

# IEA Solares Heizen und Kühlen (SHC) Task 62: Solarenergie im industriellen Wasser- und Abwassermanagement

S. Meitz, C. Brunner, G. Wallner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**53/2023**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe  
unter [nachhaltigwirtschaften.at](https://nachhaltigwirtschaften.at)

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

### **Copyright und Haftung:**

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Nutzungsbestimmungen: [nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/](https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/)

# IEA Solares Heizen und Kühlen (SHC) Task 62: Solarenergie im industriellen Wasser- und Abwassermanagement

DI<sup>in</sup> Sarah Meitz, DI Christoph Brunner  
AEE – Institut für nachhaltige Technologien

Dr. Gernot Wallner  
Johannes Kepler Universität Linz

Gleisdorf und Linz, Februar 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage [www.nachhaltigwirtschaften.at](http://www.nachhaltigwirtschaften.at) gewährleistet wird.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Projekthalt</b> .....	<b>10</b>
	4.1. Methodische Vorgehensweise.....	12
	4.1.1. Thermisch betriebene Trenntechnologien .....	12
	4.1.2. Solare Wasser-Dekontaminierungs- und Desinfektionssysteme .....	13
	4.1.3. Systemintegration und Entscheidungshilfe .....	13
	4.1.4. Dissemination .....	14
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>15</b>
	5.1. Thermisch betriebene Wasseraufbereitungstechnologien und Rückgewinnung wertvoller Ressourcen (Subtask A) .....	15
	5.1.1. Stand der Technik von thermische Trenntechnologien .....	15
	5.1.2. Potentiale in der Industrie .....	17
	5.1.3. Neue Materialien und Beschichtungen für Membranen .....	21
	5.1.4. Konzepte für thermische Solarreaktoren .....	23
	5.1.5. F&E Bedarf .....	25
	5.2. Solare Wasser-Dekontaminierungs- und Desinfektionssystemen (Subtask B).....	28
	5.2.1. Stand der Technik und Anwendungspotentiale .....	29
	5.2.2. Konzepte für Solarreaktoren unter Nutzung von Photonen .....	33
	5.2.3. Barrieren (technologisch, wirtschaftlich, politisch) für Dekontaminierungs- und Desinfektionssysteme .....	35
	5.3. Systemintegration und Entscheidungshilfe in der Anwendung (Subtask C).....	38
	5.3.1. Entscheidungskriterien für solare Abwasserbehandlung.....	38
	(1) Verfügbarkeit von Solarthermie .....	38
	(2) Technologie zur (Ab-)Wasseraufbereitung.....	39
	(3) Technologien zur Nutzung von Solarenergie.....	39
	5.3.2. Tool zur Entscheidungsunterstützung .....	40
	5.3.3. Integrationskonzepte.....	41
	5.3.4. Anwendungsbeispiele.....	42
	5.4. Veröffentlichungen .....	45
	<b>Vernetzung und Ergebnistransfer</b> .....	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen</b> .....	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>56</b>

# 1 Kurzfassung

**Ausgangssituation:** Der Wandel hin zu einer nachhaltigen, ressourcen- und energieeffizienten Industrie, stellt in den kommenden Jahren eine wesentliche Herausforderung dar. Die effiziente Bereitstellung von Energie, die bestmögliche Integration erneuerbarer Energieträger und die Rückgewinnung von Ressourcen im Sinne der Kreislaufschließung müssen miteinander einhergehen. Der Einsatz von solarer Prozesswärme stellt in der Industrie ein großes, aber bislang weitgehend ungenutztes, Potential dar. Die Ergebnisse des IEA SHC Task 49/IV zeigen, dass es für die langfristige und erfolgreiche Einführung von Solarthermie innovative und konkrete Lösungen braucht. Hochinnovative Technologien (sog. Emerging Technologies) stellen eine vielversprechende Anwendung dar, die gegenüber konventionellen Verfahren Vorteile aufweisen, um das Potential für Solarthermie in der Industrie zu erhöhen. Die Integration von solarer Prozesswärme zur Versorgung von Technologien zur Abwasserbehandlung bzw. Wasseraufbereitung, stellt ein neues Anwendungsgebiet mit großem technischem und wirtschaftlichem Potential für die Solarthermie dar.

**Ziele und Innovationsgehalt:** Der IEA SHC Task 62 behandelte ausgewählte Schwerpunkte und Ergebnisse aus dem IEA SHC Task 49/IV, um die Möglichkeiten, Herausforderungen und Vorteile der Einbindung von Solarthermie in die Aufbereitung von Abwasser im industriellen Kontext aufzuzeigen. Hauptziel war es, die Entwicklung von solarbetriebenen Technologien zur Prozesswasser- und Abwasser-Aufbereitungstechnologien zu unterstützen, die Bedingungen zu verbessern und deren Einsatz zu erhöhen, um

- den Markt für solare Wasseraufbereitung voranzutreiben,
- Wasserprobleme an Standorten mit reichlich Sonneneinstrahlung zu lösen und
- den Verbrauch von Wasser und fossiler Brennstoffe in der Industrie und Wasseraufbereitungsanlagen (kommunal und industriell) zu reduzieren.

Im Fokus standen thermische Trenntechnologien (Subtask A) wie die Membrandestillation, Pervaporation, Vakuumverdampfung, etc. sowie Technologien zur solare Wasserdekontaminierung und -desinfektion (Subtask B). Durch die Kombination der Technologien mit Solarkollektoren sollte eine innovative und wirtschaftlich attraktive Gesamtlösung für die Integration in die Industrie (Subtask C) geschaffen werden.

**Ergebnisse:** Neben der erfolgreichen Leitung des IEA SHC Task 62 auf internationaler Ebene trug die vorliegende österreichische Beteiligung zur Darstellung des Potentials für die solarbetriebene Membrandestillation und anderen thermischen Trenntechnologien sowie Dekontamination und Desinfektion in unterschiedlichen Anwendungsbereichen, der Entwicklung von Solarreaktor-Konzepten, welcher gleichzeitig Wärme und UV-Strahlung ausnutzt, der die Entwicklung von Integrationskonzepten und das Vorantreiben des Einsatzes der Technologien in Österreich bei.

## 2 Abstract

**Background:** The transition to a sustainable, resource- and energy-efficient industry represents a major challenge in the coming years. The efficient provision of energy, the best possible integration of renewable energy sources and the recovery of resources in the sense of closing the loop must go hand in hand. The use of solar process heat represents a large, but so far largely untapped, potential in industry. The results of the IEA SHC Task 49/IV show that innovative and concrete solutions are needed for the long-term and successful introduction of solar thermal energy. Highly innovative technologies (so-called emerging technologies) represent a promising application with advantages over conventional processes to increase the potential for solar thermal in industry. The integration of solar process heat to supply technologies for wastewater treatment or water treatment, represents a new application area with great technical and economic potential for solar thermal energy.

**Objectives and Innovation:** IEA SHC Task 62 addressed selected focus areas and results from IEA SHC Task 49/IV to highlight the opportunities, challenges and benefits of integrating solar thermal energy into wastewater treatment in an industrial context. The main objective was to support the development of solar-powered process water and wastewater treatment technologies, improve conditions, and increase their deployment in order to

- advance the market for solar water treatment,
- solve water problems in locations with abundant solar radiation, and
- reduce water and fossil fuel consumption in industry and water treatment plants (municipal and industrial).

The focus was on thermal separation technologies (Subtask A) such as membrane distillation, pervaporation, vacuum evaporation, etc., as well as solar water decontamination and disinfection technologies (Subtask B). By combining the technologies with solar collectors, an innovative and economically attractive overall solution for their integration in industry (Subtask C) should be created.

**Results:** In addition to the successful management of the IEA SHC Task 62 on an international level, the Austrian participation in IEA SHC Task 62 contributed to the demonstration of the potential for solar powered membrane distillation and other thermal technologies as well as solar water decontamination and disinfection in different application areas, the development of solar reactor concepts, which utilize heat and UV radiation, the development of integration concepts and the advancement of the use of the technologies in Austria.

# 3 Ausgangslage

## Strategische Zielsetzung

Der Task 62 ist ein Folgeprojekt des bereits erfolgreich abgeschlossenen IEA SHC Task 49/IV. Letzterer beschäftigte sich mit der Weiterentwicklung von Prozesswärmekollektoren, der Entwicklung von Konzepten und Möglichkeiten zur Prozessintegration und -intensivierung als Bindeglied zwischen Solarthermie und Produktionsprozessen sowie der Entwicklung von Design Guidelines. Der neue Task greift ausgewählte Schwerpunkte und Ergebnisse auf, um die Möglichkeiten, Herausforderungen und Vorteile der Einbindung von Solarthermie in die Aufbereitung von Abwasser im industriellen Kontext zu behandeln.

Hauptziel des IEA SHC Task 62 war es, die Entwicklung solarbetriebener Prozesswasser- und Abwasser-Aufbereitungstechnologien zu beschleunigen, die Bedingungen des Einsatzes zu verbessern und deren Umsetzung zu erhöhen um,

- den Markt für solare Wasseraufbereitung voranzutreiben,
- Wasserprobleme an Standorten mit reichlich Sonneneinstrahlung zu lösen und
- den Verbrauch von Wasser und fossiler Brennstoffe in Industrie (Prozesswasser) und Wasseraufbereitungsanlagen (kommunal und industriell) zu reduzieren.

## Stand der Technik

Der Einsatz von Solarthermie im Industriebereich erfolgt derzeit hauptsächlich zur Versorgung von Produktionsprozessen mit solarer Prozesswärme. Nach einer Studie welche von SOLRICO im Jahr 2022 veröffentlicht wurde in Kombination mit einem Survey ausgeführt durch AEE INTEC, sind weltweit mehr als 975 Anlagen zur Bereitstellung von solarer Prozesswärme installiert, mit einer Gesamtkollektorfläche von 1,23 Millionen m<sup>2</sup>. (1) Für 394 dieser Anlagen sind detaillierte Informationen in der SHIP-Datenbank<sup>1</sup> zu finden. Demnach kommen in der Mehrzahl der gelisteten Systeme Flachkollektoren zum Einsatz, gefolgt von Vakuumröhren- und Parabolrinnenkollektoren. Von den 238 Anlagen befinden sich die meisten Anlagen in der Bergbau-, Lebensmittel- und Textilindustrie (14, 130, 26 Anlagen). Die Getränke-, Chemie- und Metallverarbeitende Industrie sind ebenfalls wichtige Sektoren mit 29, 28 und 16 installierten Anlagen zur Bereitstellung solarer Prozesswärme. (1) Die Ergebnisse des IEA SHC Task 49/IV<sup>2</sup> zeigen, dass es für die langfristige Erschließung neuer Felder für die Solarbranche innovative und konkrete Lösungen braucht. Hochinnovativen Technologien (sog. Emerging Technologies) stellen eine vielversprechende Anwendung dar, die gegenüber konventionellen Verfahren Vorteile aufweisen, um das Potential für Solarthermie in der Industrie zu erhöhen.

Die Integration von solarer Prozesswärme zur Versorgung von Technologien zur Abwasserbehandlung bzw. Wasseraufbereitung, stellt ein neues Anwendungsgebiet mit großem technischem und wirtschaftlichem Potential für die Solarthermie dar. Ein Vorteil besteht beispielsweise darin, dass im Vergleich zu Prozessen aus der Produktionslinie, der Prozess der

---

<sup>1</sup> <http://ship-plants.info/>

<sup>2</sup> <http://task49.iea-shc.org/>

Abwasserbehandlung durch einfache Speichermöglichkeiten bzw. vorhandene Misch- oder Absetzbecken vom industriellen Produktionszyklus entkoppelt werden kann und dadurch höhere solare Deckungsgrade erzielt werden können. Des Weiteren werden neue Wasseraufbereitungs- bzw. Abwasserbehandlungstechnologien im Nieder- und Mitteltemperaturbereich betrieben. Dieser Temperaturbereich kann durch Solarthermie-Kollektoren bei gutem Wirkungsgrad bereitgestellt werden. Zusätzlich stellt der Bereich der Abwasserbehandlung in vielen Industriesektoren ein breites Anwendungspotential mit großem Multiplikationsfaktor dar, da die Industrie der zweitgrößte Wasserverbrauchsektor (nach der Landwirtschaft) ist. Knapp 17 % der weltweiten Wasserentnahme im Jahr 2017 entfielen auf die Industrie (inklusive Energieproduktion). Im industriellen Bereich wird Wasser zur Verarbeitung, aber auch zur Herstellung und zum Waschen verwendet. (2) Rund 90 % des in der Produktion verwendeten Wassers fällt nach den Produktionsvorgängen als Abwasser an (3) und muss in Österreich je nach Bestandteilen gemäß den gesetzlichen Regelungen durch das Wasserrechtsgesetz (4) und ergänzender Verordnungen (z.B. Abwasseremissionsverordnung (5)) aufbereitet werden, bevor es in den Wasserkreislauf zurückgeführt werden kann. Der erforderliche Grad an Aufbereitung hängt von der Art der Wiederverwendung und den damit verbundenen Anforderungen an die Wasserqualität ab.

Durch die Optimierung der Produktionsprozesse konnte in den vergangenen Jahrzehnten der Verbrauch von Wasser reduziert werden. Neben dieser Prozessoptimierung ist in der Industrie derzeit ein Trend in der Intensivierung des Abwasserrecyclings sowie die Rückgewinnung der im Abwasser enthaltenen Wertstoffe zu beobachten. Nichts desto trotz stellt Wasserknappheit ein allgegenwärtiges Problem in Teilen der Welt dar. Angesichts knapper werdender Rohstoffe, steigender Rohstoffkosten und Materialpreise wird der Trend hin zum Einsatz von Technologien zum Abwasserrecycling zunehmen. Die höher werdenden Anforderungen an die Technologien zur Wasseraufbereitung und zur Rückgewinnung von Ressourcen ist gleichzeitig mit einem höheren Energieverbrauch der Technologien verbunden. Zukünftig gilt es daher, neue und innovative Trenntechnologien zu optimieren, um diese möglichst energieeffizient zu betreiben und die Versorgung mittels erneuerbarer Energien wie Solarthermie zu ermöglichen. Auf internationaler Ebene beschäftigt sich der IEA SHC Task 62 daher mit thermischen Trenntechnologien wie der Membrandestillation, Pervaporation, Vakuumverdampfung, Rektifikation, etc. sowie der solaren Wasserdekontaminierung und -desinfektion. Im österreichischen Teil liegt, neben der Leitung des Task, der technologische Fokus auf der solarbetriebenen Membrandestillation, auf der Entwicklung von Solarreaktoren, welche gleichzeitig Wärme und UV-Strahlung ausnutzen sowie der Einsatz der Technologien in Österreich.

### **Vorarbeiten**

Der IEA SHC Task 62 ist ein Folgeprojekt des bereits erfolgreich abgeschlossenen IEA SHC Task 49/IV. Letzterer beschäftigte sich mit der Weiterentwicklung von Prozesswärme-kollektoren, der Entwicklung von Konzepten und Möglichkeiten zur Prozessintegration und -intensivierung als Bindeglied zwischen Solarthermie und Produktionsprozessen sowie der Entwicklung von Design Guidelines. Der IEA SHC Task 62 greift ausgewählte Schwerpunkte und Ergebnisse auf, um die Möglichkeiten, Herausforderungen und Vorteile der Einbindung von Solarthermie in die Aufbereitung von Abwasser im industriellen Kontext zu behandeln.

# 4 Projektinhalt

Hauptziel des IEA SHC Task 62 war es, die Entwicklung solarbetriebener Prozesswasser- und Abwasser-Aufbereitungstechnologien zu beschleunigen, die Bedingungen des Einsatzes zu verbessern und deren Einsatz Umsetzung zu erhöhen. Abwassertechnologien die dabei berücksichtigt wurden sind zum einen thermische Aufbereitungstechnologien und zum anderen Technologien zur solaren Dekontamination und Desinfektion unter Nutzung von Photonen. Um deren Einsatz in industriellen und kommunalen Anwendungen zukünftig zu erhöhen wurde zudem deren Integration forciert. Mit diesem Hintergrund wurde der IEA SHC Task 62 in 3 Sub-Tasks eingeteilt und verfolgte folgende Teilziele:

## **Sub-Task A (Leitung: Joachim Koschikowski, Fraunhofer ISE, Deutschland):**

- Kompendium an Trenntechnologien, die ein hohes Potenzial für die solarthermische Wärmeversorgung aufweisen (z.B. Membrandestillation, Pervaporation, Vakuumverdampfung, Rektifikation, etc.)
- Identifikation geeigneter Anwendungsbereiche solarbetriebener Trenntechnologien (z.B. Industriesektoren, Produktionsprozesse, geografische Standorte, synergetische Nutzung von solarer und industrieller Abwärme sowie anderen erneuerbaren Energien)
- Erhebung der Vor- und Nachteile dieser Technologien für verschiedene industrielle Anwendungen und die Wechselwirkung mit solarthermischen Kollektoren und anderen erneuerbaren Energien sowie der Vergleich mit Stand der Technik Technologien
- Darstellung der Möglichkeiten und Entwicklung von Konzepten für Solarreaktoren zur Anwendung im industriellen Abwassermanagement

## **Sub-Task B (Leitung: Isabel Oller, CIEMAT PSA, Spanien):**

- Entwicklung neuer Systeme für die solare Wasserdekontaminierung und -desinfektion mit erhöhter Effizienz durch die Integration von Sonnen- und UV-Strahlung
- Identifizierung von Aufbereitungsprozessen anderer wasserbasierter Ströme, die potenziell von direkter Sonnen- und UV-Strahlung profitieren könnten

## **Sub-Task C (Leitung: Mikel Duke, Victoria University, Australien):**

- Entwicklung eines Decision-Making-Tools und Integrationskonzepte für End-Nutzer und Technologieanbieter
- Abhaltung von Workshops und Vorträgen für Experten, Endnutzer und Technologieanbieter zu Task-Ergebnissen

Forschungsinstitute, Universitäten und Unternehmen der folgenden Länder (siehe Tabelle 1) beteiligten sich am IEA SHC Task 62.

Tabelle 1: Übersicht über beteiligte Länder sowie die jeweilige Anzahl an Forschungsinstituten, Universitäten und Unternehmen

Country/Sponsor	Number of Research Institutes	Number of Universities	Number of Companies
Austria	2	0	1
Australia	0	4	0
Denmark	0	1	1
Germany	2	3	5
Greece	2	0	0
Italy	1	3	1
Malaysia	0	1	0
Netherlands	0	0	3
Portugal	1	1	2
South Africa	0	1	1
Spain	4	6	4
Sweden	0	1	1
UAE	0	2	0
United Kingdom	0	1	0
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>	<b>24</b>	<b>18</b>

### Österreichische Beteiligung

In Österreich waren die Akteure AEE INTEC (Task Manager DI Christoph Brunner) sowie die JKU Linz – Institute of Polymeric Materials and Testing (DI Dr. Gernot Wallner) aktiv in die Arbeiten eingebunden. Die Österreichische Beteiligung umfasste folgende Forschungstätigkeiten:

#### Forschungstätigkeiten zu Subtask A:

- Bewertung der Membrandestillation für die Versorgung mit Solarthermie und dem Einsatz der solarbetriebenen Membrandestillation in unterschiedlichen Anwendungsfällen (industriell und kommunal)
- Definition des zukünftigen F&E-Bedarfs für solarthermisch betriebene Wasseraufbereitungstechnologien (Fokus Membrandestillation)
- Entwicklung eines Konzeptes für neue solarthermische Reaktoren für die Abtrennung/Behandlung von industriellen Prozess- und Abwasserströmen

#### Forschungstätigkeiten zu Subtask B:

- Identifikation neuer Anwendungsbereiche für solarbasierte Wasserdekontaminierungs- und Desinfektionssysteme für industrielle Prozesswässer und Abwässer
- Darstellung der technologischen, wirtschaftlichen und politischen Barrieren für neue Dekontaminations- und Desinfektionssysteme für die industrielle Wasser- und Abwasserwirtschaft

#### Forschungstätigkeiten zu Subtask C:

- Entwicklung von Integrationskonzepten basierend auf ausgewählten, (inter-)nationalen Anwendungen
- Sammlung (inter-)nationaler „Best Practice Examples“ für die potentielle Veröffentlichung auf der SHIP-Datenbank
- Entwicklung der Struktur, Festlegung von Parameter und Kriterien für das Decision-Making-Tool
- Veröffentlichung nationaler Beiträge in Fachzeitschriften und Abhaltung von Fachvorträgen auf (inter-)nationalen Konferenzen

## **4.1. Methodische Vorgehensweise**

Die Methodische Vorgehensweise des IEA SHC Task 62 basierte auf:

- Durchführen von Literaturrecherche
- Zusammenführen von Ergebnissen aus laufenden Forschungsaktivitäten
- Einbindung von Bachelor- und Masterarbeiten
- Kommunikation im nationalen und internationalen Konsortium

Die angewandte Methodik hat sich in der Erarbeitung der inhaltlichen Fragestellungen als passend erwiesen – deren punktuelle Anwendung in den einzelnen Subtasks wird folgend erläutert.

