

AZ 36024/01

**AUTARKE SOLARE TEXTILBASIERTE
WASSERREINIGUNGS- UND ENTSALZUNGSANLAGE**

ABSCHLUSSBERICHT

PROJEKTPARTNER: TAO TRANS-ATMOSPHERIC OPERATIONS GMBH-

**DEUTSCHE INSTITUTE FÜR TEXTIL- UND
FASERFORSCHUNG DENKENDORF**

PROJEKTLAUFZEIT: 28.05.2021- 30.04.2022

**PROJEKTLEITER: FRAU REGINE C. HENSCHEL
TAO TRANS-ATMOSPHERIC OPERATIONS GMBH
INDUSTRIESTRAÙE 15, 70565 STUTTGART**

TELEFON: +49 (0) 711 131620

E-MAIL: REGINE C. HENSCHEL, HENSCHEL@TAO-GROUP.DE

1. Zusammenfassung	3
2. Ausgangssituation	3
3. Internationaler Stand der Technik, konkurrierende Produkte und Verfahren	5
4. Zielsetzung des Vorhabens	8
5. Darstellung des Entsalzungskonzeptes	9
6. Versuchsergebnisse	11
6.1. Feinkonzeption der Anlagentechnik, der Einzelsysteme und der Modulbauweise	11
6.2. Entwicklung der Anlagenkomponenten	12
6.3. Absorber- Meerwasserreservoir mit Zu- und Ablauf, ohne Salzkristallisation 12	12
6.4. Zufuhr des frischen Meerwassers über kapillare Textilstrukturen oder mit einer Pumpe mit PV-Strom	13
6.5. Solarabsorber mit definiertem Wasseraufnahmevermögen.	15
6.6. Wasserdampfdurchlässige Membran und hohe Durchsatzleistung und Temperaturfestigkeit.....	16
6.7. Ventilation für das Umluftsystem mit Photovoltaikstrom.....	17
6.8. Transluzente Wärmedämmung mit Prüfung der UV-Beständigkeit.....	17
6.9. Bau von Prüfständen, um die Anlagenkomponenten und verwendete Materialien zu testen.....	17
6.10. Messung der Verdunstungsleistung textiler Absorbermaterialien und Analyse der Verschmutzungsneigung des textilen Absorbers	22
6.11. Testung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Membrane mit Gegenüberstellung der Verdunstungsleistung des textilen Absorbers	22
6.12. Testung der Kondensation aus feuchter, heißer Luft in einem kalten Wasserbad.....	23
6.13. Konzept und Bau eines Funktionsmodells mit 0,5 m² Kollektorfläche und Evaluierung	23
7. Ausblick und Projektperspektive	25
8. Literaturverzeichnis	26

1. Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund zunehmender Wasserknappheit und des Klimawandels sowie der Notwendigkeit den weltweiten CO₂-Ausstoß zu reduzieren, war es Ziel dieses Projekts Meerwasser dezentral [1] mit einem kostengünstigen mobilen autarken textilen Modul mithilfe von Sonnenenergie zu entsalzen.

Um die neu entwickelte textile Wasserentsalzungsanlage zu bewerten, wurden zahlreiche Untersuchungen im Labor mit eigens für das Projekt entwickelten Solarprüfständen durchgeführt.

Für die Wirkungsweise des Systems ist dabei die Verdunstungsenergie maßgeblich in Kombination mit solarthermischer und solarelektrischer Energie [2]. Die Laborergebnisse mit den verschiedenen Demonstrator-Varianten zeigten einen statistisch signifikanten Vorteil der Salzwassertransport und -verdunstung über textile Strukturen, die gleichzeitig Sonnenlicht absorbieren.

Im Anschluss an die Auswertung wurde ein Konzept zur Entsalzung entwickelt, welches auf Basis der Verdunstung von Meerwasser über schwarze Dochte und der Kondensation durch Nutzung des Meeres als Wärmesenke beruht.

Die gravimetrisch bestimmte Kondensatmenge konnte durch Ventilation und eine Kondensatfalle gesteigert werden. Die Ergebnisse indizieren, dass ein solares Reinigungssystem für Salz- und/oder Schmutzwasser mit Nutzung überwiegend textiler Materialien möglich und sinnvoll ist. Ein solches System kann flexibel zu Land und zu Wasser zum Einsatz kommen.

2. Ausgangssituation

Derzeit haben 1 Milliarde Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Nur bei etwa 3 % der insgesamt auf der Erde verfügbaren Wassermenge handelt es sich um Süßwasser. In den letzten 50 Jahren hat sich die Weltbevölkerung von 3 Milliarden auf 6 Milliarden Menschen verdoppelt, der Wasserbedarf ist in diesem Zeitraum um 350% gestiegen. Prognosen zufolge werden im Jahr 2050 etwa 9 Milliarden Menschen auf der Erde leben. Um dieses Problem bewältigen zu können, muss mehr Süßwasser gewonnen werden – idealerweise auf ressourcenschonender, regenerativer Basis. Heute gibt es weltweit mehr als 13.000 Meerwasserentsalzungsanlagen, die täglich rund 50 Milliarden Liter Trinkwasser produzieren. Sie decken ein breites Spektrum zwischen Groß- und Kleinanlagen, energieintensiven, fossilen und regenerativ betriebenen Anlagen und, ökologisch sinnvollen und ökologisch problematischen Anlagen ab.



Abbildung 1: Energieintensive Entsalzungsanlage (Foto: iStock/tifonimages)

Der Schwerpunkt liegt auf den arabischen Ländern, Asien und Nordamerika, aber auch eine europäische Stadt wie Barcelona könnte ohne Meerwasserentsalzung nicht überleben. Die Meerwasserentsalzung basiert vor allem in arabischen Ländern auf großtechnischen Anlagen, deren „Energiehunger“ große Umweltprobleme nach sich zieht.

Geförderte Forschungsprojekte in Europa, wie die Meerwasserentsalzungsanlage auf der griechischen Insel Iraklia, die 300 Insulaner mit Trinkwasser und erneuerbaren Energien (Wind, Sonne) versorgt, weisen den Weg zu dezentralen, bedarfsgerechten, wirtschaftlichen und vor allem regenerativen Anlagen.



Abbildung 1: Entsalzungsanlage auf den Kykladen, Griechenland (Foto: iStock/Yoeml)

3. Internationaler Stand der Technik, konkurrierende Produkte und Verfahren

Die älteste und technisch am wenigsten anspruchsvolle Form der Meerwasserentsalzung ist die Verdunstungstechnik. Ein Beispiel dafür ist die von einem deutschen Ingenieur speziell für Entwicklungsländer entwickelte Technologie des „Watercone“. Diese Technologie hat nun auch im Bereich Outdoor-Aktivitäten/-Forwarding Einzug gehalten und wird dort als Notfall-Hilfsmittel-Technologie bei der Wasserversorgung von Langstreckenseglern eingesetzt. Die Technologie des „Watercone“ erlaubt durch ihre Einfachheit die Herstellung großer Mengen entsalzten Wassers entweder durch die Addition separater Konusse oder das Hochskalieren einer einzelnen Anlage.



Abbildung 3: Watercone Modul (Grafik: TAO)

Der transparente Kunststoffkegel kondensiert an der Innenfläche das durch die Sonnenenergie erwärmte Schmutzwasser. Es wird in einer Auffangrinne gesammelt.

- **Mehrstufige Entspannungsverdampfung**

Die am weitesten verbreitete und modernste industrielle Meerwasserentsalzung ist die mehrstufige Entspannungsverdampfung oder das „MSF“ -Verfahren. Dieser Prozess priorisiert die Erzeugung von großen Mengen vor ökologischen, aber auch ökonomischen Zielparametern, was der hohe Energiebedarf von 70 Kilowattstunden pro Kubikmeter Meerwasser zeigt. Der Grund für den hohen Energiebedarf liegt darin, dass bei diesem Prozess das Meerwasser unter niedrigem atmosphärischem Druck und bei hohen Temperaturen von mehr als 110 Grad Celsius verdampft wird.

