua, Gukelberger, E., Atiye, T., Pilot Trials on Testing and Optimization of Polyethersulfone Membranes for Treatment of Fish

Processing Wastewater through Membrane Bioreactor Technology. International Journal of Water and Wastewater Treatment 5 (2019)

[19] Ma, J., Dai, R., Chen, M., Khan, S.J., Wang, Z., Applications of membrane bioreactors for water reclamation: Micropollutant removal, mechanisms and perspectives. Bioresource Technology, 269 (2018) 532-543

[20] Judd, S., The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment, Elsevier (2006)

[21] Vieno, N., Sillanpää, M., Fate of diclofenac in municipal wastewater treatment plant - A review. Environment International, 69 (2014) 28-39

[22] Onyutha, C., Akobo, J.T., Mubialiwo, A., Tap versus Bottled Water in Kampala, Uganda: Analyses of Consumers' Perception alongside Bacteriological and Physicochemical Quality. Journal of Environmental Public Health, 25 (2022) 9336247

[23] Segawa, N., As dry season runs on in Central Uganda, price for water goes higher and higher. Global Press Journal (January 31, 2018)

[24] [https://docs.google.com/viewer?url=https%3A%2F%2Fwww.umeme.co.ug%2Fumeme\\_api%2Fwp-content%2Fuploads%2F2024%2F01%2FTariffs-6.pdf](https://docs.google.com/viewer?url=https%3A%2F%2Fwww.umeme.co.ug%2Fumeme_api%2Fwp-content%2Fuploads%2F2024%2F01%2FTariffs-6.pdf) (eingesehen 20.10.2023)

[25] Okoboi, G., Mawejje, J., Electricity peak demand in Uganda: insights and foresight, Energy Sustainability and Society 6 (29) (2016)

## **9. Verbreitung der Ergebnisse**

**Webseite:** [www.reuse4hos.de](http://www.reuse4hos.de)

### **Veröffentlichungen:**

<https://www.h-ka.de/forschen/reuse4hos>

De, S. , Hoinkis, J., Solarbetriebene Abwasseraufbereitung für afrikanische Krankenhäuser, Forschung aktuell, Hochschule Karlsruhe (2022) 34-35

De, S., Coutard, M., Hoinkis, J., Solar powered membrane bioreactor (MBR) treating wastewater for reuse at a hospital in Kampala, Uganda – Results of pilot-scale trials, Environmental Challenges, under review, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4782128>

### **Vorträge:**

De, S., Solar-powered membrane bioreactors - a promising technology for water reuse in East Africa, Technoscape 2023, Sustainable Technologies for Water and Wastewater, Vellore, India 14-16 Dec. 2023

De, S., Solar-powered membrane bioreactors - a promising technology for water reuse in East Africa, IWA Water and Development Congress & Exhibition, Kigali, Rwanda, 10-14 Dec. 2023

## **10. Modellcharakter und Weiterführung des vorgesehenen Lösungsweges**

Die Demonstration des Lösungsweges im Rahmen des Pilotprojekts im Lubaga Krankenhaus dient als Modell für die Behandlung und Wiederverwendung von Abwasser in Krankenhäusern in Uganda und anderen ostafrikanischen Ländern (Kenia, Tansania etc.). Wie bereits erwähnt gibt es allein in Uganda 155 öffentliche und private

Krankenhäuser. Mit den Erfahrungen aus der Pilotierung soll ein marktfähiger Prototyp für Krankenhäuser in Uganda und Ostafrika entwickelt werden.

Das Projekt wird nach Beendigung der Förderperiode durch den lokalen Partner EQS weitergeführt, indem die entwickelte solar betriebene Abwasserreinigungsanlage in Uganda und anderen ostafrikanischen Staaten vermarktet wird. Im Jahr 2024 wurde eine PV-betriebene MBR Anlage desselben Typs im Rahmen des EU PrAEctiCe Projekts ([www.praectice.eu](http://www.praectice.eu)) für die Wasserversorgung einer Fischzuchtanlage in Kisumu, Kenia errichtet.