### **4.1.1. Thermisch betriebene Trenntechnologien**

Anhand einer durchgeführten Masterarbeit sowie Literaturrecherche wurde im ersten Schritt eine Übersicht über potentielle thermische Aufbereitungstechnologien erstellt. Zur Identifikation des Potentials von Trenntechnologien (im österreichischen Teilvorhaben liegt der Fokus auf der Erhebung

des Potentials der MD) für die thermische Versorgung durch Solarkollektoren erfolgte die Erhebung der Zielsetzung unterschiedlicher Industriebranchen an die Technologien zur Abtrennung bzw. Aufbereitung von Abwasser- bzw. Prozesswasserströmen. Die dafür notwendigen Informationen stammen aus Ergebnissen und Erkenntnissen aus Vorprojekten, Literaturrecherchen und einem Pool der nationalen und internationalen ExpertInnen des IEA SHC Task 62. Die Auswertung sollte den noch notwendigen F&E-Bedarf verdeutlichen, um die solare Versorgung der Technologien zukünftig noch besser zu verschränken und weitere Projekte zu initiieren.

Für die Auslotung neuer Materialien und Beschichtungen für solarthermisch-betriebene Wasserseparationsmembranen wurde ihm Rahmen einer Masterarbeit eine umfassende Recherche und eine werkstoffliche Analyse mittels mikroskopischer, spektroskopischer und thermoanalytischer Methoden durchgeführt. Dazu wurden zwei akademische Arbeiten zur Identifizierung und Auslotung neuer Membranmaterialien durchgeführt. Zuerst sollten in einer Bachelorarbeit Methoden zur effizienten polymerphysikalischen Charakterisierung von Membranmaterialien aufgebaut und implementiert werden. Dazu wurden ausgewählte im Labormaßstab eingesetzte MD-Membranen verwendet. Die MD-Membranen stammen aus Versuchsreihen an einer MD-Laboranlage. Hier wurden Versuche mit unterschiedlichen Prozesswässern (unter anderem Abwasser aus Kläranlagen) in Langzeitversuchen durchgeführt.

Um Solarkollektoren noch intensiver mit hochinnovativen Technologien (emerging technologies) für thermische, thermochemische, photokatalytische und solarelektrolytische Verfahren miteinander zu verschmelzen, wurde das Konzept eines Solarreaktors entwickelt. Im nationalen FFG-Projekt SolarReaktor (AEE INTEC, FFG Nr. 865128) wurde dazu eine Sondierung durchgeführt, um das Umsetzungspotential anhand von Recherchen und Klassifizierungen der möglichen Einsatzgebiete (Verfahren, Prozesse, Reaktoren) darzustellen und das modulare Konzept eines Solarreaktors inklusive notwendiger Komponenten zu entwickeln.

#### **4.1.2. Solare Wasser-Dekontaminierungs- und Desinfektionssysteme**

Für die Weiterentwicklung bzw. weitere Verbreitung von solaren Wasser-Dekontaminierungs- und Desinfektionssystemen wurden im österreichischen Teilvorhaben mögliche Anwendungsgebiete eruiert. Dazu wurde ein Screening bestehender Solarreaktorkonzepte und Nutzung der Solarenergie in der Industrie sowie ein Screening von Industriereaktoren und Ansätzen zur Prozessintensivierung (optimierte Rheologie, Energie- und Massentransfer etc.) durchgeführt. Zudem wurden die wichtigsten industriellen Prozesse (thermisch, thermochemisch, photokatalytisch, elektrolytisch) in den energieintensivsten Produktionssektoren der EU-Industrie identifiziert. Die Arbeiten wurden in Verlinkung zu AP 2 und dem Projekt SolarReaktor (AEE INTEC, FFG Nr. 865128) durchgeführt. Basierend darauf wurden dann auch neue Konzepte für neue Technologien mit erhöhter Effizienz durch die Integration von thermischer Solarenergie und Sonnen/UV-Strahlung entwickelt.

#### **4.1.3. Systemintegration und Entscheidungshilfe**

Die Entwicklung des Decision-Making-Tools für die bestmögliche Integration von Solarenergie für die Abwasseraufbereitung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem internationalen Konsortium und Experten. Auf österreichischer Ebene wurden dazu unterschiedliche nationale Projektergebnisse mit Fokus MD (Fallstudien und Simulationsergebnisse) sowie realisierte Anlagen zusammengetragen und

daraus generische Konzepte entwickelt, deren Darstellung auf den Konzepten des IEA SHC Task 49/IV (Deliverable B2) aufbauen. Dabei wurden die Anforderungen an die einzelnen Komponenten (Kollektoren, Speicher, Technologie zur Abtrennung/Aufbereitung) sowie die Kombination mit vorhandener Abwärme und anderen erneuerbaren Energien (Wärmepumpe, etc.) eingearbeitet. Zusätzlich wurde die Darstellung und Beschreibung von Systemkonzepten in einem gemeinsamen Workshop definiert und in Folge für das Decision-Making-Tool erarbeitet.

#### **4.1.4. Dissemination**

Die Ergebnisse aus oben genannten Schritten wurden über die Netzwerke der nationalen und internationalen Partner, das Netzwerk der IEA SHC Kooperation, Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Vorträgen auf nationalen Konferenzen verbreitet. Des Weiteren flossen nationale Beiträge in internationale Deliverables ein, die online auf der Website des IEA SHC Task 62 zur Verfügung stehen (<https://task62.iea-shc.org/>). Um die Dissemination im nationalen Kontext zu stärken wurde zudem wurde ein Nationaler Stakeholder-Workshop organisiert, um wesentliche Stakeholder aus Industrie und Forschung zusammenzuführen.

# 5 Ergebnisse

## 5.1. Thermisch betriebene Wasseraufbereitungstechnologien und Rückgewinnung wertvoller Ressourcen (Subtask A)

Der Subtask A beschäftigte sich mit thermisch betriebenen Wasseraufbereitungstechnologien und der Rückgewinnung von wertvollen Ressourcen. Die Hauptziele die dabei erreicht werden sollten beziehen sich auf:

- Schaffung einer Übersicht über thermische Trenntechnologien
- Identifikation des Potenzials von Solarthermie für die thermische Versorgung von Trenntechnologien in Form von geeigneten Anwendungsbereichen der solarbetriebenen Trenntechnologien
- Fokussierung auf Membranen und Materialien
- Konzepte für neue solarthermische Reaktoren für die Abtrennung/Behandlung von industriellen Prozess- und Abwasserströmen
- Darstellung des F&E-Bedarfs

### 5.1.1. Stand der Technik von thermische Trenntechnologien

Bei den thermischen Verfahren handelt es um Technologien, die thermische Energie zur Wasseraufbereitung bzw. Rückgewinnung wertvoller Ressourcen nutzen. Dazu zählen nach aktuellem Stand der Technik thermische Trenn- und Reinigungsprozesse wie die Verdampfung, Prozesse wie die Rektifikation und Extraktion und Membranprozesse.

#### Verdampfung

Bei der Verdampfung wird ein Gemisch aus unterschiedlichen Flüssigkeiten verdampft, wodurch sich die leichtsiedenden Komponenten in der Dampfphase ansammeln und anschließend Auskondensiert werden können. Der Trennerfolg bei der Verdampfung ist umso besser, je weiter die Siedetemperaturen der zu trennenden Komponenten des Gemisches auseinander liegen. (6) Des Weiteren können leichtflüchtige bzw. wasserdampfflüchtige Substanzen das Trennergebnis der Verdampfungsverfahren beeinflussen. (7) Der wichtigste Teil einer Eindampfanlage ist der Verdampfer selbst. Dieser steht in Bauarten wie Becken-/Batchverdampfer, Natur-/Zwangsumlaufverdampfer, Steig-/ Fallfilmverdampfer, Dünnschichtverdampfer und Plattenverdampfer zur Verfügung. (8) Der Unterschied in den einzelnen Verdampferarten liegt im Wesentlichen in der Verdampfungstemperatur, dem zu erzielenden Konzentrationsfaktor, dem Reinigungssystem und dem Energieverbrauch. In Abhängigkeit des Druckes arbeiten industriell eingesetzte Verdampfungsanlagen bei relativ hohen Temperaturen ab 100 °C. Die zur Dampferzeugung benötigten hohen Temperaturen führen zu hohen Verlusten und oftmals auch zur Zerstörung von temperatursensitiven Bestandteilen in Abwässern (z.B. Organik). Des Weiteren erfolgt Energiebereitstellung hauptsächlich durch fossile Energieträger, da die hohen Betriebstemperaturen eine Einbindung von Abwärme und Solarthermie nicht ermöglichen. Aufgrund dessen wird der Fokus dieser Arbeit auf die Vakuumverdampfung gelegt.

## Vakuumverdampfung

Um den Betrieb von Verdampfern effizient zu gestalten und den Einsatz auch bei Lösungen mit temperaturempfindlichen Bestandteilen zu ermöglichen, bieten sich Vakuumverdampfer an. Das Vakuum ermöglicht aufgrund der reduzierten Siedetemperatur, im Vergleich zu anderen Verdampfungsverfahren, die Nutzung von Wärmeströmen mit einer Temperatur von 40 bis 50 °C. Aufgrund dessen bietet sich hier die Möglichkeit einer Abwärme- bzw. Solarthermienutzung an. (9). Durch interne Energierückgewinnung mittels mehrerer Druckstufen ein effizienter Betrieb der Anlage ermöglicht werden. Bei der internen Energierückgewinnung kann zwischen direkten und indirekten Brüdenverdichtern unterschieden werden:

- Bei der direkten Brüdenverdichtung wird der erzeugte Wasserdampf in einem Verdichter komprimiert und erhitzt. Die Kondensationswärme wird im Anschluss über einen Kondensator an die zu erwärmenden Brüden abgegeben. Die noch vorhandene Restwärme kann über einen Wärmetauscher zur Vorwärmung des Zulaufs genutzt werden. Die Temperaturen liegen in Abhängigkeit der Zusammensetzung und Konzentration der Inhaltsstoffe bei 85 °C. (10)
- Bei Temperaturen von nur 35 bis 45 °C arbeiten indirekte Brüdenverdichter. Dabei wird jedoch nicht der Dampf, sondern ein umlaufendes Kältemittel über eine externe Wärmepumpe verdichtet. (10)

## Rektifikation

Die Rektifikation ist eine Erweiterung der Verdampfung. Dabei werden Gemische unterschiedlicher Flüssigkeiten durch mehrfache Verdampfung- und Kondensationsschritte in einer kontinuierlichen Betriebsweise getrennt. Dadurch können deutlich höhere Trenneffekte im Vergleich zur einfachen Verdampfung erzielt werden. Die sich wiederholenden Vorgänge finden in einer vertikalen Rektifikationskollone statt, in der der aufsteigende Dampfstrom und der herab-fließende Kondensatstrom (Gegenstromprinzip) im ständigen Stoff- und Wärmeaustausch stehen. (11)

## Flüssig-flüssig Extraktion

Die flüssig-flüssig Extraktion ist eine Trennmethode, bei der unterschiedliche Löslichkeiten von zwei nicht miteinander mischbaren Lösungsmitteln ausgenutzt wird. Die flüssig-flüssig Extraktion wird zur Anreicherung, Reinigung und Trennung von flüssigen Substanzen genutzt. Dabei kommt ein flüssiges Extraktionsmittel zum Einsatz, wodurch eine Komponente aus einem flüssigen Stoffgemisch gelöst wird. Im Ruhezustand bilden sich entsprechend den verschiedenen Dichten zwei Schichten aus. Nach einer Phasentrennung kann das Produkt zum Beispiel durch Verdampfen des Lösungsmittels gewonnen werden. (12)

## Mehrstufige Entspannungsverdampfung (MSF: Multi-Stage-Flash)

Erhitzt man das Wasser auf 100 °C oder mehr und hält es unter Druck, bis es in eine Vakuumkammer abgelassen wird, verwandelt sich das Wasser in Dampf. Das Prinzip der MSF besteht in der Verbindung mehrerer Stufen bei sukzessive Verringerungen Drücken. Die Verdampfung und Kondensation erfolgen in mehreren Stufen, wodurch die Effizienz erhöht wird. Das einströmende Abwasser wird durch Wärmetauscherrohre geleitet, an deren Außenseite der Wasserdampf bei immer höheren Temperaturen kondensiert. Schließlich wird es zum Soleerhitzer geleitet, wo Dampf

aus einer externen Quelle die Energie für den Prozess liefert und das Meerwasser auf die maximale Prozesstemperatur erhitzt. Anschließend gelangt das Meerwasser in den Verdampferkessel, wo der Druck verringert wird, so dass das Wasser verdampft. Dieser Vorgang wird in mehreren Stufen wiederholt, wobei der Druck schrittweise verringert wird, so dass das Flashen bei immer niedrigeren Temperaturen erfolgt. Der kondensierte Dampf ist destilliertes Wasser.

### **Mehrfacheffektdestillation (MED: Multi-Effect-Distillation)**

Die MED ist dadurch gekennzeichnet, dass bei der Destillaterzeugung der Dampf an der Oberfläche eines wärmeleitenden Elements (z.B. Rohr, Folie) kondensiert. Das Abwasser tritt dabei in die erste Kammer ein und wird in einem dünnen Film über das wärmeleitende Element verteilt. Dadurch verdampft die Flüssigkeit. Der Dampf wird in die zweite Kammer geführt, wo er wiederum für die Erwärmung verwendet wird. Die restliche auskondensierte Flüssigkeit wird in der zweiten Stufe wieder über das wärmeleitende Element geführt.

### **Membrandestillation**

Die Membrandestillation (MD) ist ein thermisches Membranverfahren, welches die Verdampfung von Wasser durch eine poröse hydrophobe Membran ermöglicht. Angetrieben durch den Dampfdruckunterschied ermöglicht das Verfahren eine Verdampfung bei Umgebungsdruck und niedrigeren Temperaturen (30-90 °C). Während flüchtige Komponenten des Abwassers auf der Feed-Seite durch die Membran verdampfen und auf der Permeat-Seite auskondensieren, bleiben nichtflüchtige organische und anorganische Verbindungen zurück, was zu einer hochkonzentrierten Lösung mit deutlich reduziertem Gesamtvolumen führt. Die MD gibt es in unterschiedlichen Konfigurationen wie beispielsweise Direkt-Kontakt-MD (DCMD), Vakuum MD (VMD) und Airgap-MD (AGMP).

### **Mehrfacheffekt-Membrandestillation (MEMD)**

Eine Möglichkeit zur Optimierung der thermischen Effizienz durch interne Nutzung von Kondensationswärme, ist Umsetzung der Membrandestillation in mehreren Stufen, wobei die Konfigurationen gleich ausgeführt sind wie bei der konventionellen MED oder MSF. Der einzige Unterschied liegt darin, dass Membranen als wärme- und stoffübertragende Elemente eingesetzt werden. (13)

## **5.1.2. Potentiale in der Industrie**

In der Industrie gibt es unterschiedliche Anknüpfungspunkte für den Einsatz von thermischen Trenntechnologien. Dabei unterscheiden sich die Anwendungen in den unterschiedlichen Zielsetzungen der Behandlung:

- Zur Reduktion von Abwässern können Trenntechnologien eingesetzt werden mit dem Ziel, die Gesamtabwassermenge zu reduzieren (ZLD: Zero Liquid Discharge). Das Abwasser soll dahingehend behandelt werden, dass sauberes Wasser erzeugt und wiederverwendet wird.
- Des Weiteren gibt es die Möglichkeit Trenntechnologien einzusetzen, um selektiv bestimmte Komponenten in Prozess- und Abwasserströmen abzutrennen, mit dem Ziel, das Wasser sowie bestimmte Inhaltsstoffe wiederverwenden zu können.

- Ein weiteres Ziel ist es, durch den Einsatz von Trenntechnologien, bestimmte Produkte aufzuwerten bzw. Wertstoffe aus Stoffströmen zu erzeugen

Je nach unterschiedlicher Zielsetzung werden in Tabelle 2 Anwendungsmöglichkeiten für thermische Trenntechnologien in diversen Industriesektoren gegeben.

Im Rahmen der österreichischen Aktivitäten wurden zudem ausgewählte Anwendungsgebiete in Bezug auf deren Eignung für die Anwendung der Membrandestillation als ausgewählte Technologie analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass folgende Anwendungsgebiete deutliches Potential für den Einsatz der Membrandestillation haben:

- **Entsalzung:** Wasseraufbereitung und Meerwasserentsalzung, Entsalzung von industriellen Ab-/Prozesswässern und anderen wässrigen Lösungen mit sehr hohem Salzgehalt; Anwendungen bis hin zu Kristallisation möglich
- **Konzentration von wertvollen Komponenten aus Abwässern** aus Textil-, Petrochemie-, Metallurgie-, Lebensmittel sowie der Pharmaindustrie (z.B. Metalle, Säuren)
- **Abwasserbehandlung:** Reduktion von Abwasserbelastungen (z.B. Ammonium, CSB)
- **Behandlung/Aufkonzentrierung von temperaturempfindlichen Produkten** (z.B. Fruchtsäfte, Milchprodukte)
- **Entfernung von flüchtigen organischen oder anorganischen Bestandteilen** in wässrigen Lösungen bzw. in Wasser gelösten Gasen (z.B. Alkohol, Ammoniak, Sauerstoff)

Tabelle 2: Übersicht über Industriesektoren und potentielle Anwendungen für thermische Trenntechnologien

	<b>Reduktion Abwasser (Zero Liquid Discharge – ZLD)</b>	<b>Selektive Rückgewinnung und Wiederverwendung von Ressourcen</b>	<b>Produktion von Wertstoffen; Aufwertung von Produkten</b>
<b>Stahl, Metall, Beschichtungsindustrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlwasserabschlammung,</li> <li>• Schneideöl-/Wasser-Emulsionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlwasser</li> <li>• Schmierstoffe</li> <li>• Säuren aus der Oberflächenbehandlung</li> <li>• Metalle aus der chemischen und mechanischen Oberflächenbehandlung</li> <li>• Spülwasser</li> </ul>	<i>Keine Angabe</i>
<b>Halbleiterindustrie Leiterplatten-industrie, Elektronische Industrie</b>	<i>Keine Angabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klarspülwasser</li> <li>• Ammoniak</li> <li>• Säuren aus der Oberflächenätzung</li> <li>• Chemikalien und Materialien aus Recyclingprozessen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metalle aus der Leiterplattenbeschichtung (Kupfer, Gold, Palladium)</li> </ul>
<b>Chemische und Pharmazeutische Industrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion Abwässer bei komplexer Zusammensetzung</li> </ul>	<i>Keine Angabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserextraktion</li> <li>• Aufkonzentrierung von Produkten</li> </ul>
<b>Textilindustrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Färben von Stoffen</li> <li>• Gerben von Leder</li> <li>• Wäschereiwasser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Färbe- und Bleichsalze</li> <li>• Waschwasser</li> </ul>	<i>Keine Angabe</i>

	<b>Reduktion Abwasser (Zero Liquid Discharge – ZLD)</b>	<b>Selektive Rückgewinnung und Wiederverwendung von Ressourcen</b>	<b>Produktion von Wertstoffen; Aufwertung von Produkten</b>
<b>Lebensmittelindustrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abwässer aus Reinigung und Spülung</li> <li>• Entfernung von Salzen bei der Käse- und Molkenherstellung</li> <li>• Abwässer aus der Olivenölproduktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasser für Reinigung und Spülung</li> <li>• Nährstoffe aus der Prozesswasserentsorgung</li> <li>• Rückgewinnung von Wasser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufkonzentrierung von Fruchtsäften</li> <li>• Alkoholabtrennung</li> <li>• Salzproduktion</li> </ul>
<b>Bergbau und Salinen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grubenwasser zur Verringerung der Umweltbelastung</li> <li>• Abfallströme aus der Auslaugung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metallrückgewinnung</li> <li>• Rückgewinnung von Säuren aus der Laugung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salzgewinnung aus Salzseen und Salaren</li> <li>• Lithiumgewinnung aus Salaren und geothermischen Solen</li> </ul>
<b>Öl und Gasindustrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion Produktionswasser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entsalzung</li> </ul>	<i>Keine Angabe</i>
<b>Papier- und Zellstoffindustrie</b>	<i>Keine Angabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organische Inhaltsstoffe</li> <li>• Prozesswasser</li> </ul>	<i>Keine Angabe</i>
<b>Energieproduktion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlwasserabschlammung ZLD</li> <li>• Wasser aus der Spiegelreinigung bei der CSP- und PV-Reinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlwasser</li> <li>• Entionisiertes Kesselwasser</li> </ul>	<i>Keine Angabe</i>

### 5.1.3. Neue Materialien und Beschichtungen für Membranen

Die Effizienz von Membrantechnologien (sowohl thermisch und druckgetrieben) ist stark von den Eigenschaften der eingesetzten Membran. Daher wurde im Rahmen der österreichischen Aktivitäten ein wesentlicher Schwerpunkt auf Materialien bzw. Beschichtungen für Membranen gelegt. Dazu wurden mittels Infrarot-Spektroskopie die werkstoffliche Zusammensetzung und der Lagenaufbau von Membranen bestimmt. Die thermische Vorgeschichte und die Schmelzbereiche wurden mittels dynamischer Differenzialkalorimetrie (DSC) untersucht. Zudem erfolgte eine morphologische und topographische Charakterisierung mittels Licht-, Laser- und Infrarot-Mikroskopie.