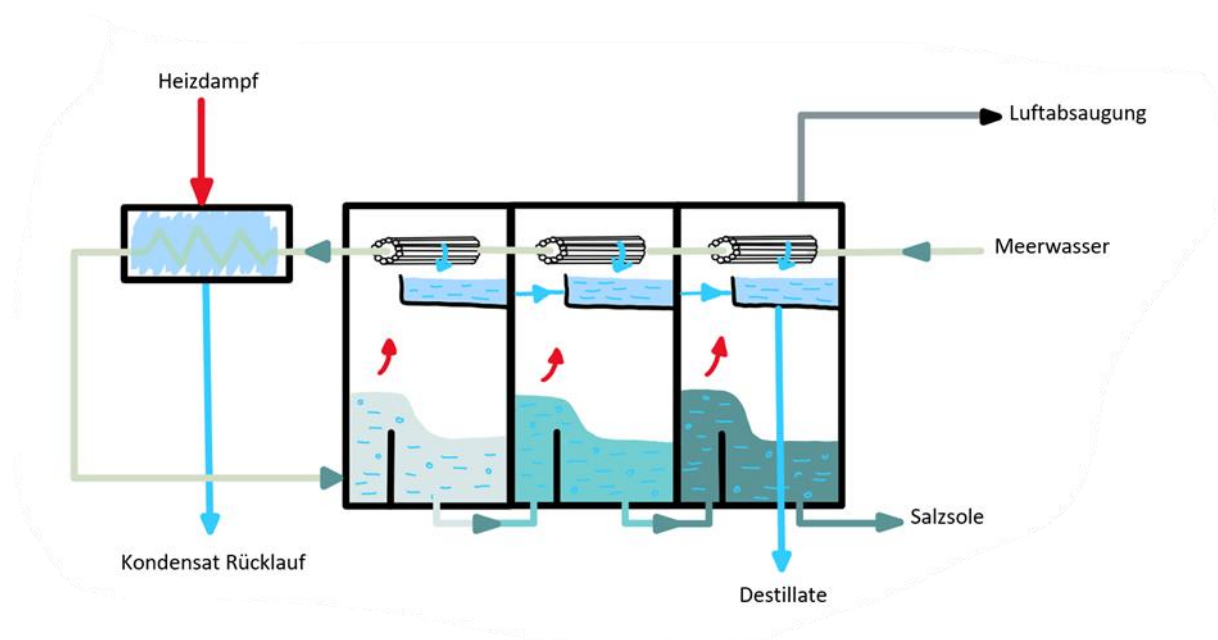


Abbildung 4: Schema einer Reihe von miteinander verbundenen Verdampferkammern

Das Schema zeigt, dass mehrere Verdampferkammern in Reihe geschaltet sind, wobei die Konzentration der nach der Kondensation verbliebenen Sole von Kammer zu Kammer ansteigt bis sie schließlich aus dem System entfernt wird. Bei diesem Verfahren verfügt jede Kammer über einen Kondensator in Form eines Rohres, auf dem der Wasserdampf kondensiert und in einem Sammelbehälter aufgefangen wird. Am Ende des Prozesses bildet die Summe der jeweiligen Kondensatmengen das Destillat, d. h. die produzierte Frischwassermenge.

MSF-Anlagen sind der Industriestandard und versorgen Saudi-Arabien und Lanzarote mit Trinkwasser. Diese Anlagen werden mit Gas-, Öl- oder Kohlekraftwerken kombiniert, die die benötigte Energie bereitstellen. Die Stromversorgung der Meerwasserentsalzungsanlage hinterlässt einen großen CO₂-Fußabdruck auf der Erde.

- **Umkehrosmose**

Kleinere Anlagen - darunter regenerativ betriebene Anlagen wie die Meerwasserentsalzungsanlage auf der griechischen Insel Iraklia - arbeiten nach dem Prinzip der umgekehrten Osmose. Während unter Osmose ein natürlicher und automatischer Prozess verstanden wird, bei dem zwei Flüssigkeiten mit unterschiedlichem chemischen Potential dies über eine semipermeable Membran ins Gleichgewicht bringen und einen osmotischen Druck auf die Membran ausüben, übt die Umkehrosmose Druck auf eine Flüssigkeit aus, um gelöste Moleküle (in diesem Fall Salzionen) über eine Membran von der Flüssigkeit zu trennen.

Aufgrund der Anfälligkeit der verwendeten Membranen erfordert die Umkehrosmosetechnologie, dass dem Umkehrosmoseprozess in der Regel mehrere Filtrations-

prozesse vorausgehen, um zu verhindern, dass Partikel die Membran verletzen, kontaminieren oder verstopfen.

Zusammen mit den hohen Kosten der Membranen macht der Filtrationsprozess das Verfahren komplex, kostenintensiv und vor allem störanfällig.

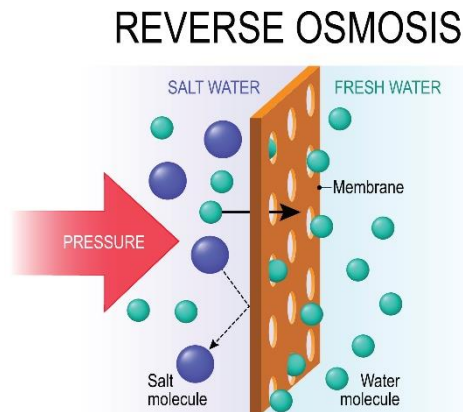


Abbildung 5: Darstellung des Umkehrosmoseprinzips (foto: iStock/ttsz)

Die nach dem Umkehrosmose-Verfahren arbeitende Iraklia-Entsalzungsanlage hat eine Kapazität von 70 Kubikmeter Frischwasser pro Tag. Die Anlage wurde für knapp 3 Millionen Euro errichtet, konnte aber aus politischen und vertraglichen Gründen nie in Betrieb genommen werden. Neben solchen mittelgroßen Anlagen kommt die Umkehr-Osmose-Technik auch in kleinen, mobilen Anlagen zum Einsatz, die vor allem bei Katastrophenfällen eingesetzt werden.

Witt Solar Energie projiziert Meerwasserentsalzungsanlagen nach dem Verdunstungsverfahren. Dabei wird in einer künstlich angelegten, flachen Lagune Meerwasser unter einer transparenten Isolierfolie soweit durch die Sonne erhitzt, dass das Meerwasser verdunstet. Der entstehende Wasserdampf wird mittels Lüfter zu einer Kühlfassade transportiert, wo er zu salzfreiem Wasser kondensiert.

Solar Springs, Freiburg produziert kleinere solarthermische Entsalzungsanlagen. Dabei kommt das Verdampfungsverfahren mit entsprechend hohen Verfahrenstemperaturen zum Einsatz. Um eine Verunreinigung des Kondensates durch Wassertropfen (statt Wasserdampf) zu verhindern, wird der Wasserdampf über eine dampfdurchlässige (aber wasserundurchlässige) Membran gefiltert. Die angewandte Technologie ist sensibel für Schäden durch aufkonzentrierte Salzlösungen und für die Bildung von Salzkristallen innerhalb der Anlage.

Die Analyse des Stands der Technik zeigt, dass für kleinere Anlagen somit noch ein Entwicklungsbedarf für eine bezahlbare und sichere und energieunabhängige Technologie besteht. Neben den oben genannten Verfahren gibt es weitere Entsalzungsverfahren wie das Einfrieren oder die Elektrodialyse, die noch keine Marktbedeutung erlangt haben.

Im Gegensatz dazu arbeitet das vorgeschlagene neue System nach natürlichen Prinzipien durch Verdunstung, wie man es von den Wolken durch Verdunstung und Kondensation (Regen) kennt. Das Kondensat aus der Verdampfung (Destillation) unterscheidet sich vom Kondensat aus Verdunstung nicht grundsätzlich. Allerdings besteht bei der Verdampfung ein größeres Risiko, dass das Kondensat aufgrund der Tröpfchenbildung im Wege des Verdampfungsprozesses und dem Vorhandensein von Nassdampf durch Salzanteile kontaminiert wird.

Was mögliche Vorbehalte des Verbrauchers gegenüber destilliertem Wasser angeht, so kann das Wasser nach dem Verdunstungsprozess in der Anlage nach Belieben durch einfache Mittel mineralisiert werden; dies ist jedoch nicht notwendig, da der Mensch bei einer normalen, ausgewogenen Ernährung zahlreiche Mineralien zu sich nimmt, die im Körper verarbeitet werden müssen. Basisches oder destilliertes Wasser trägt positiv dazu bei, dass eine übermäßige Mineral- und Salzzufuhr im menschlichen Körper neutralisiert und ausgeschieden wird. Bsp.: Die Chinesen trinken fast ausschließlich destilliertes Wasser, nehmen jedoch die benötigten Mineralstoffe durch ihre vielfältigen Gerichte (Gemüse, Salat, Fruchtsäfte) wieder zu sich. Das Thema „Mineralisierung“ würde in der zweiten Phase des Antrags bearbeitet werden.

4. Zielsetzung des Vorhabens

Die Ziele des Projektes waren Entwicklung, Aufbau und Erprobung einer autarken, solar-betriebenen formflexiblen textilen, wartungsarmen Meerwasserentsalzungsanlage auf Basis von solarer Verdunstung. Die Anlage ist im Meer verankert und kann für einzelne oder mehrere Haushalte oder Kleinunternehmen Trinkwasser produzieren. Das System ist modular aufgebaut und kann an einen unterschiedlich großen Wasserbedarf angepasst werden. Das System ist kostengünstig und kann leicht gewartet werden.

Die projektierte Anlage nutzt ausschließlich die natürlichen Ressourcen der Sonne (Solarthermie und Photovoltaik) sowie die Wärmesenke des Meeres als Energiequellen für die Entsalzung von Meerwasser. Gegenüber herkömmlichen Entsalzungsanlagen wie etwa Mehrkammer-Verdampfungsanlagen oder Umkehrosmoseanlagen, die hohe Mengen elektrischer oder fossiler Energie benötigen, wird mit diesem Anlagentyp ein sehr hohes Einsparpotential an CO₂ realisiert. Dazu kommt ein Verdunstungsverfahren, das sich an dem natürlichen Prinzip des Regens orientiert. Dadurch erfolgt praktisch keine Aufkonzentration von Salz in einer Lake und eine Schädigung der Meeresfauna beim Rückfluss von Meerwasser aus der Anlage. Die Positionierung der Anlage auf dem Meer verbraucht keine Fläche, die als Anbaufläche genutzt werden könnte.

Es ist das Ziel des Projektes, auch Verbrauchern wie kleinen Hotels, kleinen Betrieben oder einzelnen Haushalten den Zugang zu Trinkwasser aus entsalztem Meerwasser

zu ermöglichen. Die verglichen mit bisher verfügbaren Anlagen geringere Produktivität der Anlage mit 30 Litern pro 10 Quadratmetern Kollektorfläche, fördert einen achtsamen Umgang mit Trinkwasser und Brauchwasser.