Die untersuchten Membrantypen zeigten funktionale Membranschichten aus Polytetrafluorethylen (PTFE) und Trage- und Verteilungsstrukturen (Vlies, Gitter) aus Polypropylen (PP) (Abbildung 1). In der ersten Serie von geprüften, gebrauchten Membranen waren Reste von Wasser oder aliphatischem Alkohol, Verkalkungen und Goldpartikeln feststellbar. Die klar erkennbaren Temperpeaks in den DSC-Kurven stellten ein Indiz für Betriebstemperaturen von bis zu 100°C dar. Je nach Tragestruktur (Vlies, Gitter) und Gebrauchszustand waren deutliche Unterschiede in der Topographie und der Oberflächenrauheit beobachtbar.

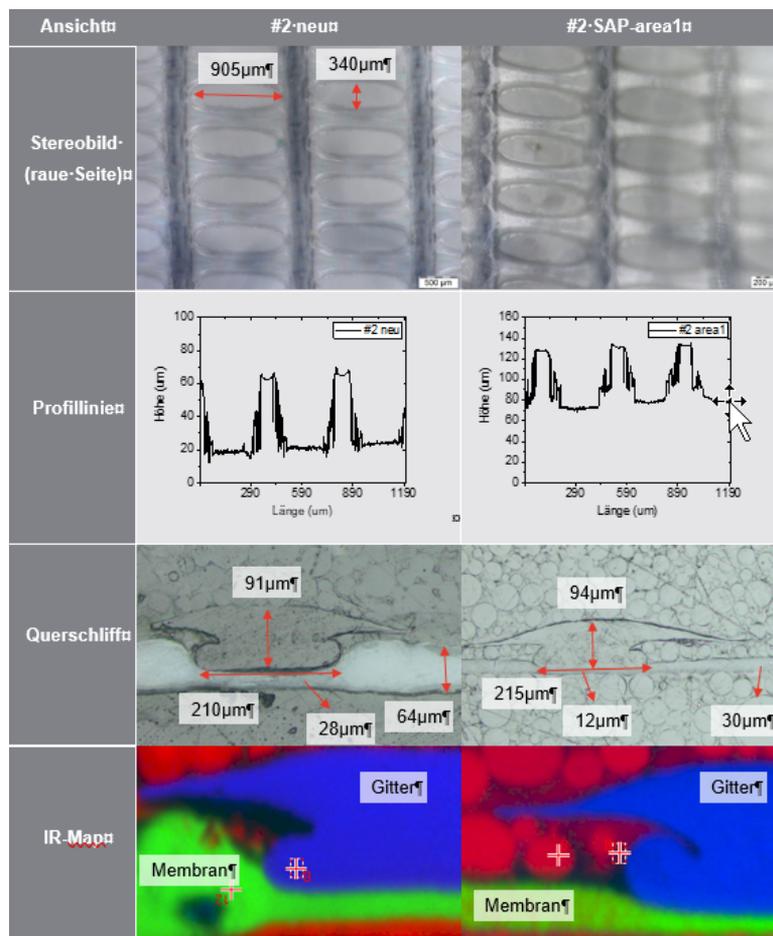


Abbildung 1: Illustration der PP-Gitter- und PTFE-Membranstruktur eines beispielhaft untersuchten MD-Funktionselementes im Referenzzustand (links) und nach Einsatz (rechts).

In der weiterführenden Masterarbeit wurden 16 Membranen (#1-16), die in verschiedenen Membrandestillationsprozessen zur Anwendung kamen, untersucht. Bei den Prozessen handelte es sich um „ARA“, „Schlachthaus“, „Urin“, „Anorganische Salze“ und „Ammoniumsulfat“. Drei dieser 16 Membranen waren neu und dienten als Referenz. Die meisten Membranen wiesen eine glatte und raue Seite auf. Membranen #13, #14 und #16 zeigten eine beidseitig glatte Struktur. Bei den Membranen handelte es sich um Membranen der Firmen Sterlitech (#1-11 und #15), Gore (#12), Novamem (#13 und 14) und Aquastill (#16). Durch die Untersuchungen sollte das Foulingverhalten nach dem Betrieb aufgezeigt werden. Neben den in der Bachelorarbeit implementierten Methoden wurde zusätzlich die Elementzusammensetzung der Oberfläche und deren chemischer Bindungszustand mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) bestimmt.

Die Referenzmembran #14 des Herstellers Novamem zeigte eine beidseitig glatte Struktur mit geringer Rauigkeit aus PVDF. Die Dicke dieser Membran betrug  $102\mu\text{m}$ . Die neue Sterlitech-Membran (#15) wies eine glatte PTFE-Schicht mit einem einseitigen PP-Gittermuster auf. Die PTFE-Schicht hatte eine Dicke von etwa  $67\mu\text{m}$ , wobei diese unter dem Gittermuster erheblich dünner war. Das Gittermuster zeigte ovale Löcher mit den Abmessungen  $820 \times 300\mu\text{m}^2$ . Der Querschnitt der Gitterstege wies eine umgekehrt pilzförmige Form mit den Abmessungen  $235 \times 31\mu\text{m}^2$  auf. Die noch nicht benutzte Membran #16 zeigte eine beidseitig glatte, leicht faserige Struktur aus PE-HD mit einer Dicke von 60 bis  $70\mu\text{m}$ .

Nach dem Prozess ARA in der Konfiguration Vacuum Membrandestillation (VMD) war kaum Fouling auf der Sterlitech-Membran #1 feststellbar. Es zeigten sich Rückstände in Form von Harnstoffresten und deutliche Natrium-, Kalzium- und Magnesium-Signaturen der Foulingschicht. Der Prozess ARA führte zu keinem starken Fouling.

Im Schlachthausprozess wurde teilweise Flockungsmittel mit unterschiedlichen Massenanteilen verwendet. Bei allen Sterlitech-Membranen war Oberflächen Fouling auf Proteinbasis nachweisbar. Zusätzlich waren deutliche Spuren von Natrium und Chlor zu erkennen. Im Prozess ohne Flockungsmittel eingesetzt, ergab sich eine dicke, raue und ungleichmäßige Foulingschicht, wobei diese im Direct Contact Membrandestillation (DCMD) Prozess wesentlich ausgeprägter war als im VMD-Prozess. Ein Flockungsmittelanteil von 0,03w% reduzierte das Fouling. Zudem war die Oberfläche glatter, gelartiger und gleichmäßiger. Wiederum war im DCMD-Prozess ausgeprägteres Fouling als beim VMD-Prozess nachweisbar. Noch stärker wurde das Fouling durch einen Flockungsmittelanteil von 0,06w% reduziert. Im DCMD-Prozess war geringeres Fouling als beim VMD-Prozess feststellbar. Als Flockungsmittel wird häufig Polyacrylamid (PAM) verwendet. Dies war nicht eindeutig nachweisbar. Die im DCMD-Verfahren eingesetzten Membranen zeigten auch auf der Permeat-Seite Fouling. Dies deutete auf interne Porenverschmutzung und Benetzung hin. Für den Schlachthaus-Prozess wäre daher die VMD-Konfiguration und ein hoher Flockungsmittelanteil empfehlenswert.

Im Prozess „Urin“ (VMD) ergab sich ähnliches Fouling wie beim ARA-Prozess. Zusätzlich zu den Harnstoffresten waren Natrium-Signaturen feststellbar. Fouling im Betrieb stellte nur ein geringes Problem dar. Beim Prozess „Anorganische Salze“ waren dicke kristallförmige Foulingschichten mit Kalium- und Schwefelanteilen feststellbar. Durch Reinigung war das Fouling deutlich reduzierbar. Bei der Gore-Membran war interne Porenverstopfung und Benetzung nachweisbar. Der Membranaufbau war jedoch ähnlich zur Sterlitech-Membran. Allerdings bestanden Unterschiede in der PP-Gitterstruktur. Die Dicke der PTFE-Schicht betrug  $110\mu\text{m}$ , wobei sich diese unter dem Gittersteg auf

45µm reduzierte. Um die anorganischen Substanzen näher untersuchen zu können, wären weiterführende Analysen empfehlenswert. Trotz geringem Fouling der im Prozess „Ammoniumsulfat“ eingesetzten PVDF-Membran #13 waren signifikante Magnesium-, Natrium- und Kalzium-Signaturen feststellbar. Aufgrund der fehlenden Schwefelspuren dürfte es zu einer Aufspaltung der Ammoniumsulfate gekommen sein.

Die akademischen Arbeiten verdeutlichten ein hohes Verbesserungspotential sowohl in Bezug auf die Membranmaterialien als auch beim Betrieb der Membrandestillation. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde 2022 ein Antrag für ein Konsortialforschungsprojekt ausgearbeitet und erfolgreich eingereicht. Im genehmigten Projekt SolPol-6, das im Januar 2023 startete, liegt ein Schwerpunkt bei der Substitution von Fluorpolymer-haltigen Membranen (Umweltthema: Ewigkeitschemikalie PFAS) durch auf ökologisch gut verträglichen, Kohlenwasserstoff-basierenden Polyolefinen.

#### 5.1.4. Konzepte für thermische Solarreaktoren

Konventionelle Solarenergietechnologien zeichnen sich durch die Trennung der solaren Energieerzeugung und des industriellen Prozesses aus. Die Integration erfolgt z.B. über Wärmetauscher (z.B. in Bäder integriert) und ein System für die Energieversorgung. Konzepte für Solarreaktoren stellen einen Prozessintensivierungsansatz dar, bei denen der Integrationsteil wegfällt und die Energieerzeugung und Prozesse in eine Komponente vereinen. Der Prozess findet also direkt in der Energieversorgungseinheit (z.B. Solarkollektor) statt.

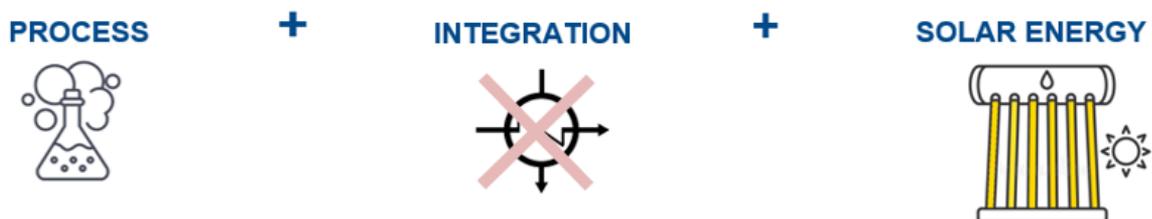


Abbildung 2: Darstellung des Konzeptes des Solarreaktors – der Integrationsteil (z.B. Wärmetauscher) wird nicht benötigt; der Prozess wird direkt in den Kollektor integriert

Im Rahmen der Arbeiten des IEA SHC Task 62 wurden neue solarthermische Reaktoren der Expertengruppe gesammelt. Ein Auszug von diversen Konzepten wird folgend dargestellt.

#### **Solare Verdampfung unter Verwendung eines photo-thermischen Schirms für die Abwasserentsorgung (nähere Informationen unter (14))**

Das Verfahren der Verdunstung in Teichen wird schon seit geraumer Zeit in der Abwasserbehandlung eingesetzt. Die Idee besteht darin, Abwasser in großen offenen Teichen zu lagern und das Wasser durch Sonneneinstrahlung und Wind verdunsten zu lassen, so dass ein Teich mit konzentrierten Restabfällen für die weitere Behandlung übrigbleibt.

Um die Effizienz von solaren Teichen zu steigern dient folgendes Solarreaktor Konzept. Die Idee hinter dem Konzept ist es, den Bedarf an großen Verdunstungsflächen zu verringern, indem Strahlungswärme lokalisiert werden soll. Die Verdampfung bzw. Verdunstung von Flüssigkeiten basiert auf der Erwärmung von Flüssigkeiten. Dabei ist vor allem Sonnenlicht im mittleren Infrarotbereich (IR-Bereich) sowie bei höheren Wellenlängen notwendig, um Verdunstungsraten zu steigern. Die IR-Strahlung oder höheren Wellenlängen können von einem erhitzten schwarzen Körper emittiert werden - ein schwarzer Körper mit einer Temperatur  $<150\text{ °C}$  emittiert  $\sim 99,9\%$  der Strahlung bei Wellenlängen über  $2\text{ }\mu\text{m}$ . Dieses Phänomen nutzt der photo-thermische Schirm. Sonnenlicht wird durch den schwarzen Schirm (Solar Absorber) aufgenommen und dann in Form von IR-Strahlung wieder emittiert. Durch den photo-thermischen "Schirm" soll somit die Effizienz der Verdunstung verbessert werden. (14)

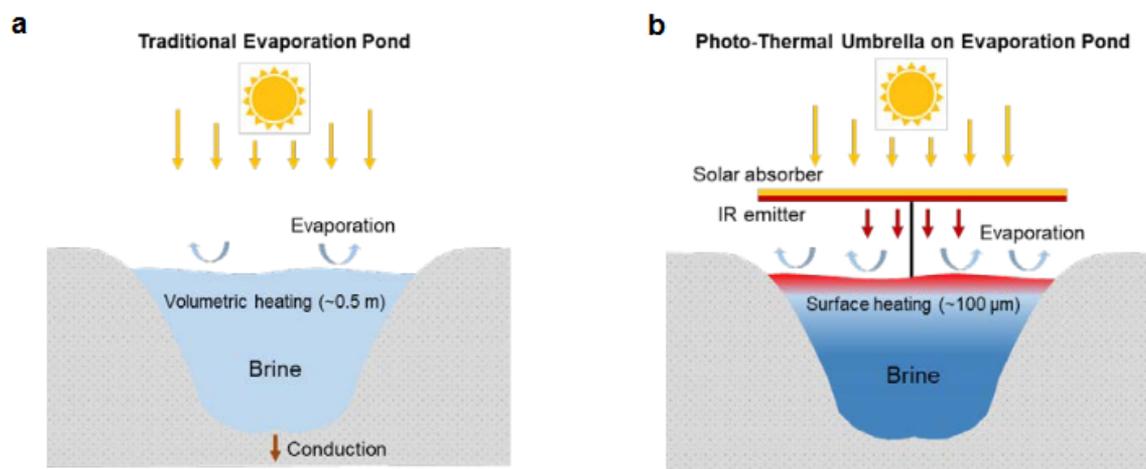


Abbildung 3: Darstellung des solaren Teiches mit dem photo-thermischen Schirm (14)

### Solare Destillation – Flamingo<sup>3</sup>

Das Flamingo™-Wasseraufbereitungssystem basiert auf einem System aus konzentrierter Solarenergie in Kombination mit der Multieffekt-Destillation. Durch ein patentiertes MED-Verfahren wird destilliertes Wasser aus einem Abwasserstrom abgetrennt. Durch die Nutzung von Vakuum zur Erzeugung von Unterdruck ist der Reaktor in der Lage, pumpfähige Schlämme sowie nicht-ideale Wasserquellen anzusaugen. Das Vakuum senkt außerdem den Siedepunkt des Wassers von  $100\text{ °C}$  auf  $83\text{ °C}$ . Die Technologie nutzt 12m lange Abschnitte hochreflektierender, gebogener Spiegel, um die Sonneneinstrahlung zu bündeln und somit Abtrennung von reinem destilliertem Wasser aus dem Feed-/Eingangstrom zu erzielen.

<sup>3</sup> <https://www.jwaoil.com/products/solar-distillation>



Abbildung 4: Darstellung der solaren Destillation – Flamingo (siehe Fußnote 3)

#### Solarkollektor für solare Destillation - SOLARDEW<sup>4</sup>

Das Konzept besteht aus einem Solarkollektor kombiniert mit der Trenntechnologie Membrandestillation, wodurch die Herstellung von Trinkwasser aus praktisch jeder Quelle von verschmutztem, kontaminiertem oder salzhaltigem Wasser mithilfe der Sonneneinstrahlung ermöglicht werden soll. Hauptabsatzmärkte sind Entwicklungsländer, Nothilfe (zB Naturkatastrophen), Militär usw.

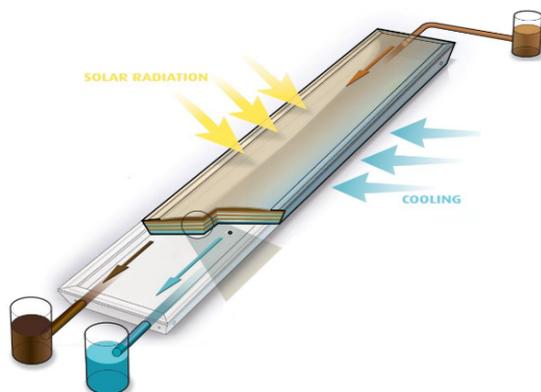


Abbildung 5: Aufbau des Kollektors von SOLARDEW (siehe Fußnote 4)

#### 5.1.5. F&E Bedarf

Aufgrund der Komplexität und Inhomogenität der Prozess- und Abwässer unterschiedlichen Industrien, gibt es komplexe Herausforderungen für künftige Einsatzgebiete für thermische

<sup>4</sup> <https://www.solardew.com/>

Aufbereitungstechnologien in Kombination mit einer erneuerbaren Versorgung, um deren endgültige Demonstration im industriellen Umfeld zu ermöglichen.

Bezugnehmend darauf bzw. den Arbeiten in Bezug auf Membranen (siehe Kapitel 5.1.3) wurde auch der F&E Bedarf zusammengefasst. Der Fokus liegt auf thermischen Membrantechnologien, entsprechend dem Österreichischem Fokus des IEA SHC Task 62.

Tabelle 3: F&E Bedarf mit Fokus auf Membrandestillation

Membran und Materialien	Moduldesign	Systemdesign
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langzeit-Hydrophobizität</li> <li>• Scaling und Fouling</li> <li>• Temperaturresistenz</li> <li>• Mechanische Stabilität</li> <li>• Transmembraner Fluss</li> <li>• Selektivität</li> <li>• Kostenreduktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmerückgewinnung</li> <li>• Thermische Effizienz</li> <li>• Erhöhung von Abtrennraten und Transmembraner Fluss z.B. durch Vakuum</li> <li>• Mechanische Stabilität von Membranen z.B. unter Vakuum</li> <li>• Reinigung, Scaling, Fouling - Vorbeugemaßnahmen, Wartungsmaßnahmen</li> <li>• End-of-Life Recycling</li> <li>• Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieversorgung von schwankenden erneuerbaren Quellen</li> <li>• Effiziente Kühlung</li> <li>• Erweiterte Versorgungstechnologien z.B. Wärmepumpe</li> <li>• Systemsteuerung</li> <li>• Integrierte Systeme</li> </ul>

### Membran und Materialien

**Langzeit Hydrophobizität, Scaling und Fouling:** Die Aufrechterhaltung der langfristigen Hydrophobizität der Membran ist in verschiedener Hinsicht mit der Vermeidung von Scaling und Fouling verbunden, da Ablagerungen auf der Membranoberfläche oder Ablagerungen, die in die Membranporen eindringen, zu erheblichen Veränderungen der natürlichen Eigenschaften der Membran führen. Die derzeitigen F&E-Aktivitäten konzentrieren sich hauptsächlich auf die Untersuchung Scaling in der Meerwasserbehandlung im Labormaßstab mit synthetischen Wasser. Zudem werden die Vorgänge in Simulationsmodellen abgebildet. Diese Untersuchungen müssen für andere komplexe Abwasserströme fortgesetzt werden, um ein breiteres Wissen über die kritischen Betriebsbedingungen für die MD in der industriellen Abwasserreinigung zu erhalten und um über geeignete Designwerkzeuge zu verfügen. Diese Erfahrungen müssen auf die Anwendung im Pilotmaßstab übertragen werden, und es müssen Tests in realer Umgebung durchgeführt werden, um die Experimente und Simulationsmodelle zu validieren. Im Hinblick auf künftige Anwendungen, die höchstwahrscheinlich immer im Grenzbereich liegen werden (Konzentrationsverhältnisse sehr nahe und über der Sättigung), wird die Hydrophobizität unter extremen Bedingungen eine Schlüsseleigenschaft sein, um mit anderen Technologien konkurrieren zu können.

**Temperaturresistenz, Mechanische Stabilität:** Temperaturbeständigkeit und mechanische Stabilität hängen hauptsächlich von den Materialeigenschaften ab. Ziel ist es, einerseits einen MD-Betrieb bei höheren Temperaturen zu ermöglichen, um die Prozesseffizienz zu steigern, und andererseits den

MD-Prozess robuster gegen Temperaturschwankungen und zufällige Temperaturspitzen zu machen, ohne dass komplexe Sicherheitsmaßnahmen erforderlich sind. Bei Polymermembranen, die häufig aus PTFE hergestellt werden, ist der begrenzende Faktor häufig die Trägerstruktur, die in der Regel aus PP (Polypropylen) oder PE (Polyethylen) besteht. Die Membranforschung muss sich mit der Entwicklung von Membranen mit oder ohne Träger befassen, die vollständig temperaturbeständig bis zu mindestens 150°C sind und eine hohe mechanische Festigkeit aufweisen. Zudem werden in neuen F&E-Ansätze röhrenförmige Keramikmembranen für MD untersucht. Keramik vereint den Vorteil hoher Temperaturstabilität und hoher mechanischer Festigkeit, was neue Designmöglichkeiten bietet.

**Transmembraner Fluss, Selektivität, Kostenreduktion:** Der transmembrane Fluss und die Selektivität hängen hauptsächlich von der Porengeometrie ab, während die Veränderung des Porendurchmessers gegenläufige Auswirkungen auf die Optimierung hat. F&E-Aktivitäten sollten sich mit der Entwicklung von Membranen mit enger Porendurchmesser-Verteilung und höheren Flüssen bei kleineren Porendurchmessern befassen, um die Hydrophobizität bzw. LEP (Liquid Entry Pressure) zu erhöhen. Des Weiteren sollen auch zusätzliche Funktionalisierungen von MD-Membranen in Betracht gezogen werden, um zusätzliche Selektivität zu erreichen. Außerdem müssen andere Produktionstechnologien für Polymermembranen entwickelt werden, um die oben genannten Ziele zu erreichen. Die Senkung der Kosten von MD-Membranen und in weiterer Folge der Module ist ein weiterer wichtiger Faktor, um die Marktakzeptanz von MD zu beschleunigen.

### Moduldesign

**Wärmerückgewinnung, Thermische Effizienz, Erhöhung Transmembraner Fluss z.B. durch Vakuum, Mechanische Stabilität z.B. unter Vakuum:** Das Moduldesign ist ein Schlüsselfaktor, um die Effizienz von MD zu erhöhen. Konzepte zur internen Wärmerückgewinnung sind vorhanden und müssen weiter verbessert werden. Die Verringerung der Temperaturpolarisierung durch geeignete Kanalstrukturen bzw. Abstandsmaterialien wird höhere Antriebskräfte und effizientere Prozesse ermöglichen. Die Forschung und Entwicklung befasst sich z. B. mit dem Design von MD-Modulen für röhrenförmige Keramikmembranen, bei denen eine effiziente interne Wärmerückgewinnung eine Herausforderung darstellt. Die Anwendung von Vakuum zur Entfernung nicht gelöster Gase ist ein weiteres Merkmal für die Verringerung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs auch bei niedrigen Betriebstemperaturen. Daher sind keramische Werkstoffe von Interesse, da die Konstruktion von vakuumgestützten Systemen aufgrund der mechanischen Festigkeit des Materials einfacher ist. Außerdem müssen in Zukunft intelligent konzipierte MD-Module mit kostengünstigeren Polymermembranen entwickelt werden, die höheren Vakuumdrücken standhalten können.

**Reinigung, Scaling, Fouling – Vorbeugemaßnahmen, Wartungsmaßnahmen:** Neben Fortschritten beim Membrandesign müssen sich auch die Module und der Betrieb der Module auf die Vermeidung von Ablagerungen und Verschmutzungen konzentrieren. Der Betrieb von MD unter modernsten Bedingungen hat einen hohen F&E-Bedarf.

**End-of-Life Recycling:** In einer Kreislaufwirtschaft, in der die Wasser- und Materialrückgewinnung eine wichtige Anwendung für die MD ist, müssen auch die MD-Module und -Systeme als Teil einer Kreislaufwirtschaft betrachtet werden. Daher muss die Wiederverwendung von MD-Komponenten oder deren Rohmaterial Teil des Designprozesses sein. Der kritischste Teil sind heute die PTFE-Membranen, die ersetzt werden müssen.

**Kosten:** Die Betriebskosten werden hauptsächlich von den Energiekosten (Wärme und Strom) bzw. der Energieeffizienz bestimmt, während die Investitionskosten in Zukunft durch Massenproduktion, kostengünstige Polymere und einfache Systemaufbauten erheblich gesenkt werden können. Die Kosten werden einer der Schlüsselfaktoren für den Wettbewerb mit anderen Technologien sein.

### Systemdesign

**Energieversorgung von schwankenden erneuerbaren Quellen, Effiziente Kühlung, Erweiterte Versorgungstechnologien z.B. Wärmepumpe:** Die Systemintegration von MD im industriellen Umfeld ist je nach Anwendungsfeld individuell. Dennoch müssen diverse Heiz- und Kühlversorgungssysteme untersucht und entwickelt werden, wie z.B. die Integration von Wärmepumpen. Die Versorgung mit erneuerbaren Energien für industrielle Prozesse, wie PV, Wind und Solarthermie, erfordert auch neue Flexibilität der Nutzer für ein besseres Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage ohne zusätzliche Speicherkapazitäten. MD könnte als flexible Last in solchen industriellen Prozesswärmenetzen fungieren. Darüber hinaus müssen Wärmekaskaden entwickelt werden, die im Hinblick auf eine möglichst effiziente Nutzung optimiert sind.

**Systemsteuerung:** Die Digitalisierung bietet enorme Potenziale für die Optimierung von Wasseraufbereitungsprozessen und die Steigerung der Gesamtsystemeffizienz. So könnten z.B. digitale Zwillinge für das Wärmemanagement von Industriebetrieben mit unterschiedlichen Lieferanten und Nutzern eingesetzt werden. Für den MD-Prozess könnte ein digitaler Controller neben der Effizienzoptimierung auch Wartungsintervalle auf der Grundlage von aktuellen und Echtzeit-Betriebsparametern anzeigen.

**Integrierte Systeme:** Bei integrierten Systemen, bei denen die Membran in einen solarthermischen Kollektor integriert ist, befasst sich die Forschung und Entwicklung mit dem Nachweis des Konzepts und der langfristigen Zuverlässigkeit unter realen Umweltbedingungen. Kosteneinsparungen, Vereinfachung von Systemen, Plug-and-Play und einfache Bedienung sind wichtige Eigenschaften dieser Systeme.

## **5.2. Solare Wasser-Dekontaminierungs- und Desinfektionssystemen (Subtask B)**

Hauptziele die Rahmen von Subtask B verfolgt wurden inkludierten:

- Darstellung des Stands der Technik von solaren photokatalytischen Wasser-Dekontaminierungs- und Desinfektionssystemen von industriellen Prozesswässern und Abwässern (Nutzung von UV, solarer Photonenstrahlung)
- Konzepte für neue Technologien mit erhöhter Effizienz durch die Integration von Sonnen/UV-Strahlung
- Identifizierung von Aufbereitungsprozessen für industrielle Prozesswasserströme (z.B. in der Bio- und Agro-Lebensmittelindustrie), die potenziell von direkter Sonnen- und UV-Strahlung profitieren könnten

### 5.2.1. Stand der Technik und Anwendungspotentiale

Neben der wichtigen Thematik der erneuerbaren Energieversorgung, nimmt auch die Aufreinigung von Abwasser einen bedeutenden Stellenwert ein, sowohl global durch regionale Wasserknappheit, als auch in wasserreichen Industrienationen durch die Brisanz der Themen Mikroplastik und schwer abbaubare Spurenstoffe (4. Reinigungsstufe für Kläranlagen). Der Wert der Ressource Wasser wird deutlich durch das Faktum, dass Wasser einen geschlossenen Kreislauf auf der Erde darstellt, während Energie mit einem tausendfachen des Weltenergiebedarfs über Solarstrahlung auf die Erde trifft. In Bezug auf die (Ab)Wasserdekontamination- und Desinfektion sind folgende herkömmliche Methoden verfügbar:

- Chemische Verfahren in den beispielsweise Chlor, Wasserstoffperoxid, Ozon etc. zugegeben werden
- Physikalische Verfahren die über die Erhitzung von Flüssigkeiten arbeiten, eine UV-Bestrahlung nutzen oder Membranen zur Entfernung von Mikroorganismen nutzen

Vor allem bei intensiven chemischen Behandlungen (z. B. mit Ammoniak, Chlorverbindungen, Salzsäure, Natriumhydroxid, Ozon, Permanganat, Alaun und Eisensalzen, Gerinnungs- und Filterhilfsmitteln, Kalkschutzmitteln, Korrosionsschutzchemikalien und Ionenaustauscherharzen) und die dabei anfallenden Rückstände (Schlamm, Salzlösungen, giftige Abfälle) stellen große Probleme in der Entsorgung sowie zusätzlichen Verschmutzung und Versalzung von Süßwasserquellen dar.

Eine Alternative bieten fortgeschrittene Oxidationsverfahren (Advanced Oxidation Processes, AOP) die zur Dekontamination von Wasser, das organische Schadstoffe enthält, und zur Desinfektion (Entfernung von Krankheitserregern eingesetzt) werden. Anwendungsgebiete für die Dekontamination von Trinkwasser bzw. Industriellen Abwässern sind die Entfernung von organischen Substanzen wie Arzneimittel (Antibiotika, Hormone), Agrochemikalien (Biozide, Pestizide) und deren Metabolide.

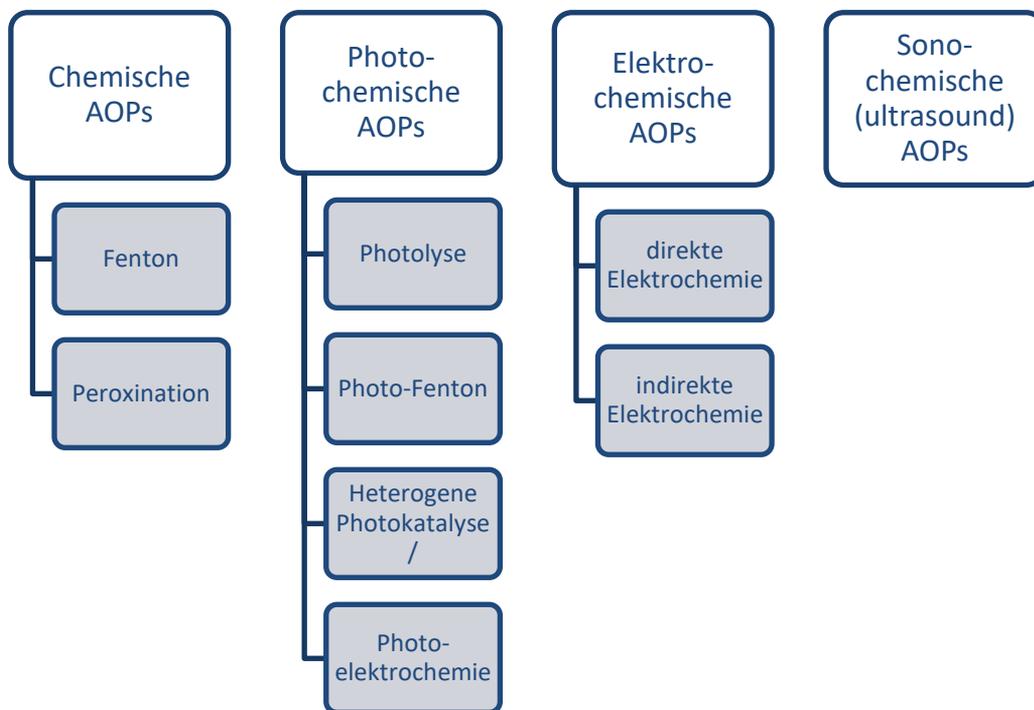


Abbildung 6: Übersicht über die Vielzahl an fortgeschrittenen Oxidationsverfahren (AOPs) (Grafik auf Basis von (15) erstellt)

AOPs inkludieren eine Vielzahl von Verfahren und werden je nach Reaktion in die Kategorien chemische, photochemische, elektrochemische und sonochemische AOPs unterteilt, wobei vor allem photochemische AOPs Solarstrahlung nutzen (15):

Obwohl es verschiedene Reaktionssysteme gibt, basieren alle auf der Bildung von Hydroxylradikalen (-OH), die in der Lage sind, fast alle organischen Moleküle zu oxidieren und zu mineralisieren, wobei  $\text{CO}_2$  und anorganische Ionen entstehen. Sie zeichnen sich auch dadurch aus, dass sie nicht selektiv angreifen, was eine nützliche Eigenschaft für die Abwasserbehandlung und die Lösung von Verschmutzungsproblemen ist. Die Vielseitigkeit der AOPs wird auch durch die Tatsache verstärkt, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, -OH zu erzeugen, was die Einhaltung der spezifischen Behandlungsanforderungen erleichtert. Methoden, die auf UV,  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ,  $\text{O}_3/\text{UV}$  und  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$ -Kombinationen basieren, nutzen die Photolyse von  $\text{H}_2\text{O}_2$  und Ozon zur Erzeugung von -OH. Andere Verfahren, wie die heterogene Photokatalyse und die homogene Photo-Fenton-Methode, beruhen auf der Verwendung eines Halbleiters mit breiter Bandlücke bzw. der Zugabe von  $\text{H}_2\text{O}_2$  zu gelösten Eisensalzen und der Bestrahlung mit UV-Vis-Licht. Beide Verfahren sind von besonderem Interesse, da sie mit Sonnenlicht betrieben werden können. Kommunale Abwässer werden in der Regel mit Belebtschlammssystemen behandelt, bei denen suspendierte Mikroben zur Entfernung von organischen Stoffen und Nährstoffen eingesetzt werden, sowie mit großen Absetzbecken zur Trennung der festen und flüssigen Fraktionen. Industrielle Abwässer sind jedoch häufig durch toxische und/oder biologisch nicht abbaubare organische Verbindungen verschmutzt. Daher müssen Alternativen oder ergänzende Technologien zur herkömmlichen Belebtschlammbehandlung eingesetzt werden. Chemische Oxidationsverfahren, insbesondere AOPs, sind bekannt für ihre Fähigkeit, fast alle organischen Verunreinigungen zu oxidieren und zu mineralisieren. Um die mit AOP

verbundenen Kosten zu minimieren, müssen Verweilzeit und Reagenzienverbrauch durch Anwendung einer optimierten Kopplungsstrategie minimiert werden. Weitere vorgeschlagene Kostensenkungsmaßnahmen sind die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, d.h. Sonnenlicht als Bestrahlungsquelle. Neben der Möglichkeit, Sonnenlicht zu nutzen, haben photokatalytische Prozesse den Vorteil, dass sie bei Raumtemperatur und ohne Überdruck ablaufen, eine vollständige Mineralisierung stattfinden kann, der Sauerstoff aus der Atmosphäre gewonnen wird und der Katalysator billig und unschädlich ist.

Insbesondere das Photo-Fenton-Verfahren wurde aufgrund seiner hohen Wirksamkeit bei der Entfernung von widerspenstigen Verunreinigungen in komplexen wässrigen Matrixen für die Abwasserbehandlung umfassend untersucht. Die beobachtete Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit (im Vergleich zum klassischen Fenton-Verfahren), wenn eine Strahlungsquelle hinzugefügt wird, ist auf die Reduktion von  $\text{Fe}^{3+}$  zu  $\text{Fe}^{2+}$  zurückzuführen, eine Reaktion, bei der  $\text{-OH}$  entsteht und  $\text{Fe}^{2+}$  regeneriert wird, das erneut mit  $\text{H}_2\text{O}_2$  reagieren kann. Dadurch erhöht sich die Menge an  $\text{Fe}^{2+}$  und die Fenton-Reaktion wird beschleunigt. Der größte Nachteil dieses Verfahrens besteht jedoch darin, dass der pH-Wert der Wassermatrix auf einen Wert unter 3 eingestellt werden muss, um die Ausfällung von Eisen in Form von Eisenhydroxid zu vermeiden, was eine breitere Anwendung in großem Maßstab immer noch einschränkt. Die Effizienz des Photo-Fenton-Systems hängt von mehreren Betriebsparametern ab, unter anderem von der Dosis des Fenton-Reagens (d. h. den Konzentrationen von  $\text{H}_2\text{O}_2$  und Eisen), dem pH-Wert und dem organischen/anorganischen Gehalt der Abwassermatrix. Durch die Optimierung der Katalysator- und Oxidationsmitteldosierung ist das Verfahren in der Lage, komplexe Wassermatrizes, wie z. B. kommunale Abwässer, zu behandeln und dabei Schadstoffe, die Anlass zu Besorgnis geben, schnell und vollständig zu entfernen und ein hohes Maß an Desinfektion zu erreichen. Es wurde eindeutig nachgewiesen, dass eine Erhöhung der  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Konzentration zu einer verstärkten Bildung von  $\text{-OH}$  führt, was wiederum eine erhöhte Abbaurate zur Folge hat. Die Verwendung einer übermäßigen Konzentration des Oxidationsmittels wird jedoch nicht empfohlen, da dies antagonistische Reaktionen (d. h. die Reaktion des Oxidationsmittels mit dem erzeugten  $\text{-OH}$ ) und damit die Bildung von Radikalen auslösen kann, die weniger reaktiv sind als das  $\text{-OH}$ . Mehrere Studien bestätigen auch, dass das Vorhandensein von anorganischen Anionen (z. B. Karbonat, Chloride, Sulfate) im Abwasser die Abbaugeschwindigkeit von Schadstoffen während der Photo-Fenton-Behandlung als Fänger von  $\text{-OH}$  beeinflussen kann. Im Falle von Phosphat kommt es in einem weiten pH-Bereich zur Ausfällung mit Eisen.