Aufgrund ihrer Autarkie kann die Anlage überall eingesetzt werden, wo keine fossile Energie verfügbar ist und hat damit große Vorteile zum Beispiel im Katastrophen-Einsatz oder wenn die Trinkwasserleitungen defekt sind.

Mit der Anlage sollte auch an ariden Orten, auf Inseln und in gering bevölkerten Gebieten Trinkwasser zur Verfügung gestellt werden, ohne kostenintensiven und die Umwelt belastenden Transport.

5. Darstellung des Entsalzungskonzeptes

Die projektierte Konstruktion einer Meerwasserentsalzungsanlage stellt sich der äußeren Form nach als Sandwichkonstruktion dar. Die Konstruktion schließt an der Oberseite mit einem Luftkollektor ab, der neben der Kollektorfunktion als Isolationskörper vor Wärmeverlust schützt. Der Luftkollektor ist an der Oberfläche als transluzente Doppelmembran ausgebildet, die durch ein Abstandsgewebe zu einem Hohlkörper ausgebildet wird. Die analoge Seite des Sandwiches bildet die Schwimmplattform, die letztlich die gesamte Konstruktion der Entsalzungsanlage trägt.

Die Meerwasserentsalzungsanlage verfügt über folgende weitere wesentliche Komponenten: Unterhalb der Schwimmplattform wird das entsalzte Wasser in einem Reservoir gesammelt und kann von dort zum Gebrauch oder zur Abfüllung entnommen werden. Dieses Reservoir liegt mit der Unterseite der Schwimmplattform in der Wärmesenke des Meeres und stellt denjenigen Anlagenteil dar, der die Wärmesenke des Meeres als Energiequelle für die Kondensation von Wasserdampf und damit für die Entsalzung von Meerwasser nutzt.

Das Meerwasser seinerseits wird über eine Pumpe oder über Kapillare aus textilen Werkstoffen in ein Behältnis transportiert, welches seinerseits aus textilen Werkstoffen besteht und das unterhalb des Luftkollektors mit einer gasdurchlässigen Membran abschließt. Diese Membran lässt Wasserdampf passieren, hält Wasser zurück und verhindert das Schwappen des Wassers innerhalb der Anlage bei unruhigem Wellenschlag des Meeres.

Innerhalb des Behälters, der das Meerwasser aufnimmt, befindet sich der Absorber für das Sonnenlicht. Dieser Absorber besteht aus einem schwarzen textilen Material.

Der erzeugte Wasserdampf entweicht über die gasdurchlässige Membran und wird durch den Volumenstrom eines Lüfters in Richtung der Kondensationsflächen innerhalb der Wärmesenke des Meerwassers am Fuß der Anlage transportiert. Die benötigte Außenluft wird oberhalb der Wasseroberfläche von der Seite der Anlage durch Lüfter der Anlage zugeführt. Die hierfür benötigte elektrische Energie kommt von einem PV- Modul auf der Oberfläche der Anlage. Die Anlage ist derart konzipiert, dass

bei Wellengang kein Meerwasser durch die Luftzufuhr eindringen kann, da die Luftzufuhr am oberen Teil der Anlage eingebaut wird. Der verwendete Ventilator ist zudem (Meer)wasserfest.

Die nachstehende Skizze zeigt zuoberst eine transluzente Abdeckung, die der Wärmedämmung durch Reduzierung der Konvektionsverluste dient. Unmittelbar darunter liegt das flache Meerwasser-Reservoir mit einem Solarabsorber. Das Wasser wird solange erwärmt, bis der Wasserdampf durch eine semitransparente wasserdampfdurchlässige Membran oder über Dochte nach oben hindurch diffundiert. Die feuchte, warme Luft wird nach unten in die Kondensationskammer geführt, wo die Wärmeenergie an das Meerwasser effizient abgegeben wird. Das so einfach entsalzte Wasser wird angesammelt und bei Bedarf abgepumpt. Die Wärme der feuchten Luft wird über einen einfachen Wärmetauscher an das frische Meerwasser abgegeben, das dadurch vorerwärmt wird. Die auskondensierte Umluft wiederum wird beim Aufsteigen an der abgehenden Sole vorerwärmt. Diese Maßnahmen erhöhen die Effizienz der Anlage.

Zu Zufuhr des frischen Meerwassers erfolgt kontinuierlich und wird anhand der Verdunstungsleistung und der gewünschten Konzentration der Sole automatisch durch einfache Mechanismen eingestellt. Die Sole wird kontinuierlich abgeleitet. Damit wird einer Salzverkrustung vorgebeugt.

Regeneration und Einsatz der Anlage

Vorgesehen ist eine tägliche Reinigungsdurchspülung. Da das Meerwasser nicht verdampft, sondern lediglich verdunstet, gehen wir davon aus, dass keine Salzkristalle und keine Sole entstehen, sondern lediglich geringe Aufkonzentrationen von Salz in Form von Belägen. Die projektierte Anlage soll dauerhaft im Meer verankert werden, vorzugsweise in Ufernähe und in Mündungsgebieten. Dadurch ist eine Zugänglichkeit der Anlage von Land aus gewährleistet. Ein An-Land-Bringen der Anlage wird nur bei umfangreicheren Wartungsarbeiten notwendig sein. Die Leichtbaukonstruktion der Anlage erleichtert diesen Vorgang wesentlich.

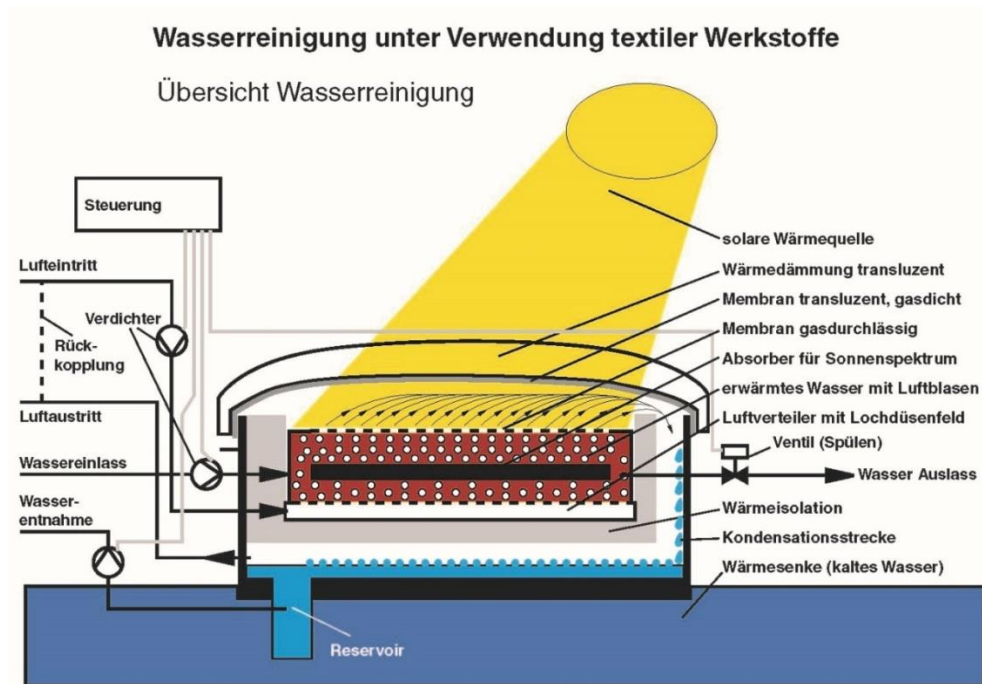


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Konzeptes zur Wasserreinigung unter Verwendung flexibler Werkstoffe

Das System nutzt also zwei "Energiequellen". Die natürliche Sonnenwärme als Verdunstungsenergie in der Anlage sowie die kühlende Wärmesenke des Meeres für die Kondensation des Wasserdampfes zu Trinkwasser.

Die Kondensation des Wasserdampfes erfolgt über das Inkontakt-Bringen des Wasserdampfes mit der Wärmesenke des Meeres durch Wärmeaustausch. Das entsalzte Wasser wird zunächst in der Anlage gesammelt (Trinkwasserreservoir) und in regelmäßigen Abständen durch solargestützte Pumpen an Land gebracht.

6. Versuchsergebnisse

6.1. Feinkonzeption der Anlagentechnik, der Einzelsysteme und der Modulbauweise

Die gewählte Anlagentechnik für die Demonstratoren in diesem Projekt wurde an der vorhandenen Infrastruktur (Hallengröße bei TAO, solare Energietechnik, Vorhandensein einer Wärmesenke) ausgerichtet. Dabei wurde von Anfang an das Anlagenkonzept der Prüfung unterzogen, ob die gewählte Technologie auch für den Off-Shore Einsatz - etwa in ariden Gebieten - geeignet sein kann. Ein vom Vorhandensein einer Wärmesenke - insbesondere der Wärmesenke „Meerwasser“ - unabhängiges Anlagenkonzept würde die Einsatzmöglichkeiten des Systems drastisch erweitern. Aus diesem Grund wurde von vornherein konzeptionell die Möglichkeit eines verstärkten Einsatzes auch der Photovoltaik als substantielle Energiequelle - neben der solaren Wärmeenergie - in Betracht gezogen.

Zur optimalen empirischen Beobachtung der Prozessabläufe wurde darauf verzichtet, das derzeitige Anlagensystem mit aufwendigen (im realen Betrieb aber notwendigen) Dämmungen zu versehen. Diese Dämmung kann leicht nachträglich angebracht werden.

6.2. Entwicklung der Anlagenkomponenten

Das System zur Wasserreinigung und Wasserentsalzung besteht aus den wesentlichen Komponenten:

- Wasserreservoir,
- Wasserzulauf,
- Wasserablauf,
- Solarabsorber,
- transparente Abdeckung des Wasserreservoirs,
- künstliche Wärmesenke,
- Luftblaseninduktion zur Vergrößerung der Oberfläche des zu reinigenden Wassers,
- Lüfter zum Transport feuchter Luft zur Wärmesenke und
- Strom- und Lüfteranschlüsse, Netzteil als PV-Energieersatz.

Die selektierten Komponenten wurden beschafft und vor dem Einbau auf Eignung überprüft.

6.3. Absorber- Meerwasserreservoir mit Zu- und Ablauf, ohne Salzkristallisation

Für das Meerwasserreservoir wurde eine transparente Kunststoffwanne gewählt. Die Transparenz des Reservoirbehälters ermöglicht die Sichtkontrolle der Prozessabläufe. Als Absorber wurden zwei Materialien ausgewählt, die neben der Absorberfunktion auch dafür sorgen, dass ein Schwappen des Wassers im Behälter (in situ Wellenbewegungen des Meeresswassers) erschwert wird. Ausgewählt wurde eine 2 mm starke Neoprenmatte sowie ein gewobenes Abstandsgewebe gleicher Stärke.

Für die Luftblaseninduktion wurden handelsübliche „Sprudelsteine“ ausgewählt und zwischen dem Abstandsgewebe und der Neoprenmatte platziert und mittels einer elektrischen Pumpe mit Luft versorgt.

6.4. Zufuhr des frischen Meerwassers über kapillare Textilstrukturen oder mit einer Pumpe mit PV-Strom

Die Versuche zu Bestimmung von Wassertransport des Meerwassers über kapillare Textilstrukturen wurden an den DITF durchgeführt. Mittels Steighöhenverfahren nach DIN 53924 wurden die Dochte bewertet.

Für eine Kapillaraszension muss das Material über ausreichend enge Kapillarkanäle verfügen und Wasser muss einen Kontaktwinkel von unter 90° gegenüber dem Material in Luft ausbilden. Die Porengrößenverteilung im Vlies oder im Docht korreliert stark mit den Durchmessern der verwendeten Fasern. Daneben spielen die Faseroberflächenspannung, Faserquerschnitt und Faseroberflächenrauigkeit eine große Rolle bei der Ausbildung des Kontaktwinkels eine große Rolle.

Nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Test des Saugverhaltens.

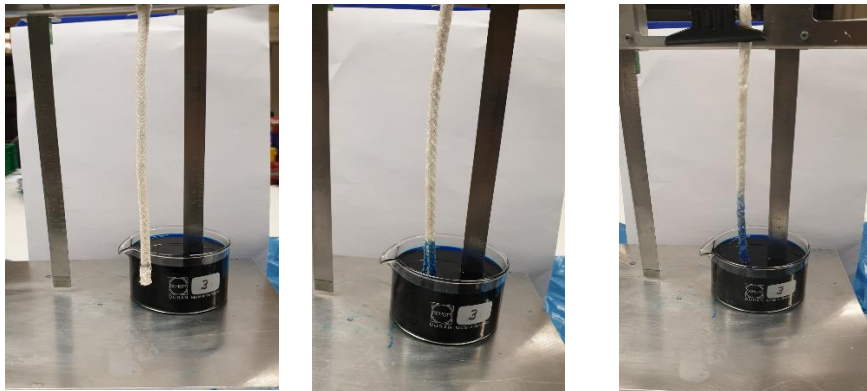


Abbildung 7: Steighöhenverfahren nach DIN 53924

Der Dochteffekt ist nach Masoodi et al. hauptsächlich von den folgenden Einflussgrößen [3] abhängig:

$$m = \varepsilon \rho R_w^2 h_f \quad D_e = \frac{D_h^2}{D_c} \quad h_t = \sqrt{\frac{\gamma D_c \cos(\theta)}{4\mu} t}$$

R_w Dochtradius; D_h hydraulischer Durchmesser; D_c Kapillardurchmesser; θ Kontaktwinkel ($^\circ$), γ Oberflächenspannung vom Wasser (N/m), μ Viskosität vom Wasser (Kg/(m s)), ρ Dichte vom Wasser (Kg/m³), ε Porosität des Dochtes

Demnach nimmt die Flüssigkeitstransportgeschwindigkeit mit feiner werdenden Kapillardurchmessern (im Wesentlichen durch die Garnfeinheit bestimmt) sowie dickeren Dochten zu. Die Dochte werden auf Rundflechtmaschinen hergestellt. Während des Flechtprozesses kann das Geflecht mit einem zulaufenden Garn im Kanal hergestellt werden, was bei der Herstellung von Bewässerungsdochten für Pflanzen gemacht wird. Durch die Klöppelanzahl und die Garnfeinheit können die

Geflechte sehr fein bis sehr grob hergestellt werden. Das klassische Zopfmuster entsteht mit drei Fäden und die Fäden können zusätzlich gefacht werden.

Damit Wasser nachströmen kann, wenn der Docht seine Steighöhe und Wasseraufnahmekapazität erreicht hat, muss aufgenommenes Wasser wieder verdunsten oder von einer anderen saugfähigen Struktur aufgenommen werden. Für eine direkte Verdunstung aus dem Docht heraus oder die Wasseraufnahme durch eine andere saugfähige Struktur, aus der heraus das Wasser verdunstet wird, ist allerdings eine große Dochtmantelfläche vorteilhafter. Das bedeutet, dass eine Aufteilung des Flüssigkeits-Transports durch mehrere dünnere Dochte die Menge des verdunsteten und somit angesaugten Wassers gegenüber weniger dickeren Dochten erhöht.

Die Abbildung 8 zeigt die Steighöhe zweier Dochtvarianten zu fünf verschiedenen Zeitpunkten. Es ist ersichtlich, dass das Wasser im Glasfaserdocht schneller und höher steigt, als in dem Baumwolldocht.

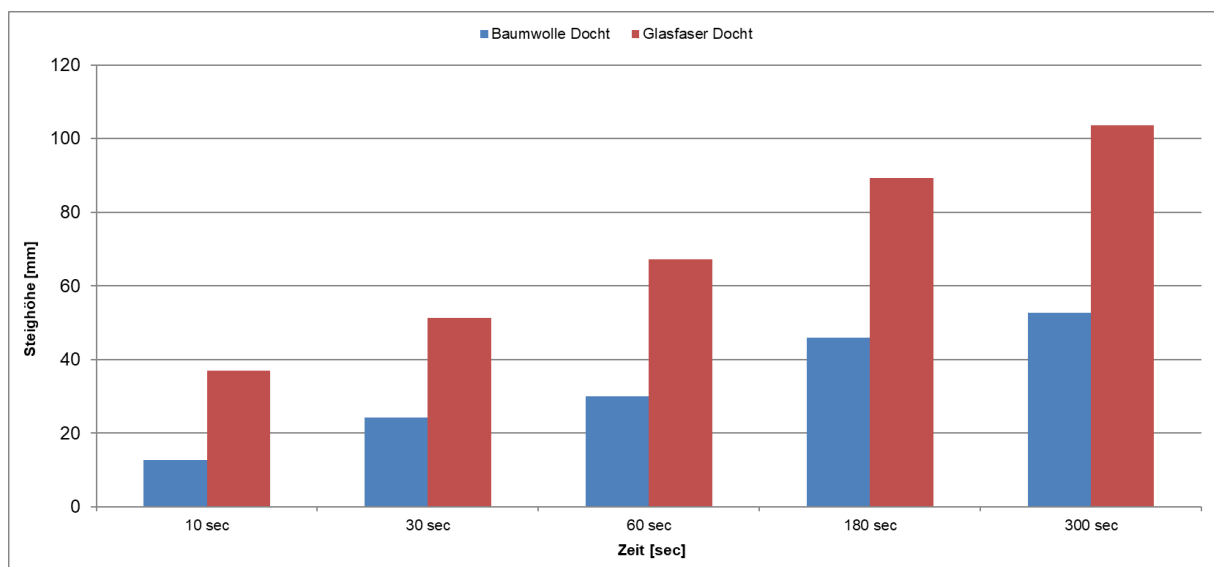


Abbildung 8: Ergebnisse Steighöhenverfahren nach Norm DIN 53924

Bei dem Screening von Standarddochten für die Bewässerung wurde die Glasfaserdochtvariante GFO64510-8 mm aus 9µm feinen (aber nicht lungengängigen) Filamenten mit einer Transportrate/Verdunstungsrate/Weitertransport von 6 ml/h pro Docht bei einer Steighöhe von 25 cm ausgewählt. Bei einer Dochtdichte von 33% bezogen auf die projizierte Fläche des Kollektors wird die effektive Verdunstungs- und Solarabsorber-Fläche derart vervielfacht, dass pro Quadratmeter Kollektorfläche bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m², Wassertemperaturen von 42°C sowie einer 50°C warmen Luftströmung bis zu 20 Liter Salzwasser pro Stunde verdunstet werden konnten.