Neben der reinen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung wurde in den letzten Jahren auch verstärkt der Synergieeffekt von AOPs zur Abwasserbehandlung in Kombination mit beispielsweise der photokatalytischen oder photoelektrochemischen Wasserstofferzeugung untersucht. (16)

Die potenziellen Anwendungsbereiche von AOPs haben in den letzten Jahren zwar stark zugenommen, jedoch sind Anwendung in großem Maßstab sind noch nicht vollständig umgesetzt. Um Informationen zum Stand der Technik der Technologien sowie der Potentiellen Anwendungsgebiete für solare Wasseraufbereitung zu bekommen wurde eine Literatur- und Marktübersicht erstellt. Dazu wurden potenzielle Interessengruppen in der Wasser- und Abwasserindustrie gebeten, Informationen über ein Nutzerbedarfs- und Technologieprofil (UNTP) bereitzustellen. Die Ergebnisse zeigen, dass verschiedene solare Wasserreinigungstechnologien (Solarthermie und direkte Photonenreaktion) für die Behandlung von Abwässern bereits verfügbar

sind (siehe Abb. 3). Die Technologiereife dieser Technologien (Technology Readiness Level, TRL) liegt zwischen 3 (Labortests) und 8 (Marktreife, kommerziell verfügbar). Der größte Teil der Technologien befindet sich jedoch noch in einem frühen Entwicklungsstadium oder es gibt nur wenige Implementierungen, die bereits verfügbar sind. Die erfassten Technologien wurden (in der Reihenfolge vom größten bis zum geringsten Vorkommen) in folgende Kategorien eingeteilt: direkte solare Oxidationsreaktoren, solarthermische Kollektoren, solarthermische Entsalzung, Membrandestillation, hybride Photooxidation durch Membrandestillation, direkter solarer Desinfektionsreaktor, solare Oxidationsmembranreinigung und Nassluftoxidation. Sie wurden jeweils im Hinblick auf Entwickler, Leistungsmerkmale, Vorteile und Limitierungen (auf der Grundlage der bereitgestellten oder verfügbaren Informationen) vorgestellt. Nähere Informationen stehen im Deliverables des IEA SHC Task 62 zur Verfügung und können unter (<https://task62.iea-shc.org/>) abgerufen werden.

Tabelle 4: Übersicht über das Feedback zu erfassten Technologien, deren TRL und Unternehmen bzw. Instituten aus verschiedenen Ländern die sich mit den Technologien beschäftigen

Technologie Kategorie	Unternehmensart / Kategorie	Technology Readiness Level	Hauptsitz
Reaktor für direkte Solare Oxidation	Universität & Forschungsinstitut	TRL 4-6 TRL 9	Chile, Italien, Spanien
Solare Destillation	Unternehmen	TRL 9	Australien
Membran Destillation	Forschungsinstitut & Unternehmen	TRL 5-7 TRL 9	Niederlande, Deutschland, Österreich
Membran Destillation hybrid mit Photooxidation	Forschungsinstitut	TRL 4	Australien
Reaktor zur direkten solaren Desinfektion	Forschungsinstitut	TRL 7	Spanien
Solare Oxidation – Membran Reinigung	Universität	TRL 3	Australien
Nassluftoxidation + solarthermische Kollektoren	Forschungsinstitut	TRL 4	Spanien

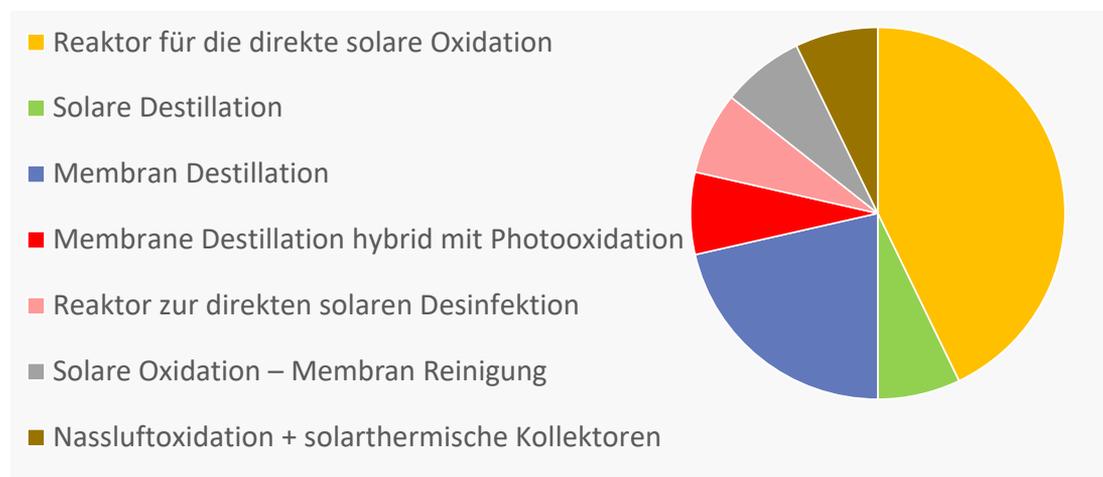


Abbildung 7: Übersicht der Ergebnisse aus Tabelle 4 zu erfassten Technologien

## 5.2.2. Konzepte für Solarreaktoren unter Nutzung von Photonen

### Photokatalytische Trinkwasseraufbereitung

In Entwicklungsländern gibt es oft keine zuverlässige Trinkwasserinfrastruktur. Die Aufbereitung des Trinkwassers liegt in der Verantwortung des Verbrauchers. Für die Aufbereitung von Haushaltswasser werden verschiedene Methoden eingesetzt, darunter Filtration, Flockung, Chlorierung sowie thermische und UV-Desinfektion(17). UV- und thermische Desinfektion werden in Entwicklungsländern bevorzugt, da die Sonneneinstrahlung in diesen Regionen reichlich vorhanden ist. Zusätzliche Chemikalien oder komplexe Mechanismen sind für die solare Desinfektion (SODIS) in transparenten Behältern nicht erforderlich. Eine gängige Praxis ist die mikrobielle Inaktivierung in Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET). Die Behandlung von Wasser in PET-Flaschen ist jedoch auf ein Volumen von weniger als 3 l beschränkt, was bedeutet, dass ein durchschnittlicher Haushalt über genügend Flaschen und Zeit verfügen muss, um ausreichend Trinkwasser zuzubereiten. Außerdem müssen PET-Flaschen bei bewölktem Wetter mindestens zwei Tage lang der Sonne ausgesetzt werden, um die erforderliche Trinkwasserqualität zu gewährleisten (18).

Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurde ein SODIS Enhanced Batch Reactor (EBR) mit einem Volumen von 25 l entwickelt, um sicheres Trinkwasser für einen durchschnittlichen Haushalt zu erzeugen (18) . Der Reaktor wird chargenweise gesteuert, da frühere Studien herausfanden, dass die Inaktivierung von Bakterien effektiver ist, wenn sie über einen kurzen Zeitraum einer tödlichen UV-A-Dosis ausgesetzt werden, als wenn sie über einen längeren Zeitraum mit subletalen Dosen im Reaktor rezirkulieren (19). Der EBR wurde aus einer Methacrylat-Röhre konstruiert und gebaut, die im linearen Brennpunkt eines zusammengesetzten Parabolrinnenkollektors (CPC) platziert und mit einer Neigung von 37° montiert wurde (siehe Abbildung 8). Der CPC bündelt das Sonnenlicht mit einem Faktor von zwei, sowohl die direkte als auch die diffuse Strahlung. Daher ist es nicht notwendig, den Reaktor neu auszurichten, um der Sonne für eine optimale Absorption zu folgen. Nach 5 Stunden erreicht der Reaktor in Zeiten starker Sonneneinstrahlung eine vollständige Inaktivierung der Bakterien. Bei bewölktem Himmel und geringer Sonnenintensität muss das Wasser bis zu 2 Tage im EBR behandelt werden, um die Trinkwasserqualitätsnormen zu gewährleisten (18) .



Abbildung 8: Reaktor zur solare Desinfektion (SODIS) (18)

## Solarreaktor zur photo-elektrochemischen Erzeugung von Wasserstoff aus Abwasser<sup>5</sup>

AEE INTEC arbeitet an der Entwicklung eines innovativen Reaktorkonzeptes zur photo-elektrochemischen Gewinnung von Wasserstoff aus Abwasser. Das Design des Solarreaktors inkludiert einen gezielten Prozessintensivierungsansatz in dem eine photo-elektrochemische Zelle (PEC) in eine konzentrierende Solarkollektorröhre mit optimierter Rheologie integriert. Zur Konzentration der solaren Einstrahlung wird die Solarkollektorröhre von einem Hohlrinnenspiegel umgeben. Der photo-elektrochemische Prozess wird eingesetzt um Wasser durch die direkte Nutzung des Sonnenlichts in seine Bestandteile zu spalten und somit alternative Treibstoffe wie Wasserstoff zu erzeugen. Zur Steigerung der Prozesseffizienz wird in Versuchsreihen Abwasser genutzt, da im Abwasser enthaltene Schad- und Abfallstoffe (z.B. Mikroplastik, Pestizide, Spurenstoffe) im weitesten Sinne als zusätzliche „Quelle“ des Wasserstoffes (Opfersubstanzen) dienen. Der Vorteil – gleichzeitig zur Treibstoffherzeugung findet eine wesentliche Schadstoffelimination und somit Reinigung des Abwassers statt. Durch die Kombination dieses einzigartigen Verfahrenskonzeptes mit der direkten Nutzung der Solarenergie ist es möglich, der Oxidation der Abbaukomponenten genügend Verweilzeit im Reaktor zu bieten bei gleichzeitig intensivem Energie- und Massentransfer, und damit guter Durchdringung der Strahlung in die Reaktionsröhren. Der Aufbau des Reaktors erfolgt im Technikum der AEE INTEC in Gleisdorf (Österreich) und wird dort unter realen Einstrahlbedingungen getestet.

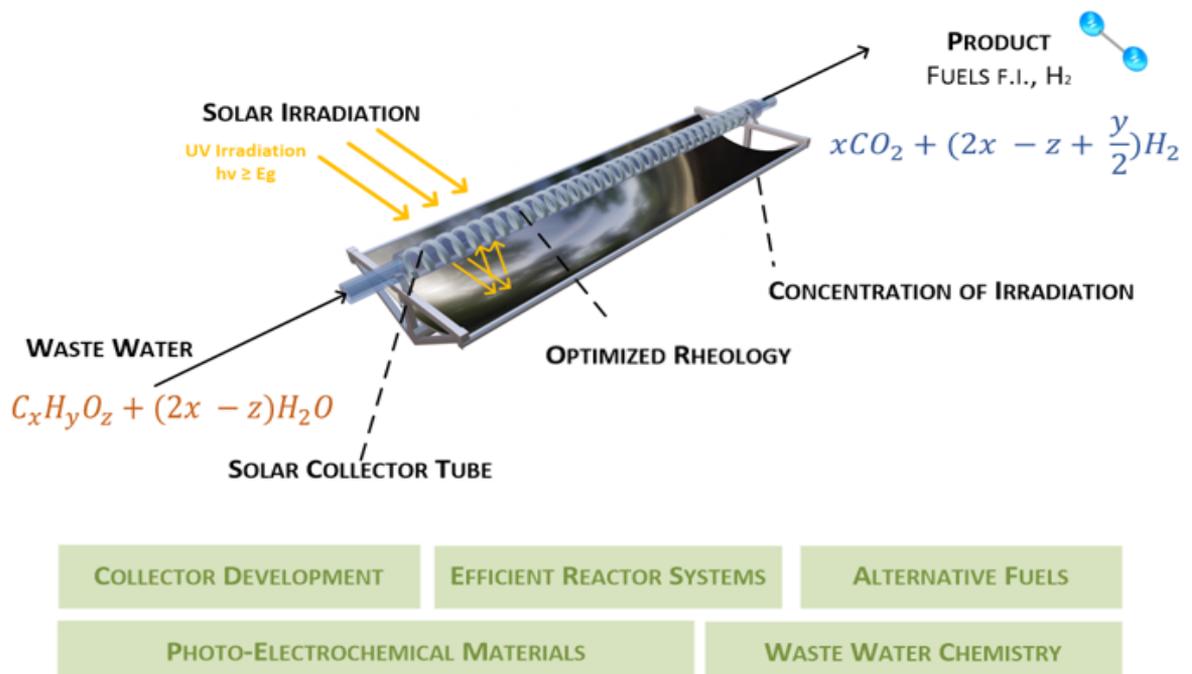


Abbildung 9: Aufbau des Solarreaktors(AEE INTEC)

<sup>5</sup> <https://www.aee-intec.at/pec-solarreaktor-solarreaktor-zur-photo-elektrochemischen-gewinnung-von-wasserstoff-aus-abwasser-p306>

## **Photokatalytische bzw. photoelektrochemische Umwandlung von CO<sub>2</sub> (CCU)**<sup>6</sup>

Solare Treibstoffe die durch die solare Umwandlung von CO<sub>2</sub> und Wasser hergestellt werden, können zu einer drastischen Verringerung der Treibhausgasemissionen beitragen und einen vom Menschen geschaffenen Kohlenstoffkreislauf einrichten, der den natürlichen Kreislauf ergänzt und die Strategie der Kreislaufwirtschaft umsetzt. Derzeit sind jedoch noch erhebliche Weiterentwicklungen bei eingesetzten Photokatalysatoren und Reaktortechnologien erforderlich, damit die Herstellung von solaren Treibstoffen technisch machbar, skalierbar, ökonomisch, sicher, nachhaltig und effizient wird.

Im Projekt DESIRED6 AEE INTEC arbeitet gemeinsam mit internationalen Partnern einen einem Reaktorkonzept zur direkten Verarbeitung von atmosphärisches CO<sub>2</sub> und Wasser zur Herstellung kohlenstoffreicher (C2+) Energieprodukte unter Verwendung von Sonnenlicht als primärer Energiequelle ab. Dabei kommen neuartige und recyclebare Photoelektrokatalysatoren in einem optimierten Reaktordesign mit optimierter Rheologie und unter Nutzung direkter Sonneneinstrahlung zum Einsatz.

### **5.2.3. Barrieren (technologisch, wirtschaftlich, politisch) für Dekontaminierungs- und Desinfektionssysteme**

#### **Technologische und ökonomische Barrieren**

Die Ergebnisse aus der Beantwortung des Fragebogens, zeigen deutlich die Wechselbeziehung zwischen den verschiedenen Kategorien von Barrieren. So sind technologische Hindernisse eng mit wirtschaftlichen Hindernissen verbunden und werden daher gemeinsam behandelt. Eine Übersicht über die genannten technologischen und wirtschaftlichen Barrieren ist in Tabelle 5 ersichtlich.

Als eines der wichtigsten Hindernisse für ihre industrielle Umsetzung von neuen Technologien für die Behandlung von Industrieabwässern wurden Kostenaspekte als Haupthindernis erwähnt.

In allen Ländern, unabhängig vom Entwicklungsstand, ist die Behandlung von Abwasser eine Herausforderung und kostspielig, obwohl dieses Problem in unterentwickelten Ländern oder Entwicklungsländern offensichtlich noch größer ist.

Die hohen Kosten für die Installation neuer Technologien zur Entwicklung industrieller Kreislaufsysteme sind insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ein Problem. Dies spiegelt sich beispielsweise in der europäischen Textilindustrie wider. Diese Industriesparte besteht hauptsächlich aus KMUs und verfügt derzeit über geringen Raten an umgesetzten Wiederverwendungsmaßnahmen für Wasser bzw. Behandlungsmaßnahmen vor-Ort für Abwasser. Unabhängig von den öffentlichen Investitionsinstrumenten, die nicht nur auf europäischer oder nationaler Ebene zur Verfügung stehen, gibt es einen starken und bedeutenden Mangel an Investitionen des privaten Sektors in die Entwicklung und Umsetzung neuer Technologien. Möglicherweise könnten regulatorische Anpassungen und Änderungen (z.B. neue Vorschriften zur Abwasserreduktion und -behandlung) Investitionen im privaten Sektor zu verbessern.

Tabelle 5: Ergebnisse aus dem Brainstorming im Rahmen des IEA SHC Task 62.

---

<sup>6</sup> <https://desired-project.eu/>

## Technologische Barrieren

## Wirtschaftliche Barrieren



- Kosten
- Fehlendes Know-How
- Optimierte Energieversorgung (inkl Speichermanagement)
- Mangel an Platzverfügbarkeit für Solarinstallation bei der Kombinierten Betrachtung von Solar und Abwasserbehandlung
- Vorbehalte gegenüber neuen Technologien in der Industrie
  - • Geringes Interesse an Aufbereitungstechnologien; nur in wenigen Sektoren präsent, die konkrete Aufbereitungsprobleme haben
- Investitionskosten
- Betriebskosten (€/m<sup>3</sup> Frischwasserbilliger als recyceltes Wasser)
- Geringer Reifegrad bei hohen Investitionskosten – in Summe ein zu hohes Risiko
- Regulative und ökonomische Anreize zu gering
  - • Kosten und Zeitaufwand

Kostenverursacher in der Installation von neuen Technologien sind neben Investitionskosten auch Betriebskosten. Diese inkludieren beispielsweise Energiekosten, verursacht durch den hohen elektrischen Energiebedarf bei druckgetriebenen Membrantechnologien. Ansätze zur optimierten Energieversorgung und Integration erneuerbarer Energiequellen sind daher erforderlich. Des Weiteren entstehen oftmals auch hohe Kosten beim Einsatz von notwendigen Betriebsmitteln. Traditionell zeichnen sich fortschrittliche Oxidationstechnologien für die Sanierung von Industrieabwässern mit persistenten Inhaltsstoffen durch ihre hohen Betriebskosten aufgrund der benötigten chemischen Reagenzien aus. Zu diesen Verfahren gehören Ozonierung, hochdosierte UV-Strahlung, Elektrokatalyse, Nassoxidation, Umkehrosmose usw.

Eine Möglichkeit, die Kosten zu senken, ist ein effizientes Design mit einem selektiven Ansatz je nach Art des zu behandelnden Abwassers und dessen Endbestimmung. Die geforderte Endqualität des behandelten Wassers beeinflusst die zu diesem Zweck gewählte Behandlung. Dieser "zweckmäßige" Ansatz würde durch die Wahl bzw. Kombination der richtigen Technologien Kosten sparen. So können beispielsweise Integrationsstrategien durch die Kombination von konventionellen oder fortschrittlichen Lösungen die Kosten (zumindest die Betriebskosten) drastisch senken, wobei die hohe Effizienz bei der Schadstoffeliminierung erhalten bleibt. Auch die Art des zu behandelnden Abwassers hat Einfluss auf die Effizienz des Verfahrens.

Die Entwicklung neuer Technologien ermöglicht eine fortschrittlichere Behandlung als die herkömmliche, wobei einige der vorgeschlagenen Technologien keine ausreichende kommerzielle Reife erreichen oder, obwohl sie vielversprechend sind, nicht über die geeigneten Materialien

verfügen, wie z. B. bei Membrantechnologien über kommerzielle Membranen, die speziell für diesen Prozess entwickelt wurden. Aufgrund dessen sind neue Technologien oft mit Vorbehalten (unsicher, teuer etc.) behaftet, wodurch ihre Marktdurchdringung gehemmt wird.

Der Erfolg einer Technologie hängt auch von den Betriebs- und Wartungsarbeiten ab. Fehlendes Know-How in Bezug auf die Technologie sowie bei Wartung und Betrieb können zu mangelhaften Behandlungsergebnissen führen. Schließlich machen das Fehlen praktikabler Optionen für die Wiederverwendung von behandeltem Abwasser, die Rückgewinnung von Nährstoffen und Energiequellen aus Abwasser und Klärschlamm die Wiederverwendung von Wasser zu einer ungewöhnlichen und für Investoren unattraktiven Praxis.

### **Politische Barrieren**

Neben den technologischen und wirtschaftlichen Hindernissen wurden auch politische Barrieren analysiert. Die Ergebnisse sind in einer Übersicht in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Ergebnisse aus dem Brainstorming im Rahmen des IEA SHC Task 62.



Zwar versucht die Industrie mit der Zeit immer bewusster und gezielter ihren Wasserfußabdruck zu verringern, allerdings ist der Prozentsatz des wiederverwendeten Wassers aufgrund mangelnden Wissens über die Bedeutung eines Abwassersystems, mangelnden Bewusstseins für die Umweltproblematik, mangelnder Beteiligung von Bürgern und Stakeholdern sowie mangelndem Management zwischen Betreibern, Verbrauchern und der Regierung im Allgemeinen gering. Zudem gibt es immer noch Länder, die keine Probleme mit Wasserknappheit haben. Dies führt dazu, dass oftmals in wasserreichen Nationen das Bewusstsein für dieses weltweit existierende Problem fehlt und daher der Abwasseraufbereitung eine geringe Wichtigkeit zugeschrieben wird. In diesen Regionen wird die Nutzung von Süßwasser immer günstiger sein als die Umsetzung von Kreislaufkonzepten für die Wasserwirtschaft. Allerdings ist in diesen nördlichen Ländern nicht die Wasserknappheit das

Problem, sondern die Wasserqualität. Süßwasserquellen verschmutzen zunehmend, was eine Anreicherung von Schadstoffen mit sich bringt. Ein rechtliches und ordnungspolitisches Hindernis ist schließlich die fehlenden behördlichen Vorgaben und Regulierungen in Bezug auf die Wasserqualität. Die abwassererzeugenden Unternehmen investieren das Geld, um die gesetzlich vorgeschriebenen Qualitätsstandards zu erreichen, und auch die kommunale Abwasserentsorgung basiert auf regulierten Standards. Es liegt auf der Hand, dass neue Vorschriften und Gesetze erforderlich sind, die nicht nur vor der Einleitung in die Kanalisation strengere Wasserqualitätsparameter vorschreiben, sondern vor allem dann, wenn das Abwasser für Aktivitäten wie die Bewässerung von Pflanzen oder sogar für industrielle Prozesse wiederverwendet werden soll.

### **5.3. Systemintegration und Entscheidungshilfe in der Anwendung (Subtask C)**

Hauptziele die in Rahmen von Subtask C des IEA SHC Task 62 bearbeitet wurden umfassen:

- Entwicklung von Integrationskonzepten für die Einbindung von Solarenergie in Technologien zur Abwasseraufbereitung/-abtrennung (Fokus Membrandestillation) im industriellen Bereich
- Entwicklung eines Decision-Making-Tools zur Identifikation der technisch und wirtschaftlich sinnvollsten Optionen für die solare Abwasseraufbereitung in einem Industriebetrieb
- Aufzeigen von Anwendungsbeispielen

#### **5.3.1. Entscheidungskriterien für solare Abwasserbehandlung**

Es gibt vier Hauptelemente in einem solarintegrierten Wasser-/Abwasserbehandlungssystem, nämlich das Sonnenlicht, den Wasser-/Abwasserbehandlungsprozess, die Energieerfassungseinheit und den Energiespeichermechanismus. Bei der Berücksichtigung der Anforderungen der Endnutzerindustrien müssen zunächst die Wasserqualitätsparameter (und -anforderungen) des ein- und ausfließenden Wassers/Abwassers definiert werden, um die Optionen für die Auswahl der Behandlungsverfahren einzugrenzen. Aus der Sicht der Endnutzer ist es daher in der Regel praktischer, die Systemplanung mit der Auswahl des Wasser-/Abwasserverfahrens zu beginnen. Oftmals sind Abwasseraufbereitungsanlagen in Betrieben bereits vorhanden und sollen mit alternativen Energiequellen wie Solarenergie in das bereits vorhandene System integriert werden. In allen Fällen können andere Komponenten (wie Prozessausrüstung und Betriebseinheiten) des integrierten Behandlungsprozesses anschließend auf der Grundlage der Auswahl des Behandlungsprozesses (oder gegebenenfalls auf der Grundlage einer Liste möglicher Behandlungsprozesse) ausgelegt werden.

##### **(1) Verfügbarkeit von Solarthermie**

Die Verfügbarkeit der Solarenergie kann je nach Region stark variieren, wodurch es in erster Linie wichtig ist, den Standort in Bezug auf die Verfügbarkeit von Solarthermie zu integrieren. Die durchschnittliche Sonnenbestrahlungsstärke kann aus verschiedenen Quellen wie [6] oder durch Feldstudien in der betreffenden Region ermittelt werden. Bei dieser Bewertung gehören die Gesamtenergiemenge pro Jahr, die Bestrahlungsstärke (Energie/ (Fläche·Zeit)), die Schwankungen

der verfügbaren Bestrahlungsstärke (Minimum, Maximum, Schwankungen während des Tages und während der Jahreszeiten) und die Häufigkeit der Unterbrechungen (Tag/Nacht, saisonale Schwankungen usw.) zu den Faktoren, die je nach der Tiefe der Entscheidungsanalyse bewertet werden müssen. Neben den genannten Faktoren sollten auch alle für den Wasser-/Abwasseraufbereitungsprozess relevanten Faktoren bewertet werden. Beispielsweise ist bei Desinfektionsprozessen der UV-Index (oder die UV-Bestrahlungsstärke) des Sonnenlichts manchmal von größerer Bedeutung als seine Wärmeenergie und sollte entsprechend bewertet werden.

## **(2) Technologie zur (Ab-)Wasseraufbereitung**

Die Auswahl des Wasseraufbereitungsverfahrens hängt von den Wasserqualitätsparametern des Speisewassers/Abwassers und den erforderlichen Qualitätsparametern für das Produktwasser ab. Sie hängt auch von der erforderlichen volumetrischen Kapazität des behandelten Wassers ab. Nach der Auswahl des geeigneten Wasser-/Abwasseraufbereitungsverfahrens muss der Energiebedarf des Systems ermittelt werden. Zu diesem Zweck wird zunächst die Form der benötigten Energie (thermisch, elektrisch, Photonen) für das ausgewählte Wasser-/Abwasserbehandlungsverfahren bestimmt. Die erforderliche Leistung (Energie/Zeit) pro Volumen- oder Masseneinheit des produzierten (oder behandelten) Wassers kann dann je nach Prozess bewertet werden. Diese Leistung muss durch den Einsatz einer geeigneten Energieerfassungseinheit mit der Sonnenenergie in Einklang gebracht werden. Die Auswahl der Energiegewinnungsanlage wird im nächsten Abschnitt erörtert.

## **(3) Technologien zur Nutzung von Solarenergie**

### **Thermische (Ab-)Wasseraufbereitung**

Wie in Kapitel 4.1.1 gezeigt, sind inkludieren thermische Verfahren jene Technologien, die thermische Energie zur Wasseraufbereitung bzw. Rückgewinnung wertvoller Ressourcen nutzen. Die thermische Nutzung der Sonnenenergie kann mit aktiven oder passiven Systemen erfolgen. Für industrielle Prozesse werden hauptsächlich aktive Systeme eingesetzt. Das Grundprinzip der aktiven solarthermischen Wärmenutzung ist die Umwandlung der kurzwelligigen Sonnenstrahlung in Wärme (photo-thermische Umwandlung) durch Absorption der Sonnenstrahlung mit einem geeigneten Kollektor. Die Kollektortypen lassen sich nach dem Wärmeträgermedium (Flüssigkeit oder Luft) und der Art der Strahlungsabsorption (konzentrierend oder nicht konzentrierend) unterscheiden. Konzentrierende Systeme nutzen Strahlung mit ein- oder zweiachsiger Nachführung. Gängige Kollektortypen sind nicht konzentrierende Flachkollektoren mit einer Flüssigkeit als Wärmeträgermedium, die einen Absorber mit Antireflexionsabdeckung verwenden (siehe Abbildung 10). Sie werden typischerweise für Temperaturniveaus bis 100 °C oder etwas darüber eingesetzt. Vakuumröhrenkollektoren erreichen höhere Temperaturen als Flachkollektoren und sind in der Industrie ebenfalls weit verbreitet.

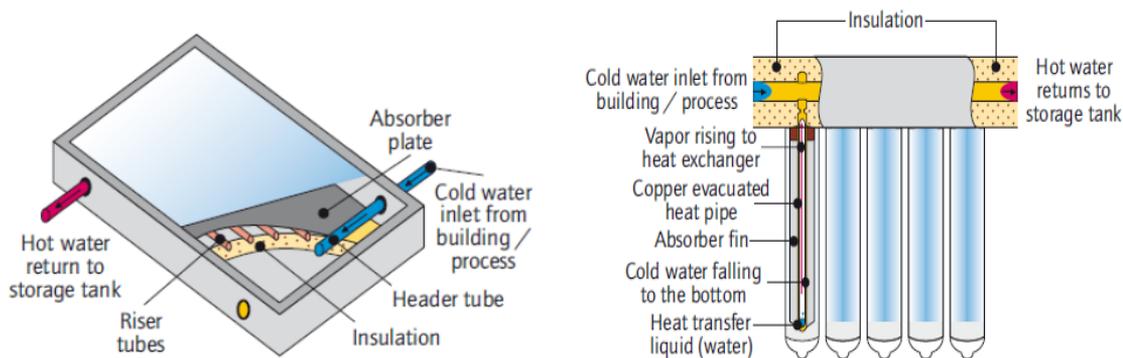


Abbildung 10: Flachkollektor (links) und Vakuumröhrenkollektor (rechts) (20)

Details zur solarthermischen Einbindung in Industrieprozesse wurden detailliert im IEA SHC Task 49 erarbeitet und können in den entsprechenden Dokumenten nachgelesen werden.

### **(Ab-)Wasseraufbereitung mittels Photonen**

Photonenbasierte Verfahren (solare Photokatalyse und solare Desinfektion) erfordern die direkte Einwirkung von Licht auf das Abwasser. Daher sind eine effiziente Sammlung und Absorption des Sonnenlichts bei diesen Verfahren von großer Bedeutung. Die industrielle Anwendung von photonenbasierten Prozessen erfordert in der Regel den Einsatz eines Photoreaktors (z. B. Compound Parabolic Collectors (CPC)). Verschiedene Faktoren beeinflussen die Effizienz von Photoreaktoren: (i) Sicherstellung, dass das Sonnenlicht das Abwasser innerhalb des Reaktors erreichen kann, (ii) Optimale Nutzung der Wellenlängen, (iii) die Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts und (iv) der eingesetzte Katalysator.

Um sicherzustellen, dass das Sonnenlicht das Abwasser erreichen kann, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, wie z. B. die Lichtabsorption durch das Abwasser, optimale Lichtreflexion und an Anordnung von Fokussierspiegeln sowie die Lichtstreuung im Abwasser. So kann beispielsweise eine höhere Katalysatorbeladung bei heterogenen Katalysatoren zu einer stärkeren Lichtstreuung führen, wodurch die Eindringtiefe des Sonnenlichts in das Abwasser im Photoreaktor erheblich verringert wird. Darüber hinaus beeinflussen die Geometrie, Rheologie und das Material des Sonnenlichtreflektors das Reflexionsvermögen und die Absorption des Sonnenlichts.

Wichtige Parameter in der Auslegung von Photoreaktoren sind die Verweilzeit, die auf der Grundlage der Kinetik der Dekontaminations-/Abbaureaktion berechnet wird. Zu diesem Zweck wird die Verweilzeit so berechnet, dass das Sonnenlicht mit einer bestimmten Bestrahlungsstärke (oder mit einer bestimmten UV-Bestrahlungsstärke) die Konzentration der Schadstoffe von dem für das Abwasser vorgegebenen Wert auf den erforderlichen Wert senken kann.

### **5.3.2. Tool zur Entscheidungsunterstützung**

Um den Entscheidungsprozess zu unterstützen, sind Entscheidungskriterien ein essentieller Teil um Industrieunternehmen (z.B. Lebensmittel- und Getränkeindustrie, Galvanikindustrie) und (kommunalen) Kläranlagenbetreibern zu zeigen, welche Optionen/Integrationskonzepte für die solare Wasseraufbereitung unter den oben beschriebenen Rahmenbedingungen zur Verfügung stehen und welche die technisch sinnvollste Variante darstellt. Um dies zu ermöglichen wurden im

Rahmen der Arbeiten des IEA SHC Task 62 ein Tool konzeptioniert, um eine breite Anwendungsmöglichkeit zu bieten. Je nach **(1) Eingabe Datenbasis) der Wasseraufbereitungsaufgabe** (Abwasserkennwerte, Informationen zur Abwärme, Industriestandort, etc.) und Auswahl des **(2) Aufbereitungsziels** (z.B. Konzentration oder Abtrennung bestimmter Komponenten) sowie **(3) Auswahl der Technologie** werden **(4) Berechnungen** (Massen- und Energiebilanzen) durchgeführt, um grobe Leistungswerte (Energiebedarf, Solarertrag, Kollektorfläche, etc.) darzustellen und **(5) Empfehlungen** für die Integration zu geben. Die Abwasserberechnungen basieren auf der Integration der Membrandestillation als Behandlungstechnologie. Bei der Energieversorgung kann zwischen Solarthermie oder Abwärme gewählt werden. Der Grundaufbau des Tools ist in Abbildung 11 dargestellt.

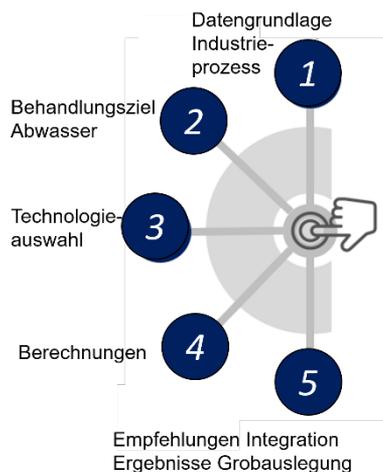


Abbildung 11:Übersicht über den Aufbau des Decision-Making- Tools

### 5.3.3. Integrationskonzepte

Als Ergebnis aus dem IEA SHC Task 62 stehen Integrationskonzepte zur Verfügung, die einen Rahmen zur optimierten Kombination von Abwasserbehandlungstechnologien mit der Energieversorgung zu schaffen. Berücksichtigung finden solarthermische Technologien, andere erneuerbare Energietechnologien (z.B. Wärmepumpe) und überschüssige Wärme (Abwärme) aus industriellen Prozessen bzw. deren hybride Kombination.

Die Systemintegrationskonzepte sollen grafisch darstellen, wie Energiequellen wie Solarthermie in Kombination mit Abwasserbehandlungsprozessen wie thermischen Trennverfahren (Beispieltechnologie Membrandestillation) integriert werden können, um den Energiebedarf auf erneuerbare Weise abzudecken. Die Integrationskonzepte sind modular aufgebaut in Basismodule, Hilfsmodule (Zusatzmodule) und Integrationsmodule. Jedes Konzept hat mindestens ein Basismodul für die Versorgung mit erneuerbarer thermischer Energie (Energieerfassungseinheit), wie z.B. Solarthermie (siehe Abbildung 12) oder Wärmepumpen. Auch die Möglichkeit zur Integration von Abwärme ist gegeben. Zusätzlich zu den Basismodulen gibt es eine große Anzahl von Zusatzmodulen (z. B. Ladung, Speicherung, Entladung, Integration). Zusatzmodule ermöglichen die Integration von erneuerbaren Prozesswärme-Modulen zur Wärmeversorgung auf Prozess- oder Systemebene und

erlauben die Anpassung des Konzepts an die jeweiligen Anforderungen. In Abbildung 12 ist beispielhaft die Wärmeversorgung für MD auf Prozessebene dargestellt. Das MD-Prozessmodul ändert sich je nach Anforderung, wie z.B. Batch- oder kontinuierlicher Betrieb, sowie realisierter interner Wärmerückgewinnung (WRG) und kann durch andere Wasseraufbereitungsprozesse ersetzt werden.

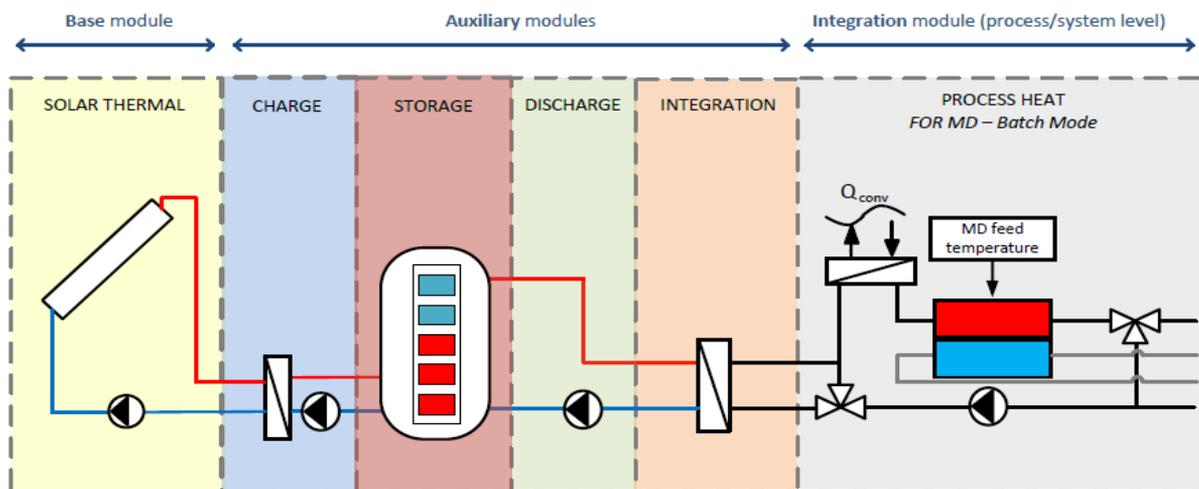


Abbildung 12: Übersicht über ein Integrationskonzept – Solarthermie zur Versorgung der Membrandestillation

### 5.3.4. Anwendungsbeispiele

Folgend werden einige Anwendungsbeispiele für Abwasserbehandlungsprozesse gegeben, die über erneuerbare Energiequellen versorgt werden.

#### Rückgewinnung von Passivierungsflüssigkeit in einem Galvanikbetrieb mittels Membrandestillation

Im nationalen Projekt Galvano-MD wurde die Einbindung der Membrandestillation in den Prozessschritt der Dickschichtpassivierung angedacht, wobei das kontinuierlich anfallende Spülwasser, das als Abwasser verworfen wird, der Membrandestillation zugeführt wird. Basierend auf Versuchsreihen im Pilotmaßstab wurde ein energetisches Integrationskonzept erarbeitet. Das Konzept sieht vor, den größten Teil der notwendigen Energiemenge im ersten Schritt durch Ausschöpfen von internen Wärmerückgewinnungspotentialen im Membrandestillationsmodul (Direct-Contact-Konfiguration) abzudecken. So kommt es im Membranmodul zu einer Übertragung der Wärme vom Feed auf das Permeat. In einem weiteren Schritt wurden Abwärmepotentiale für die Nutzung evaluiert und eine Kombination aus Abwärmennutzung aus Druckluftkompressoren und sensiblen Anteil der Kältemaschine angestrebt. Durch die Abwärmeintegration ist es möglich, das Feed auf bis zu 72 °C vorzuwärmen und dabei eine Reduktion des Energiebedarfs um 42 % zu erzielen.

Zur Bereitstellung der restlichen Wärmemenge (320 MWh/a; entspricht einer Leistung von 57 kW), wurde der Einsatz einer Solarthermieanlage evaluiert. Durch die Berechnung konnte gezeigt werden, dass die Bereitstellung der Energiemenge mittels einer Kollektorfläche von 250 m<sup>2</sup> zwar möglich ist,

allerdings müsste im Hintergrund immer eine zusätzliche Bereitstellung der noch bereitzustellenden Energiemenge vorhanden sein, da die Membrandestillation immer an den Bedarf des Produktionsprozesses (Passivierung) gekoppelt ist.