6.5. Solarabsorber mit definiertem Wasseraufnahmevermögen.

Folgende Textilien wurden hinsichtlich der Wasseraufnahme untersucht:

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	PES 200	200 g/m ² 100% PES Hydroponics Nonwoven
2	CV 50	Vliesstoff Spunlaced 50 g/m ² 100% Viskosefaser
3	CV 200	Vliesstoff Nadelvlies 200g/m ²
4	VIS/PP 495	Viskose/PP 495 g/m ²

Die Ergebnisse des Wasseraufnahmevermögens der Textilien sind nachfolgend dargestellt.

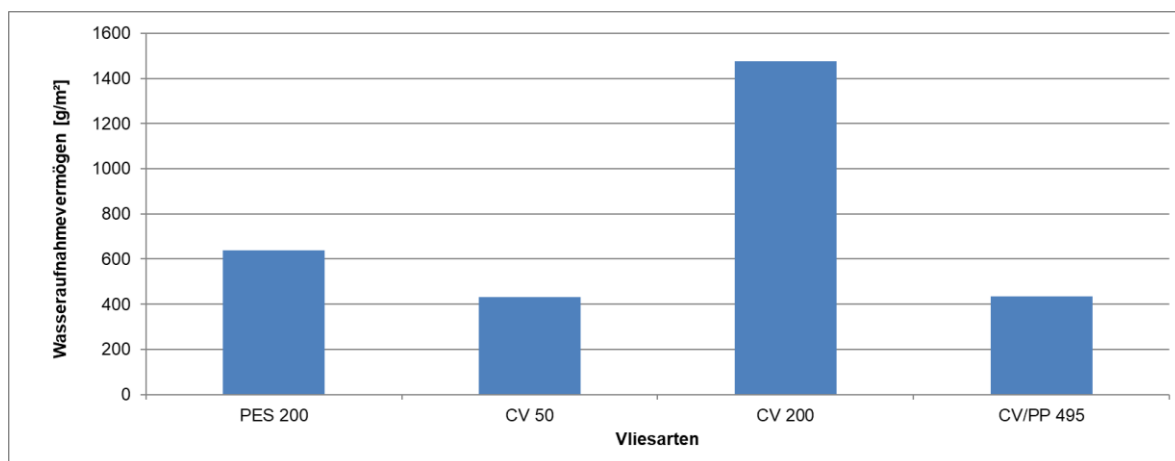


Abbildung 9: Ergebnisse Wasseraufnahmevermögen von textilen Flächengebilden nach Norm DIN 53923

Zusätzlich zu den untersuchten Vliesen kamen ein schwarzes Abstandsgewirk sowie ein PES-Gewebe mit schwarzer EPDM-Beschichtung zu Anwendung. Beide Materialien haben sich als geeignet dafür erwiesen als Barrieren gegen das Schwappen von Wasser zu dienen. Hierfür sorgte beim Abstandsgewirk insbesondere die dreidimensionale Struktur des Materials.

Die Durchflussfähigkeit im Sinne des Durchsatzes von Meerwasser durch das System (Eingang und Ausgang) hängt direkt von der Intensität der solaren Einstrahlung ab. Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften der Absorbermaterialien stellen diese für den Durchfluss kein Hemmnis dar. Die verwendeten Absorbermaterialien sind salzwasserbeständig.

6.6. Wasserdampfdurchlässige Membran und hohe Durchsatzleistung und Temperaturfestigkeit

Das Anlagenkonzept sah – ebenfalls als Hindernis für ein Überschwappen von Salzwasser – die Verwendung einer dampfdurchlässigen und transluzenten Membran vor. Es wurden Versuche mit mehreren Membranen durchgeführt.

Der Versuchsaufbau wurde deshalb so gestaltet, dass Absorber und Sprudelsteine in ihrer Bauhöhe so gering ausgeführt wurden, dass der darüber liegende Raum als Transportraum für Wasserdampf ausreichend dimensioniert werden konnte. Zur Vervollständigung dieser Konstellation wurden in der Folge der verwendete Lüfter, der die feuchte Luft in Richtung der Wärmesenke transportiert und die Wärmesenke selbst – es handelt sich dabei um eine gekühlte Edelstahlplatte – innerhalb des Verdampfungsraumes platziert.

Unter Versuchsbedingungen (Erwärmung der Luft im Inneren der Anlage auf 44 Grad mittels zweier starker Lampen bei einer Wassertemperatur von 42 °C) konnte eine Durchsatzleistung von 1 Liter pro Tag erzielt werden. Dies entspricht unter Berücksichtigung der Anlagengröße (ca. 0,4 m²) und der künstlichen Wärmestrahlung in etwa dem erwarteten Output von 3 Liter pro Tag und Quadratmeter.

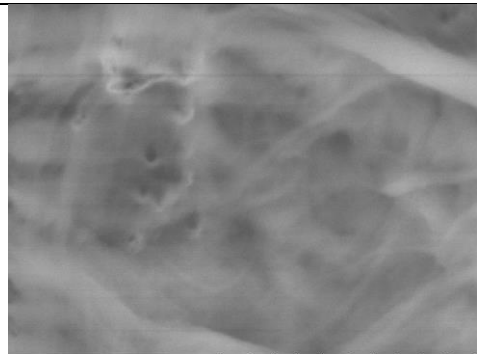
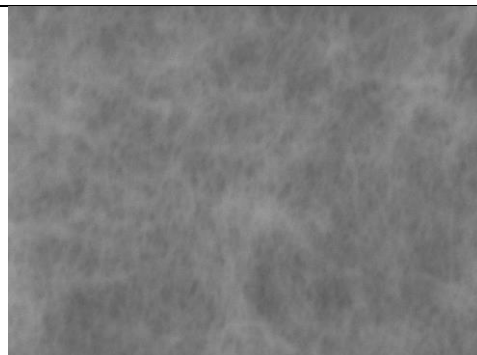
Membranspezifikation	REM- Aufnahme
Filmdicke 40 µm Porosität 60% Flächengewicht 13 g/m ² Dampfdruckdifferenz spezifische Wasserdampf-durchlässigkeit 5,6 g/m ² Pa24h Zugfestigkeit 60-70 N/mm ² PP Membran Lässt kein Licht durch	 <p>DITF-22-1048 Dr. Sarsour</p> <p>L D4,5 x10k 10 µm</p>
Filmdicke 15 µm Porosität 47% Flächengewicht 7,8 g/m ² Dampfdruckdifferenz spezifische Wasserdampf-durchlässigkeit 6,9 g/m ² Pa24h Zugfestigkeit 68-100 N/mm ² Wet-processed PE Membran ohne Beschichtung Lässt Licht durch.	 <p>DITF-22-1045 Dr. Sarsour</p> <p>L D4,5 x10k 10 µm</p>

Abbildung 10: Verwendete Membrane

6.7. Ventilation für das Umluftsystem mit Photovoltaikstrom

Das gewählte Umluftsystem wurde mehrfach verändert und an die beobachtbaren Effekte angepasst. So befand sich anfangs der Lüfter außerhalb des Wasserreservoirbehälters und schließlich im Innern dieses Behälters. Der Lüfter wurde mit Rücksicht auf die indoor betriebene Versuchsanlage mit Netzstrom und nicht mit solar erzeugtem Strom betrieben. Die Leistung des Lüfters und der erzeugte Volumenstrom wurden der Funktion des Transportes feuchter Luft in Richtung auf die Wärmesenke angepasst.

Die Wärmesenke ihrerseits besteht aus einer Edelstahlmetallplatte in gegenüberliegender Position zum Lüfter. Die Edelstahlmetallplatte wird rückseitig durch einen Kühlkörper, der flüssigkeitsdurchströmt ist, gekühlt. Die abgeführte Flüssigkeit wird durch einen Kühler mit angebauten Ventilatoren gekühlt.

6.8. Transluzente Wärmedämmung mit Prüfung der UV-Beständigkeit

Das Wasserreservoir wird nach oben durch eine transparente Folie abgeschlossen, die das System vor einem Luftaustausch zwischen Innen und Außen schützt. Für diese Folienbarriere wurde das Material ETFE gewählt, das eine maximale Transluzenz gewährleistet.

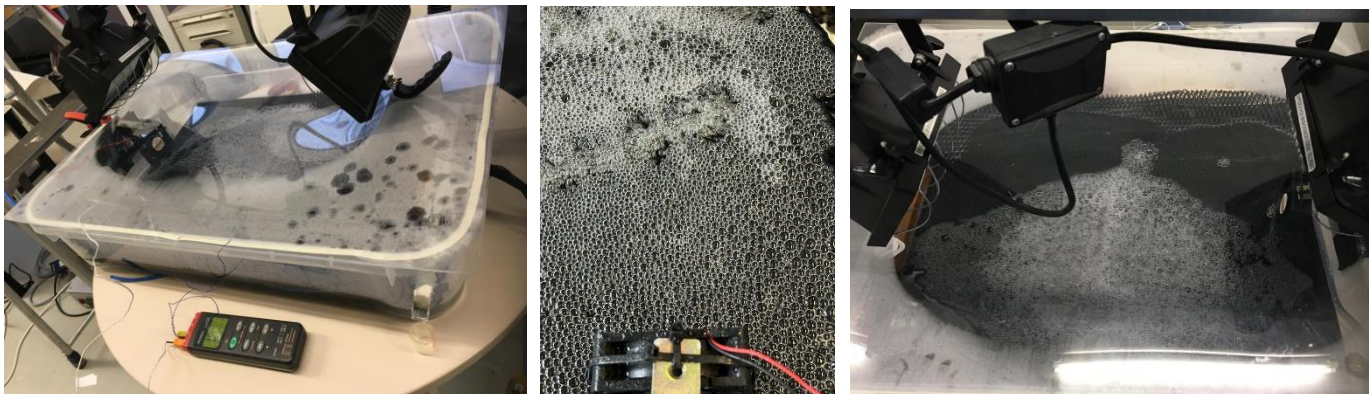


Abbildung 11: Oberflächenvergrößerung durch Luftinfiltration

Die verwendete ETFE-Folie ist aufgrund ihrer Beschaffenheit hochgradig UV-beständig und temperaturbeständig.