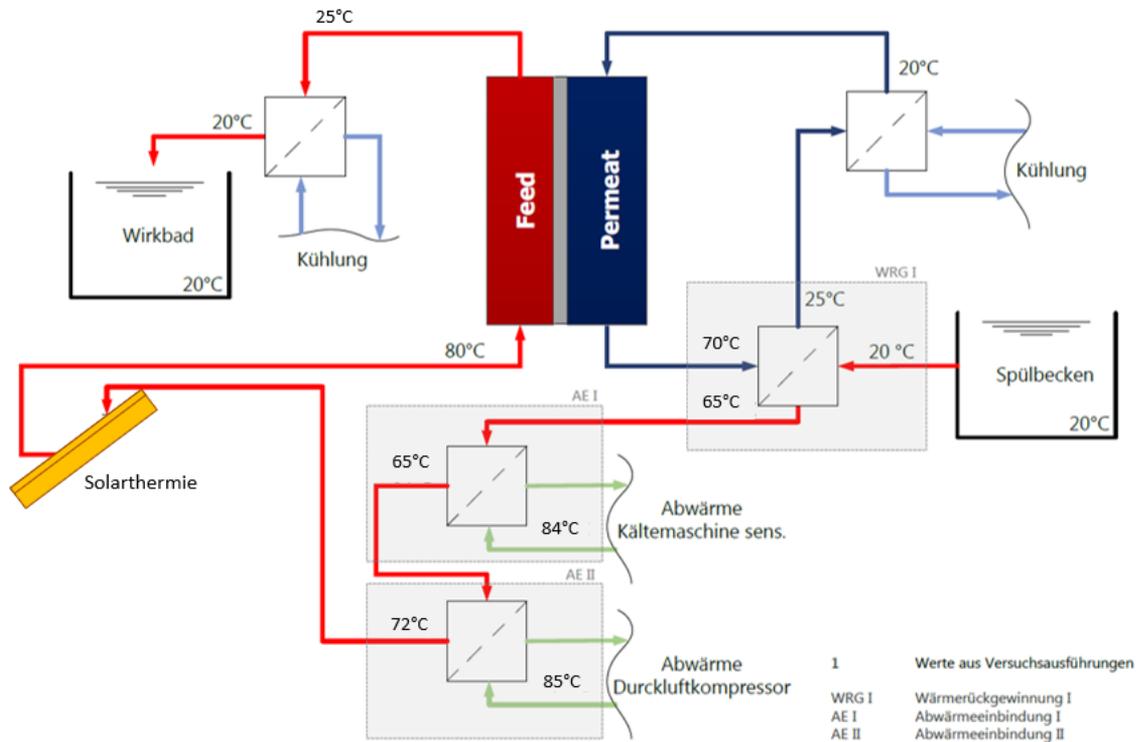


Abbildung 13: Integrationskonzept für die Versorgung der Membrandestillation mit Abwärme und Solarthermie (parallel)

### Meerwasserentsalzung mittels Vakuum-Multieffekt-Membrandestillation

Abbildung 14 zeigt die schematische Darstellung einer Pilotanlage zur Entsalzung von Meerwasser mittels Membrandestillation. Die thermische Energie wird über die Einbindung von Solarthermie bereitgestellt. Das Entsalzungssystem besteht aus drei Hauptkomponenten: dem Meerwassereinlass, dem Solarsystem (Solarkollektor inklusive Speicher) und dem MD-Modul. Das Solarsystem besteht auch 15 installierten Flachkollektoren mit einer Neigung von 45° und einer Aperaturfläche von 35,9 m<sup>2</sup>, einer Stagnationstemperatur von 219°C sowie einer thermischen Leistung von bis zu 17 kW<sub>th</sub> bei 90°C. Das V-MEMD-Modul ist kommerziell erhältlich und wurde von Aquaver BV gebaut. Das Modul wird unter Vakuum mit weniger als 10 mbar betrieben, besteht aus Polypropylen (PP) mit einer effektiven Membranfläche von 6,4 m<sup>2</sup>. (21)

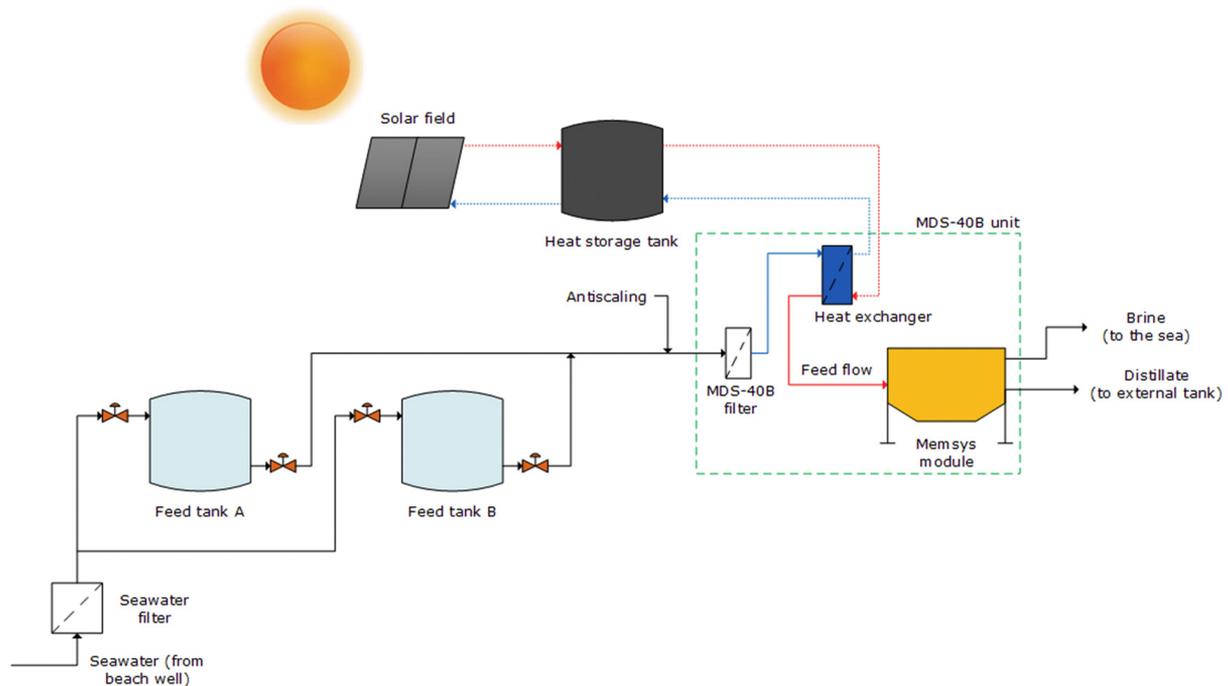


Abbildung 14: Pilotanlage für die Meerwasserentsalzung basierend auf einer Vakuum-MEMD versorgt über Solarthermie (21)

### Ammoniumrückgewinnung in der kommunalen Abwasseraufbereitung mittels Membrandestillation

Das Forschungsinstitut AEE INTEC evaluierte im Rahmen des Projekts "Thermafex" die Möglichkeit der Integration einer Membrandestillationsanlage (MD) zur Ammoniakrückgewinnung in eine Wasseraufbereitungsanlage. Abbildung 15 zeigt den Integrationspunkt des evaluierten Konzepts: Die MD wird integriert, um das Konzentrat aus der Zentrifuge der Schlammbehandlung (Zentratwasser) zu behandeln, bevor es in das Belebungsbecken zurückgeführt wird. Durch dieses Integrationskonzept ergeben sich zwei Vorteile für die Kläranlage: Das von der MD zurückgewonnene Ammonium reduziert die Stickstoffbelastung im Belebungsbecken und verringert somit den Bedarf an Belüftung und Energie, während Ammoniumsulfat als Düngemittel zurückgewonnen werden kann. Die thermische Energie für die MD soll grundsätzlich über Abwärme aus dem Faultrum betrieben werden. Allerdings wurde das Konzept zur Ammoniumrückgewinnung mittels Membrandestillation wurde in das energetische Gesamtkonzept der Kläranlage eingepflegt. Dies bedeutet, dass alternativ auch thermische Energie aus der eingesetzten Abwasserwärmepumpe zur Verfügung steht. Zudem kann durch die geplante PV-Anlage die elektrische Energie zum Betrieb der Pumpen der MD-Anlage genutzt werden.

Eine ausführliche Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in folgender Veröffentlichung: Guillen-Burrieza, E., Moritz, E., Hobisch, M., Muster-Slawitsch, B., Recovery of ammonia from centrate water in urban waste water treatment plants via Direct Contact Membrane Distillation: process performance in long-term pilot-scale operation, verfügbar bei SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4200247> oder <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4200247>.

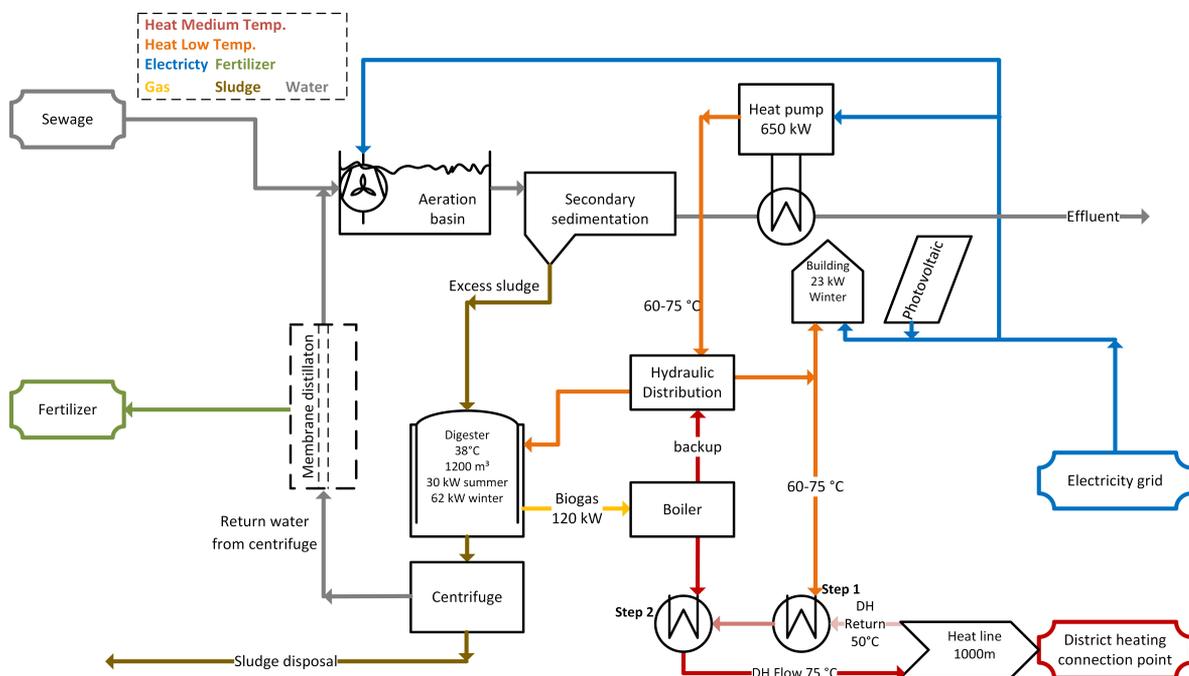


Abbildung 15: Integrationskonzept der Membrandestillation im holistischen Energiekonzept einer Kläranlage (Wärmepumpe mit PV, Fernwärmearbeitung)

## 5.4. Veröffentlichungen

Die wichtigsten Inhalte des IEA SHC Task 62 wurde in internationalen Deliverables publiziert, in denen auch VertreterInnen aus Österreich mitgewirkt haben. Eine Übersicht über die Deliverables sowie deren Status ist in Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellt. Die internationalen Deliverables des IEA SHC Task 62 stehen auf der Homepage zum Download bereit (<https://task62.iea-shc.org/>). Weitere Publikationen sind im Anhang angeführt.

Tabelle 7: Übersicht über die Deliverables des Subtask A inklusive aktueller Status

Nr.	Deliverables	Status
D.A1	Matrix of different industrial separation demands to be subjected to cutting edge thermal technologies versus availability of different low exergy heat sources	In approval
D.A2	Definition of future R&D demand	In approval
D.A3	Specification of System design and key performance indicators as basis for comparative simulation studies	Approved

<b>Nr.</b>	<b>Deliverables</b>	<b>Status</b>
D.A4	Summary of results from comparative simulation calculations	In approval
D.A5	Report on new solar thermal collectors' concepts/for industrial water treatment. Potential link with photocatalytic solar water treatment	In approval
D.A6	Summary of technical and economic studies to hand out and present to industry	In approval
D.A7	Summary report on lessons learned from demonstration projects and recommendations on best practices	In approval
D.A8	Conduction of, or participation in of 3 workshops initiated by the IEA activities	In approval
D.A9	Set up of a reliable and sustainable crosslinked network of industry and academia	In approval

Tabelle 8: Übersicht über die Deliverables des Subtask B inklusive aktueller Status

<b>Nr.</b>	<b>Deliverables</b>	<b>Status</b>
D.B1	Report on existing solar based technologies applied to industrial water decontamination and disinfection (real and research cases). Potential applications on industrial new sectors	Approved
D.B2	Report on new solar collectors' concepts/design for hydrogen production and industrial water decontamination and disinfection. Potential link with thermal technologies	In approval
D.B3	Roadmap for technology implementation for defined applications and industries	In approval
D.B4	Technological, economic and political barriers for up-scaling new decontamination and disinfection systems for industrial water and wastewater management and reuse	In approval
D.B5	Report on legal thresholds for accomplishing water quality required depending on the final application	In approval
D.B6	Marketplace/Fair (tbd if virtual)	In approval

Tabelle 9: Übersicht über die Deliverables des Subtask C inklusive aktueller Status

Nr.	Deliverables	Status
D.C1	Report on technologies to be considered for guidelines	Approved
D.C2	Report on how water-energy nexus concept is actually being applied in the industry	In approval
D.C3	Report on draft version of guidelines/decision making tool	In approval
D.C4	Report on final guidelines/decision making tool	In approval
D.C5	Summary of media releases and workshop presentations	In approval

# Vernetzung und Ergebnistransfer

Die Zielgruppe für die Ergebnisse in Österreich sind einerseits Technologieanbieter für (Ab-) Wasseraufbereitung und Solarfirmen, aber auch Planer sowie Industriebetriebe, die sich mit dem Einsatz von solarbetriebenen (Ab-)Wasseraufbereitungsanlagen in Produktionsbetrieben beschäftigen und Realisierungen vorantreiben. Letztlich werden natürlich Forschungsinstitute angesprochen, die durch die Ergebnisse des IEA SHC Task 62 neue Inputs für zukünftige Forschungszielsetzungen bekommen. Für strategische Entscheidungsträger sind die Ergebnisse des Task 62 maßgeblich wichtig, da sie die technologische Machbarkeit weiter beweisen, sowie das noch immer wenig genutzte Potential aufzeigen und auf wichtige zukünftige Fragestellungen zur Erschließung des Marktes aufmerksam machen.

Die Einbindung von Stakeholder erfolgte im Zuge von laufenden nationalen Projekten wie Galvano-MD (z.B. SolarSpring), MD-Gold (ReWaCem) (z.B. SolarSpring), Ammonia-to-Power (z.B. Kläranlagenbetreiber), Nutricoal, Thermaflex (z.B. theVap), Solarreaktor (z.B. GreenOneTec), IEA IETS Task 17. In all diesen Projekten wurde mit Betrieben an umsetzungsrelevanten Fragestellungen gearbeitet.

Der Mehrwert der IEA SHC Task 62 Teilnahme für die österreichischen Akteure lag einerseits im internationalen Austausch und den persönlichen Kontakten zu Key Akteuren im Bereich Solare Abwasseraufbereitung. Anfragen aus unterschiedlichen Nationen sowie die Teilnahme an den zum Teil online abgehaltenen Meetings bezüglich der IEA SHC Task 62 Ergebnisse zeigen das große internationale Interesse und den hohen Bekanntheitsgrad der österreichischen Akteure. Hier zeigte sich auch das große Interesse von Membrandestillations-Technologieanbietern an den Inhalten des IEA SHC Task 62. Ein Großteil der Europäischen Technologieanbieter war sowohl in den Meetings als auch im Austausch innerhalb der Expertengruppe involviert.

Es gilt hervorzuheben, dass durch die nationale und internationale Zusammenarbeit und Diskussionen, immer wieder Anstoß zu gemeinsamen Projekten geschieht. So konnte das Projekt SolPol-6, im Januar 2023 gestartet werden. Dort liegt ein Schwerpunkt auf der Membranentwicklung von Membranen. Zudem konnten das Projekt Solarreaktor, welches sich mit der H<sub>2</sub> Produktion aus Abwasser beschäftigt sowie das internationale Projekt DESIRED zur photokatalytischen und photoelektrochemischen Aufspaltung von CO<sub>2</sub> gestartet werden. Mit diesen Projekten kann durch die österreichische Teilnahme eine internationale Vorreiterrolle von österreichischen Akteuren eingenommen werden. Zudem konnte durch den IEA SHC Task 62 auch der Austausch zwischen Forschungsinstituten gestärkt werden. So konnte beispielsweise ein Austausch zwischen CIEMAT P.S.A. (Leitung Subtask B) und AEE INTEC initiiert werden.

# 6 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

**Folgende fachlichen Schlussfolgerungen können zusammenfassend gezogen werden:**

Grundsätzlich umfasste der IEA SHC Task 62 die Nutzung von Solarenergie in Form von thermischer Energie und Photonen für die (Ab-)Wasseraufbereitung. Die Bewertung der Anwendungsbereiche für thermisch angetriebene Wassertrenntechnologien hat gezeigt, dass die Bedürfnisse und Herausforderungen bei der Abwasserbehandlung sowie das Potenzial für solare und überschüssige Wärmeversorgung an verschiedenen Standorten und in verschiedenen Branchen sehr unterschiedlich sind. Potenzielle Anwendungsbereiche finden sich in Branchen wie der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, der Zellstoff- und Papierindustrie, der Abwasserbehandlung, der Galvanikindustrie, der pharmazeutischen Industrie, der Textilindustrie, dem Bergbau usw. Letztlich kann der Einsatz von thermischen Trennverfahren durch technische (Mengen, Konzentrationen, Energiebedarf usw.) oder wirtschaftliche Randbedingungen gerechtfertigt sein. Um die Bedingungen für thermische Trenntechnologien zu verbessern, und in diesem Fall speziell die Membrandestillation als Schwerpunkttechnologie, umfasst der F&E-Bedarf folgende technologische Verbesserungen:

- Membranen und Materialien: Membranoberflächentechnik, z.B. Modifikation in Richtung Langzeithydrophobie, Begrenzung von Fouling und Scaling; modellbasiertes Membrandesign, Mechanismen zur Verbesserung der Selektivität durch Entkopplung wertvoller Transportantriebe von anderen
- Modul-Design: Wärmerückgewinnung, thermischer Wirkungsgrad, Flussverbesserung, z. B. durch Vakuum, mechanische Festigkeit, z. B. unter Vakuum, Reinigung, Schutz vor Ablagerungen und Fouling, Wartung, Recycling am Ende der Lebensdauer, Kosten
- Systemintegration: Wärmeversorgung und Kühlung (z. B. Solarthermie gekoppelt mit Wärmepumpe), Systemsteuerung, integrierte Membranprozessdesigns, Komponenten-/Technologieinnovation, Langzeiterfahrungen

Um Technologien wie MD mit Energie zu versorgen, gibt es keine besonderen Anforderungen an die solarthermischen Kollektoren. Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren erreichen problemlos die gewünschten Temperaturen, um die Trenn- und Abscheideprozesse mit hervorragender Effizienz zu betreiben. Eine Integration der Aufbereitungstechnologien in den Kollektor im Sinne des Prozessintensivierungsansatzes (Solarreaktor-Entwicklung) würde jedoch eine Effizienzsteigerung in Bezug auf Energiebereitstellung und Abscheideleistung bedeuten. Erste Unternehmen (z.B. Solardew) verfolgen diesen Ansatz bereits kommerziell. Hier besteht jedoch noch ein großes Potenzial für Solarkollektorhersteller, ihre Produktpalette zu erweitern und maßgeschneiderte Lösungen anzubieten. Auch der Einsatz insbesondere in abgelegenen Gebieten wäre ein vielversprechendes zukünftiges Anwendungsfeld.