Erfahrungen mit diversen transparenten Doppelstegplatten aus Acrylglas haben gezeigt, dass sich die Eigenschaften „Transluzenz“ und „Wärmedämmung“ wechselseitig eher ausschließen. Hierzu haben wir in den anschließend beschriebenen Versuchen nähere Details protokolliert.

6.9. Bau von Prüfständen, um die Anlagenkomponenten und verwendete Materialien zu testen

Dem hier beschriebenen Funktionsmodell sind andere Test-Modelle und Konzepte vorausgegangen, deren Hauptkomponenten Doppelstegplatten aus Acrylglas waren.



Abbildung 12: Das Solarpanel diente zur Energiegewinnung für eine kleine Luftpumpe, um die Durchspülung bzw. die Kondensation innerhalb des Wasserreservoirs zu optimieren und zu beschleunigen.

Die Hohlräume der Doppelstegplatten haben das zu reinigende Wasser aufgenommen, und zugleich wurde das Wasser zu Vergrößerung der Verdunstungsoberfläche mit Luft durchmischt. Am oberen Ende der Doppelstegplatten befand sich ein Sammelrohr, durch welches der gebildete Wasserdampf in Richtung auf eine Wärmesenke transportiert wurde.



Abbildung 13: Die kleine Kondensationsstrecke, gebildet aus Glasstegplatten mit Luftdurchströmung

Die Konzeption und das Prinzip erwiesen sich als sehr effizient, es wurde damit u.a. stark salziges, kontaminiertes Bergbau-Grubenwasser durch Kondensation gereinigt. Es enthielt nach dem Verdunstungs- und Reinigungsvorgang nur noch geringe Parts per Million (ppm):



Abbildung 14: Links sieht man verdunstetes, gereinigtes Wasser aus der TAO-Versuchsanlage mit 6 ppm; rechtes Foto zeigt destilliertes Wasser (aus dem „Bauhaus“) mit 14 ppm.

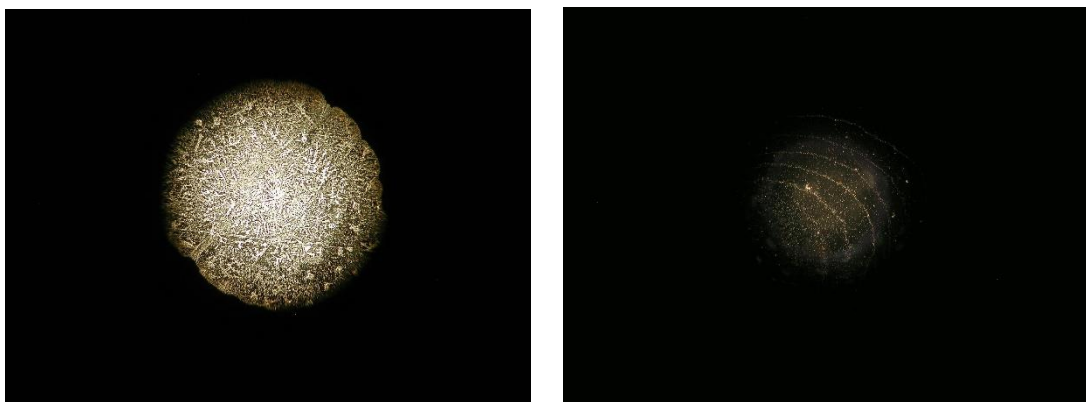


Abbildung 15: Bevor das salzige, sogenannte „Grubenwasser“ durch die TAO-Wasserreinigungsanlage geleitet wurde, ist es unter einem Dunkelfeldmikroskop fotografiert worden (Beispielfoto links). Aufgrund der zahlreichen Beimischungen im Wasser (u.a. Salze, Eisenrost, Kontaminationen) hat das Bergwerkswasser eine starke innere Struktur im Wassertropfen nach der Trocknung auf einem Glasobjektträger. Nach dem Verdunstungs- und Reinigungsprozess untersuchtes Wasser zeigt unter dem Dunkelfeldmikroskop schwache, kaum sichtbare Strukturen (Beispielfoto rechts), da die Beimengungen und das Salz entfernt wurden.



Abbildung 16: Grubenwasser (im Foto rechte Flasche) mit seiner typischen orangegelben Farbe sowie zahlreiche Wasserproben mit unterschiedlichen Kontaminationen (rechts), die in der TAO-Wasserreinigungsanlage gereinigt wurden.

Dasselbe Wasser wurde dann in der TAO-Versuchsstrecke durch solare Energie gereinigt und anschließend wieder unter dem Dunkelfeldmikroskop mit der Methode nach Kröplin und Henschel [4] betrachtet: das Wasser enthält deutlich weniger Verunreinigungen, was optisch sofort zu eruieren ist. Das Wassertropfenfoto nach dem Reinigungsprozess enthält deutlich weniger Strukturen im Inneren des Tropfens und deutlich weniger Ablagerungen (Foto rechts).

Auf die gleiche Art wurden über solare Sonneneinstrahlung in der TAO-Versuchsstrecke kontaminierte Wasser mit CuSO_4 , Zinkbelastung sowie die stark schwefelig schmeckende Quelle Bad Cannstatter Veielbrunnen gereinigt.



Abbildung 17: Ein größerer Versuchsträger mit einem Schwimmponton (für den Einsatz auf dem Wasser) wurde daraufhin konzipiert und gebaut. Mangels solarer Sonneneinstrahlung wurden für diesen großen Versuchsträger innerhalb der Versuchshalle sogenannte Baustrahler als Ersatz für das Sonnenlicht verwendet.

So wirksam diese Verdunstungsanlage auch war, so erwies sie sich in ihren Komponenten und in ihrer Konstruktion gegenüber intensiver Sonneneinstrahlung als anfällig, weil sich die Doppelstegplatten mit der Zeit aufgrund der Wärmeeinwirkung verformten. Aus diesem Grunde wurde diese technische Variante verworfen, war aber als Versuchsträger ideal.

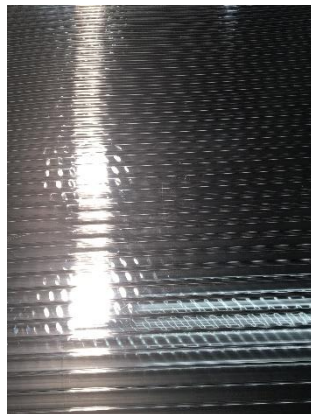


Abbildung 18: Verformungen der Glasstegplatten aufgrund Sonneneinstrahlung und Hitzebelastung

Die letztendlich verwendete ETFE-Folie ist hochgradig UV-stabil und witterungsbeständig. Dazu zeichnet sie eine hohe Transluzenz aus. Darüber hinaus lässt sich dieses Bauteil leicht auswechseln.

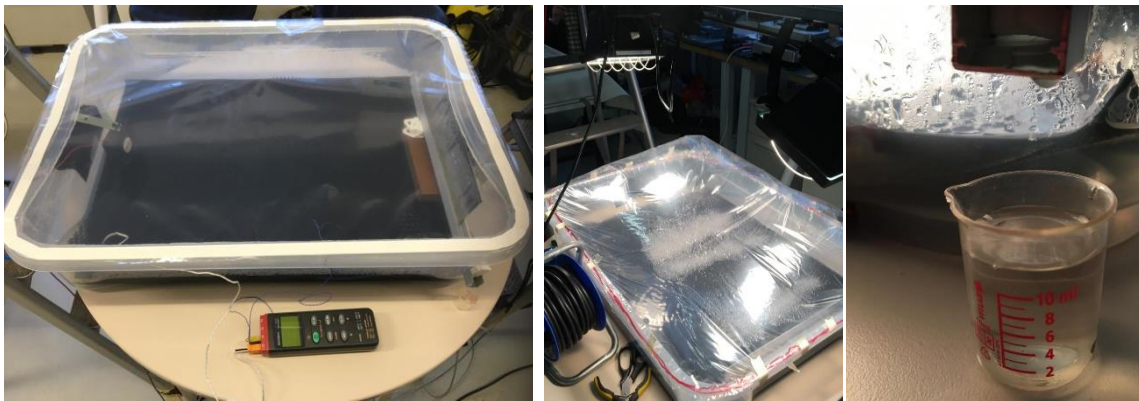


Abbildung 19: Versuchsaufbau textile Verdunstungsanlage

DITF-Laboranlage

Aufgrund der erzielten Ergebnisse beim Wassertransport mit Dochten wurde ein Prüfstand an den DITF aufgebaut. Auf dem solaren Prüfstand ist ein pyramidenförmiger Behälter mit Glasfaserdochten von Typ GFO64510-8mm mit einer Flächenbelegungsichte von 33% (links). Anstelle von Dochten wurde auch eine lichtdurchlässige Membran eingesetzt, die durch eine textile Verdunstungskomponente abgedeckt ist (rechts) und das Kondensat ebenfalls vor Kontamination durch Salzwasser schützt.

Die Wasserverdunstung wird durch solare Erwärmung und erzwungene Konvektion gesteigert. Die Gewinnung von entsalztem Wasser erfolgt durch eine Kondensat-Falle mit Ablauf.

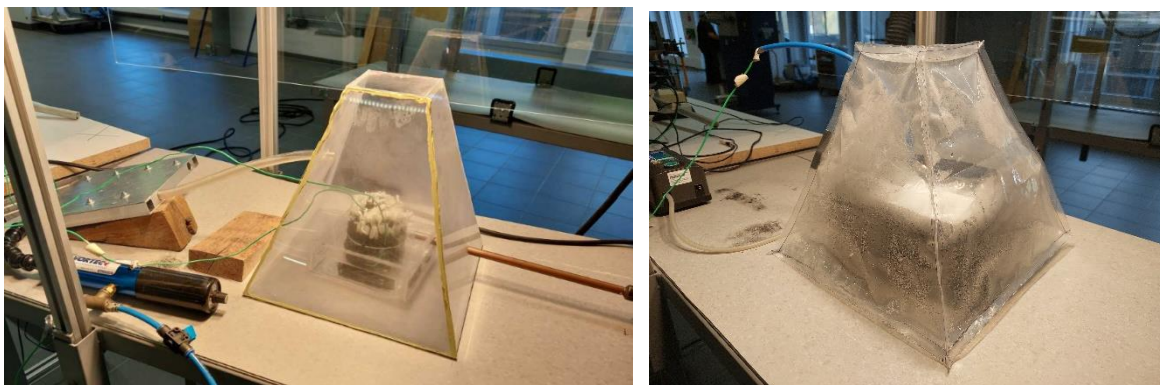


Abbildung 20: DITF -Prüfstand

Mit dem DITF-Prüfstand können Verdunstungsversuche mit Salzwasser (Salzgehalt 3,8 %) bei bis zu 1000 W/m^2 durchgeführt werden.

6.10. Messung der Verdunstungsleistung textiler Absorbermaterialien und Analyse der Verschmutzungsneigung des textilen Absorbers

Die Anlage wurde mit künstlichem Licht betrieben. Dabei wurden Wassertemperaturen von 42 °C erzielt. Dieses vergleichsweise geringe Temperaturniveau – verglichen mit solarer Einstrahlung – erbrachte bereits gute Verdunstungswerte. Diese lagen bezogen auf eine Anlagenfläche von 0,4 Quadratmetern bei über einem Liter gereinigten Wassers pro Tag. Da die Anlage nicht vollständig isoliert werden konnte, sind Verdunstungsniederschläge an Anlagenwänden und an der ETFE-Folie aufgetreten, die dem Ertrag der Anlage hinzugerechnet werden müssen. Hieraus ergibt sich, dass eine prognostizierte Verdunstungsleistung von ca. 3 Liter gereinigtem Wasser pro Tag und Quadratmeter Anlagengröße erzielbar ist.

Über die gesamte Versuchsdauer konnte eine Verschmutzung der Anlage nicht festgestellt werden. Das Anlagenkonzept bedingt, dass eventuell auftretende Kristallisierungen der Absorber oder anderer Bauteile leicht manuell hätten entfernt werden können oder die Anlage nachts durchspült wird.

6.11. Testung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Membrane mit Gegenüberstellung der Verdunstungsleistung des textilen Absorbers

Die Wasserdampfdurchlässigkeiten der Membrane sind unterschiedlich. Mittels textiler Dochte kann jedoch bis zu fünf Mal mehr Salzwasser pro Quadratmeter verdunstet werden, als Membrane pro Quadratmeter imstande sind an Wasserdampf durchzulassen. Bei dem Versuchsssetup wurden Solarstrahlung (künstlich), Wasser- und Lufttemperatur sowie Luftströmungsgeschwindigkeit künstlich gesteigert, um eine bessere Differenzierung zu erreichen.

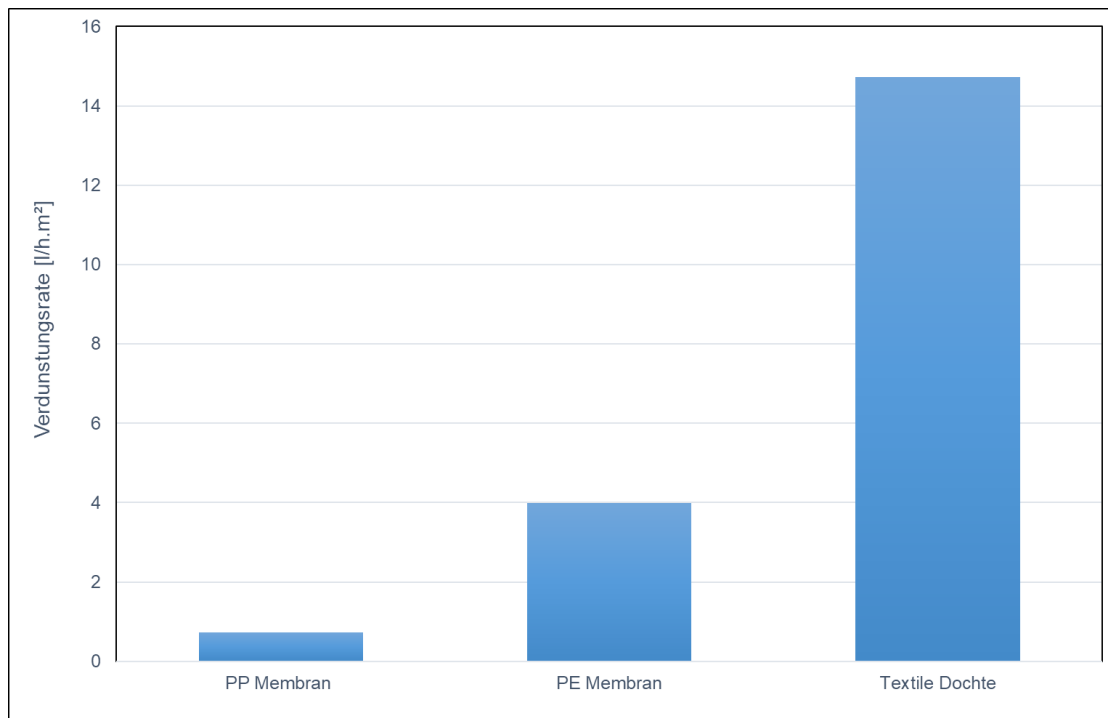


Abbildung 21: Gegenüberstellung der Verdunstungsleistung des textilen Absorbers und der Wasserdampfdurchlässigkeit der Membrane

6.12. Testung der Kondensation aus feuchter, heißer Luft in einem kalten Wasserbad

Das gewählte Anlagenkonzept mit der Verwendung einer elektrisch versorgten Wärmesenkung bietet die Möglichkeit der terrestrischen wie auch der maritimen Anwendung. Im vorliegenden Konzept wurde am Ende der Kondensationsstrecke eine Edelstahlplatte verwendet, die rückseitig mittels eines elektrischen Flüssigkeitskühlkörpers mit angeschlossenen Kühler und Radiatoren gekühlt wird. Es liegen keine Vergleichswerte mit einer Wärmesenke bestehend aus einem kalten Wasserreservoir vor. Allerdings liegen mit der elektrischen Flüssigkeitskühlung konstant kontrollierte Bedingungen für die Kondensation vor.

6.13. Konzept und Bau eines Funktionsmodells mit 0,5 m² Kollektorfläche und Evaluierung

Es wurden mehrere Funktionsmodelle hergestellt (0,5 m²). Insbesondere wurden zwei Modelle betrieben und getestet, welche beide vom Prinzip der Verdunstungsoptimierung durch Induktion von Luft Gebrauch machten. Da sich die Verwendung von Doppelstegeplatten aus Polyacryl aufgrund mangelnder Hitzebeständigkeit als nicht praktikabel erwies, wurde beim hier vorgestellten Konzept hierauf zugunsten eines definierten Verdunstungsraumes verzichtet. Mit der Verwendung einer künstlich erzeugten Wärmesenke konnte zudem gezeigt werden, dass die Reinigung von Wasser mittels solarer Energie auch ohne Zugriff auf eine

Wärmesenke im Meer möglich ist, wenn für den Betrieb der elektrisch erzeugten Wärmesenke genügend elektrische Energie durch Photovoltaik verfügbar ist.

Nach zahlreichen Vorversuchen an den DITF mit verschiedenen textilbasierten Verdunstermodellen bei denen Bauformen, Materialien, Dochte, Wassertemperaturen, Lufttemperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten variiert wurden, wurden die abschließenden Untersuchungen mit einer Pyramiden-Bauweise (Abbildung) durchgeführt, weil damit eine bessere Luftführung realisiert werden konnte. Die Außenluft wird über einen Schlauch durch die äußere transparente Hülle zugeführt, nimmt das aus den Dochten verdunstete Wasser auf und wird schließlich zur Kondensat-Falle geführt.

Um die Grenzen des Systems zu definieren, wurden die Versuche mit maximaler Strahlungsintensität und bereits vorgewärmtem Wasser sowie vorgewärmter Luft durchgeführt, was eine Differenzierung der Versuchsergebnisse erleichtert. Dabei wurden Parameter für die Zuluft- und Salzwassertemperatur gewählt, die mit den in anderen Projekten an den DITF entwickelten Luft- und Wasserkollektoren erreicht werden können. Nachfolgendes Schaubild zeigt die gravimetrisch bestimmte stündliche Leistung des Docht-Verdunster-Demonstrators hochgerechnet auf einen Quadratmeter Kollektorfläche.

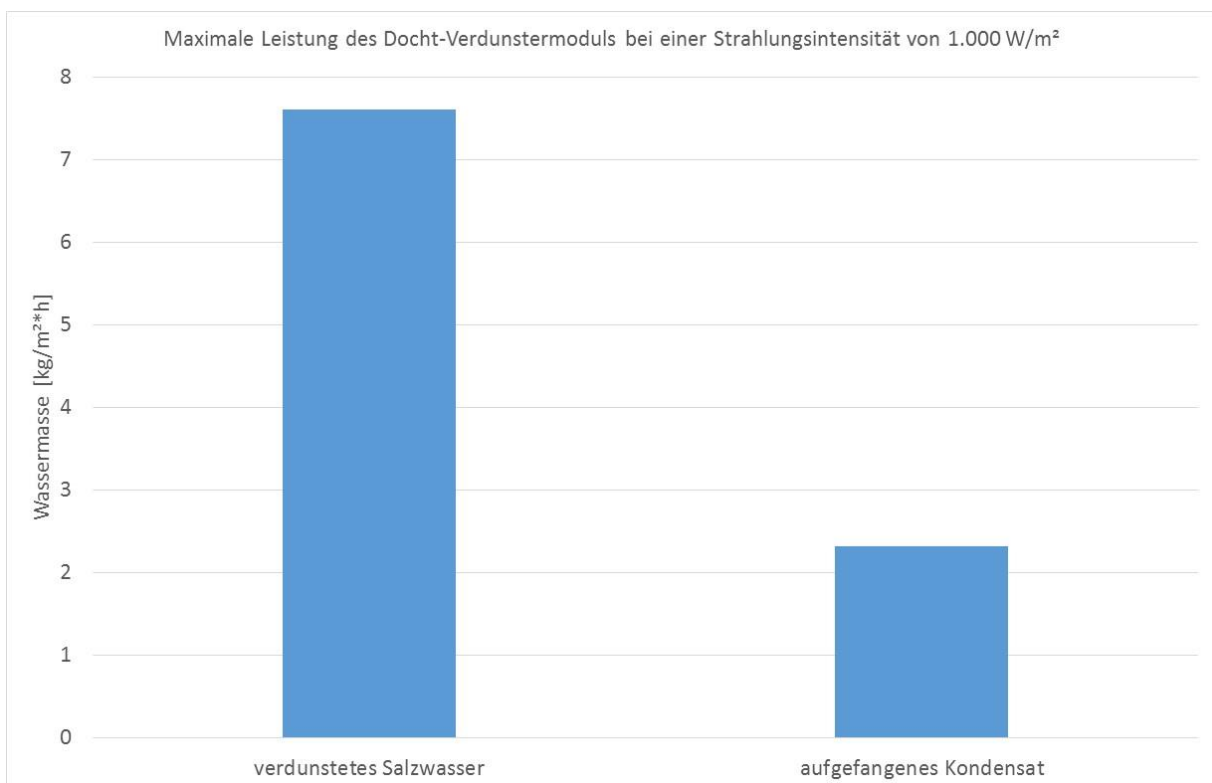


Abbildung 22: Maximale Leistung des Docht-Verdunstermoduls

7. Ausblick und Projektperspektive

Das Projekt einer energieautonomen Wasserreinigungsanlage hat gezeigt, dass auch ohne einen hohen Isolationstechnischen Aufwand gute Produktions- und Wirkungsgrade vor allem durch den Einsatz textiler Strukturen erzielt werden können. Arbeiten von Manikandan et al. [5], Jobrane et al. [6], Essa et al. [7], Hansen et al. [8] oder Alawee et al. [9] bestätigen diesen starken Effekt und das damit verbundene Potential textiler Strukturen oder vergleichbarer Strukturen [10] bei der solaren Destillation von Trinkwasser. Ein Maximum an Isolationsaufwand hätte etwa darin bestanden, den Verdunstungsprozess in einem vakuumgeschützten Raum - beispielsweise einer Vakuumröhre - ablaufen zu lassen. Unter kontrollierten Bedingungen hätte auch in diesem Fall die Schwelle zur Wasserverdampfung (statt der Verdunstung) nicht überschritten werden müssen. Unter diesen Isolationsbedingungen wäre zwar eine deutliche Erhöhung des Produktionsvolumens möglich gewesen, allerdings um den Preis eines extrem gesteigerten Aufwandes für die Isolation in technischer und monetärer Hinsicht. Desweiteren kann – wie in den Versuchen gezeigt – das Produktionsvolumen durch eine Vorkonditionierung von Luft und Wasser erreicht werden, in dem das System mit einem textilen Luft- sowie Warmwasserkollektor für Zuluft und Zulauf erweitert wird.

Das von TAO gewählte Verfahren lässt indessen die folgenden Perspektiven für weitere Entwicklungen und Anwendungen zu:

Die von TAO gewählte Konstruktion eines Demonstrators (Wasserreservoir, transparente Abdeckung, Luftinfiltration, Absorber, Kühler für die Kondensation, solare Energieversorgung) zusammen mit den an den DITF entwickelten textilen Materialien für den Feuchtetransport, die Verwandlung von Sonnenlicht in Wärmeenergie und die Steigerung der Verdunstung lässt durchaus die Perspektive eines insgesamt kunststoffbasierten und zusammenfaltbaren Konstruktes zu, welches etwa an Bord von Segelyachten, in Expeditionsfahrzeugen oder ganz generell als Notfallequipment bei Ausfall sonst zugänglicher Versorgungssysteme zum Einsatz kommen kann.

In diesem Sinne wurde auch der allseits bekannte Water-Cone verwendet. Ein solches System würde in der Backskiste untergebracht werden und bei Ausfall des Watermakers zum Einsatz kommen. In dieser Version würden alle Elemente des Systems - mit Ausnahme des elektronischen Kühlsegments - aus Kunststoff bestehen und dafür Sorge tragen, dass das System gut zusammengelegt und verstaut werden kann. Für derartige Notfallsituationen sollte dann auch die limitierte Produktionsleistung des Systems ausreichend sein.

Das Projekt einer energieautonomen Wasserreinigungsanlage lässt durchaus auch die Perspektive einer bis hin zu den Ausmaßen einer Lagune skalierten Anlage zu, die ähnlich einem Meersalzgewinnungsbecken in Größenordnungen über 100 Quadratmeter Meer- oder Schmutzwasser aufnehmen und Verdunstungswasser

gezielt einem Kondensationsprozess zuführen kann. Die Verwendung von Gewächshausfolie für die Abdeckung und schwarzen Dichten für die Absorberfläche könnten hochskalierte Anlagentypen ermöglichen.

8. Literaturverzeichnis

- [1] J. Lee und T. Younos, „Sustainability Strategies at the Water-Energy Nexus: Renewable Energy and Decentralized Infrastructure.“ *Journal: American Water Works Association*, Bd. 110, 2018.
- [2] W. R. Delgado, T. Beach und S. Luzzadder-Beach, „Solar desalination: Cases, synthesis, and challenges.“ *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Bd. 7, p. e1434, 2020.
- [3] R. Masoodi, H. Tan und K. M. Pillai, „Darcy's law–based numerical simulation for modeling 3D liquid absorption into porous wicks.“ *AIChE journal*, Bd. 57, p. 1132–1143, 2011.
- [4] B. Kröplin und C. R. Henschel, *Water and its memory: New astonishing insights in water research*, GutesBuch Verlag 2021, 2021.
- [5] V. Manikandan, K. Shanmugasundaram, S. Shanmugan, B. Janarthanan und J. Chandrasekaran, „Wick type solar stills: a review.“ *Renewable and sustainable energy reviews*, Bd. 20, p. 322–335, 2013.
- [6] M. Jobrane, A. Kopmeier, A. Kahn, H.-M. Cauchie, A. Kharroubi und C. Penny, „Internal and external improvements of wick type solar stills in different configurations for drinking water production—A review.“ *Groundwater for Sustainable Development*, Bd. 12, p. 100519, 2021.
- [7] F. A. Essa, A. Abdullah, H. S. Majdi, A. Basem, H. A. Dhahad, Z. M. Omara, S. A. Mohammed, W. H. Alawee, A. A. Ezzi und T. Yusaf, „Parameters Affecting the Efficiency of Solar Stills—Recent Review.“ *Sustainability*, Bd. 14, p. 10668, 2022.
- [8] R. S. Hansen, C. S. Narayanan und K. K. Murugavel, „Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh.“ *Desalination*, Bd. 358, p. 1–8, 2015.
- [9] W. H. Alawee, F. A. Essa, S. A. Mohammed, H. A. Dhahad, A. S. Abdullah, Z. M. Omara und Y. Gamiel, „Case Studies in Thermal Engineering“.
- [10] H. Liu, Z. Huang, K. Liu, X. Hu und J. Zhou, „Interfacial solar-to-heat conversion for desalination.“ *Advanced Energy Materials*, Bd. 9, p. 1900310, 2019.