Bei der solaren Dekontamination und Desinfektion mittel Advanced Oxidation Prozessen sind Anstrengungen zur Steigerung der Prozesseffizienz notwendig. Sehr wichtig ist es, sich mit Forschungsfragen wie Strömungsdynamik, Reaktordesign usw. zu befassen, um sowohl die Reinigungsergebnisse als auch den Energieverbrauch zu optimieren. Das bekannteste Beispiel für die solare Wasserdekontamination und -desinfektion ist die Abwasserbehandlung durch Photokatalyse

oder photoelektrochemische Prozesse. Aber auch viele chemische Prozesse (z.B. CCU) könnten von der direkten Nutzung der Sonnenstrahlung profitieren. Zudem bietet auch die kombinierte Betrachtung der Abwasserbehandlung in Kombination mit der Erzeugung von neuen Energievektoren (z.B. H<sub>2</sub>) ein vielversprechendes Anwendungsgebiet. In den letzten Jahren wurden viele Anstrengungen unternommen, um Wasserstoff aus erneuerbaren Ressourcen zu erzeugen. Der Wert der Ressource Wasser wird deutlich durch das Faktum, dass Wasser einen geschlossenen Kreislauf auf der Erde darstellt, während Energie mit einem tausendfachen des Weltenergiebedarfs über Solarstrahlung auf die Erde trifft. Daher stellt der Ansatz zur Nutzung von (frei) verfügbaren Ressourcen wie Sonne und (Ab)-Wasser einen vielversprechenden dar. Insbesondere wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene photokatalytische Systeme zur Wasserstoffherzeugung bei gleichzeitiger Entfernung organischer Schadstoffe im Labormaßstab untersucht, aber bisher wurde wenig über diese Systeme in größerem Maßstab veröffentlicht. In diesem Zusammenhang wurden neue Solarreaktor-Konzepte mit hohem Potenzial für künftige Anwendungen ausgearbeitet.

Was beide Ansätze (Solarthermie und Photonennutzung) zum gegenwärtigen Zeitpunkt gemeinsam haben, ist das Fehlen von Referenzen im Demonstrationsmaßstab. Viele Arbeiten beruhen noch auf konzeptionellen Grundlagen, Simulationen oder werden im Labormaßstab durchgeführt. Zudem sind Forschungsfragestellungen in Bezug auf Steigerung der Systemeffizienz und der Erzielung höherer Effizienzen die in weiterer Folge auch zu neuen Designstrategien und Solarreaktor-Kollektorkonzepten führen, zu klären.

Die Methode und der Ansatz für die bestmögliche Integration von Solarenergie für die Abwasserbehandlung sind auf der Grundlage der Ergebnisse von IEA SHC Task 62 gut dokumentiert. Die Integrationskonzepte bieten eine gute Grundlage für die Auswahl der möglichen Integrationspunkte. Die Klassifizierung von Integrations-Schemata für Integrationspunkte auf Versorgungs- und Prozessebene ist ein wichtiger Schritt zur Klärung der verschiedenen Integrationskonzepte. Dies bietet eine erste Hilfestellung bei der Auswahl eines sinnvollen Systemkonzeptes für einen bestimmten Integrationspunkt. In Zukunft wird es einen steigenden Bedarf an integrierten Simulationswerkzeugen geben, die die Integration von Solarthermie oder anderen erneuerbaren Energien in Verbindung mit solarbetriebenen Abwasserreinigungstechnologien abbilden können, um die Wechselwirkung von Solarthermie und Wärmeströmen für die Abwasserreinigung zu bewerten.

Direkte aus dem IEA SHC Task 62 **initiierte Projekte** sind SolPol 6, DESIRED und Solarreaktor. Es besteht auch international großes Interesse an einem weiterführenden IEA-Kooperationsprojekt mit Fokus auf spezielle Lösungen für die Abwasseraufbereitung mittels Photonen, Ansätze zur Effizienzsteigerung mittels neuer Reaktorkonzepte, Materialforschung zur optimierten Nutzung von Solarenergie und Erweiterung der Anwendungen für CCU, Produktion von Energievektoren, etc.

## Literaturverzeichnis

1. Weiss W, Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide 2022. Global Market Development and Trends 2021 Detailed Market Figures 2020. Gleisdorf: AEE INTEC; 2022.
2. Ritchie, Hannah, Roser, Max. Water Use and Stress [Internet]. 2017. Verfügbar unter: <https://ourworldindata.org/water-use-stress>
3. DECHEMA e.V. Trends and Perspectives in Industrial Water Treatment. In Frankfurt am Main: Position Paper by the ProcessNet Subject Division Production-Integrated Water/Waste Water Technology; 2017.
4. Wasserrechtsgesetz 1959 – WRG. 1959. [Internet]. BGBl. Nr. 215/1959. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010290#header>
5. Abwasseremissionsverordnung – AAEV [Internet]. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010977>
6. Richter, E. Richtiger Umgang mit Abfällen - Abfälle einstufen, bewerten und verwerten. Augsburg: WEKA MEDIA GmbH & Co. KG; 2004.
7. Wagner, M., Menapace, H., Frate, R.. Stand der Technik bei der chemisch-physikalischen Behandlung von flüssigen Abfällen. 2010.
8. AEE INTEC. Evaporation and distillation [Internet]. [zitiert 12. Januar 2023]. Verfügbar unter: [http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Evaporation\\_and\\_distillation](http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Evaporation_and_distillation)
9. Niederdruckverdampfung von Industrieabwässern [Internet]. 2010 [zitiert 27. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://analyticalscience.wiley.com/do/10.1002/gitfach.2312/>
10. Fresner, J., Angerbauer, Ch., Dielacher, Th., Sage, J., Schnitzer, H., Gwehenberger, G., Planasch, M., Maier, J., Raber, G., Brunner, Ch., Taferner, K., Ribitsch, V., Pilgram, J., Mair, J., Altgajer, G., Lürer, A., Solka, F., Krichbaum, T., Hofer, M. ZERMEG II – Zero emission retrofitting method for existing galvanising plants, Bundesministerium für Verkehr. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie; 2006.
11. EnArgus Wiki. Rektifikation [Internet]. [zitiert 31. Oktober 2022]. Verfügbar unter: [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d9441-2/\\*/\\*/Rektifikation.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d9441-2/*/*/Rektifikation.html?op=Wiki.getwiki)
12. gunt Hamburg. Flüssig-Flüssig Extraktion. 2017.
13. Florian Kiefer. Multi-Effect Vacuum Membrane Distillation for High-Recovery Desalination [Internet]. [München, DE]: Technische Universität München; 2019. Verfügbar unter: [https://www.epc.ed.tum.de/fileadmin/w00cgc/td/Forschung/Dissertationen/Dissertation\\_Florian\\_Kiefer\\_2020.pdf](https://www.epc.ed.tum.de/fileadmin/w00cgc/td/Forschung/Dissertationen/Dissertation_Florian_Kiefer_2020.pdf)
14. Menon AK, Haechler I, Kaur S, Lubner S, Prasher RS. Enhanced solar evaporation using a photo-thermal umbrella for wastewater management. Nat Sustain. 6. Januar 2020;3(2):144–51.
15. Oturan MA, Aaron JJ. Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2. Dezember 2014;44(23):2577–641.

16. Demir ME, Chehade G, Dincer I, Yuzer B, Selcuk H. Synergistic effects of advanced oxidation reactions in a combination of TiO<sub>2</sub> photocatalysis for hydrogen production and wastewater treatment applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. September 2019;44(43):23856–67.
17. Sobsey, M. D & World Health Organization. *Managing water in the home : accelerated health gains from improved water supply / prepared by Mark D. Sobsey* [Internet]. World Health Organization; Verfügbar unter: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/67319>
18. Ubomba-Jaswa E, Fernández-Ibáñez P, Navntoft C, Polo-López MI, McGuigan KG. Investigating the microbial inactivation efficiency of a 25 L batch solar disinfection (SODIS) reactor enhanced with a compound parabolic collector (CPC) for household use. *J Chem Technol Biotechnol*. 26. April 2010;85(8):1028–37.
19. Ubomba-Jaswa E, Navntoft C, Inmaculada M, Fernandez-Ibáñez P, McGuigan KG. Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of the effect of UV-A dose on inactivation efficiency. *Photochem Photobiol Sci*. Mai 2009;8(5):587–95.
20. International Energy Agency. *Technology Roadmap Solar Heating and Cooling* [Internet]. 2012 [zitiert 2. September 2022] S. 50. Verfügbar unter: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/945d1ceb-796f-443b-a0bb-9285dba9061a/Solar\\_Heating\\_Cooling\\_Roadmap\\_2012\\_WEB.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/945d1ceb-796f-443b-a0bb-9285dba9061a/Solar_Heating_Cooling_Roadmap_2012_WEB.pdf)
21. Andrés-Mañas JA, Ruiz-Aguirre A, Ación FG, Zaragoza G. Assessment of a pilot system for seawater desalination based on vacuum multi-effect membrane distillation with enhanced heat recovery. *Desalination*. Oktober 2018;443:110–21.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Illustration der PP-Gitter- und PTFE-Membranstruktur eines beispielhaft untersuchten MD-Funktionselementes im Referenzzustand (links) und nach Einsatz (rechts) .....	21
Abbildung 2: Darstellung des Konzeptes des Solarreaktors – der Integrationsteil (z.B. Wärmetauscher) wird nicht benötigt; der Prozess wird direkt in den Kollektor integriert .....	23
Abbildung 3: Darstellung des solaren Teiches mit dem photo-thermischen Schirm (14).....	24
Abbildung 4: Darstellung der solaren Destillation – Flamingo (siehe Fußnote 11).....	25
Abbildung 5: Aufbau des Kollektors von SOLARDEW (siehe Fußnote 12).....	25
Abbildung 6: Übersicht über die Vielzahl an fortgeschrittenen Oxidationsverfahren (AOPs) (Grafik auf Basis von (15) erstellt) .....	30
Abbildung 7: Übersicht der Ergebnisse aus Tabelle 4 zu erfassten Technologien .....	32
Abbildung 8: Reaktor zur solare Desinfektion (SODIS) (18) .....	33
Abbildung 9: Aufbau des Solarreaktors(AEE INTEC).....	34
Abbildung 10: Flachkollektor (links) und Vakuumröhrenkollektor (rechts) (20) .....	40
Abbildung 11:Übersicht über den Aufbau des Decision-Making- Tools.....	41
Abbildung 12: Übersicht über ein Integrationskonzept – Solarthermie zur Versorgung der Membrandestillation.....	42
Abbildung 13: Integrationskonzept für die Versorgung der Membrandestillation mit Abwärme und Solarthermie (parallel) .....	43
Abbildung 14: Pilotanlage für die Meerwasserentsalzung basierend auf einer Vakuum-MEMD versorgt über Solarthermie (21) .....	44
Abbildung 15: Integrationskonzept der Membrandestillation im holistischen Energiekonzept einer Kläranlage (Wärmepumpe mit PV, Fernwärmeanbindung).....	45

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über beteiligte Länder sowie die jeweilige Anzahl an Forschungsinstituten, Universitäten und Unternehmen .....	11
Tabelle 2: Übersicht über Industriesektoren und potentielle Anwendungen für thermische Trenntechnologien .....	19
Tabelle 3: F&E Bedarf mit Fokus auf Membrandestillation .....	26
Tabelle 4: Übersicht über das Feedback zu erfassten Technologien, deren TRL und Unternehmen bzw. Instituten aus verschiedenen Ländern die sich mit den Technologien beschäftigen .....	32
Tabelle 5: Ergebnisse aus dem Brainstorming im Rahmen des IEA SHC Task 62. ....	35
Tabelle 6: Ergebnisse aus dem Brainstorming im Rahmen des IEA SHC Task 62. ....	37
Tabelle 7: Übersicht über die Deliverables des Subtask A inklusive aktueller Status .....	45
Tabelle 8: Übersicht über die Deliverables des Subtask B inklusive aktueller Status .....	46
Tabelle 9: Übersicht über die Deliverables des Subtask C inklusive aktueller Status .....	47

## Abkürzungsverzeichnis

AOP	Advanced Oxidation Processes
MD	Membran Destillation
DCMD	Direct-Contact-Membran Destillation
VMD	Vakuum- Membran Destillation
IEA	Internationale Energieagentur
SHC	Solar Heating and Cooling
MEMD	Multi Effect Membran Destillation
MED	Multi Effect Destillation
MSF	Multi Stage Flash
TRL	Technology Readiness Level
PAM	Polyacrylamid

# 7 Anhang

In den folgenden Tabellen sind alle Publikationen, die zusätzlich zur Erstellung der IEA SHC Task 62 Berichte (Deliverables) aus den Aktivitäten des IEA SHC Task 62 entstanden sind, dargestellt.

## Berichte, Bücher

Author(s)/ Editor	Title
Subtask C team	Technology list - Part B of Solar water treatment user needs technology template (UNTP) form
Book editors: T.-S. Chung and K.-J. Lu / Chapter authors: M. C. Duke and N. Dow	Book title: Membrane distillation: membranes, hybrid systems and pilot studies, Chapter title: Membrane Distillation for Industrial Water Treatment: Experiences from Pilot Trials. Membrane distillation: membranes, hybrid systems and pilot studies
Book editors: Y. M. Lee and E. Drioli. Chapter authors: M. Duke and X. Yang	Book title: Membrane Distillation: Materials and Processes. Chapter title: Economic Analysis of Membrane Distillation
Malato S., Oller I., Polo I., Fernández-Ibañez P.	Solar Detoxification and Disinfection of Water. In: Meyers R.A. (eds) Encyclopedia of Sustainability Science and Technology.

## Veröffentlichungen, Zeitschriftenartikel, Konferenzbeiträge, Pressemitteilungen usw.

Author(s)/Editor	Title
C. Brunner, A. Grubbauer	Solar Energy im industriellen Wasser- und Abwassermanagement
C. Brunner, A. Grubbauer, A. van der Kleij	Solar Heat for Industrial Water and Wastewater Management
Mikel Duke	Using solar in managing water for Industry. IEA SHC Task 62: Solar Energy in Industrial Water Management
Amaya-Vías, D., J. A. López-Ramírez, S. Gray, J. Zhang and M. Duke	Diffusion behavior of humic acid during desalination with air gap and water gap membrane distillation.
R. Schwantes, J. Seger, L. Bauer, D. Winter, T. Hogen, J. Koschikowski and S. -U. Geißen	Characterization and Assessment of a Novel Plate and Frame MD Module for Single Pass Wastewater Concentration–FEED Gap Air Gap Membrane Distillation

A.Ruiz-Delgado, P. Plaza-Bolaños, I. Oller, S. Malato , A. Agüera.	Advanced evaluation of landfill leachate treatments by low and high-resolution mass spectrometry focusing on microcontaminant removal
S.Nahim-Granados, G. Rivas-Ibáñez, J.A. Sánchez Pérez, I. Oller, S. Malato, M.I. Polo-López.	Synthetic fresh-cut wastewater disinfection and decontamination by ozonation at pilot scale
A Cabrera Reina, S. Miralles-Cuevas, L. Cornejo, L. Pomares, J. Polo, I. Oller, S. Malato	The influence of location on solar photo-Fenton: Process performance, photoreactor scaling-up and treatment cost
A.Ruiz-Aguirre, J. A. Andrés-Mañas, G. Zaragoza	Evaluation of permeate quality in pilot scale membrane distillation systems
J.A.Andrés-Mañas, A. Ruiz-Aguirre, G. Acién, G. Zaragoza	Performance increase of membrane distillation pilot scale modules operating in vacuum-enhanced air-gap configuration
J.A.Andrés-Mañas, L. Roca, A. Ruiz-Aguirre, G. Acién, J. D. Gil, G. Zaragoza	Application of solar energy to seawater desalination in a pilot system based on vacuum multi-effect membrane distillation
C. Brunner, S. Meitz, B. Muster-Slawitsch, J. Buchmaier	Nexus Energy, Water & (Bio) Industry
D.M. Scheepers, A.J. Tahir, C. Brunner, E. Guillen-Burrieza.	Vacuum membrane distillation multi-component numerical model for ammonia recovery from liquid streams
Submitted by Baerbel Epp	Online workshop about solar-powered industrial water management + Information on Deliverable B.1.
J. Koschikowski	Using solar energy to recover acids and metals from wastewater
Samira Nahim-Granados, Ana Belén Martínez-Piernas, Gracia Rivas-Ibáñez, Patricia Plaza-Bolaños, Isabel Oller, Sixto Malato, José Antonio Sánchez Pérez, Ana Agüera, María Inmaculada Polo-López	Solar processes and ozonation for fresh-cut wastewater reclamation and reuse: Assessment of chemical, microbiological and chlorosis risks of raw-eaten crops
Azahara Martínez-García, Isabel Oller, Martin Vincent, Viviana Rubiolo, Jacent K. Asimwe, Charles Muyanja, Kevin G. McGuigan, Pilar Fernández-Ibáñez, María Inmaculada Polo-López	Meeting daily drinking water needs for communities in Sub-Saharan Africa using solar reactors for harvested rainwater
M. Duke	Guidelines for wastewater treatment technologies in preparation
S.Meitz, C. Brunner, B. Muster-Slawitsch	Solar energy in industrial water and waste water management

Elena Guillen Burrieza, Eva Moritz, Maria Hobisch, Bettina Muster-Slawitsch	Recovery of ammonia from centrate water in urban waste water treatment plants via direct contact membrane distillation: Process performance in long-term pilot-scale operation
AEE INTEC, Christoph Brunner	Gold recovery in PCB industry (Project ReWaCem, MD-Gold)
AEE INTEC	Austrian State Award for Ammonia recovery and usage in fuel cell (Project Ammonia-to-Power)

### Präsentationen auf Konferenzen/Workshops/Seminaren

Conference / Workshop / Seminar Name	Activity & Presenter (keynote, presentation, poster, etc.)	Date & Location
INTERSOLAR conference	Presentation: Solar based Technologies for Disinfection and Decontamination of Water for Reusing Purposes	15th May (Munich, Germany)
Workshop in the framework of the H2020 funded project ReWaCem	Presentation of results from installation of demonstrators (technologies: MD and DD)	24th May (Palermo, Italy)
Desalinización y Tratamiento de Agua Solar	Solar thermal water desalination with membrane technologies. Joachim Koschikowski, Fraunhofer ISE,	Santiago 7 and 8th of May 2019
Konzentrate – eine Herausforderung der Zukunft? / Work shop in the frame of the BMBF Project HighCon	Experimental investigation of membrane distillation with nearly saturated salt solutions Vinay Hegde, Fraunhofer ISE	Freiburg 8 and 9th of May 2019
EAAOP6: 6th European Conference on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes	Keynote: Industrial wastewater treatment by combining AOPs, biological and membrane technologies: Ammonium recovery	29th June 2019 (Portoroz, Slovenia)
A two-day Intensive Course on Solar Driven Desalination and Water Purification	Class: Solar Technologies applied to wastewater purification	26th March 2019 (Algeria)
Course: Curso Internacional de Transferencia del Conocimiento Tecnológico sobre la Energía Solar y Tratamiento Solar de Aguas de la Macro Región Centro Sur Andina	Class: Tecnologías Solares aplicadas al tratamiento, desinfección y reutilización de aguas.	17th July 2019 (Arica, Chile)

Journées techniques solaire thermique – ADEME	Le potentiel du ST en industrie, et son intégration dans le process industriel	25 – 16 September (France)
Solar World Congress	Key Note; Christoph Brunner	4. – 7.11.2019
Conference Nexus Energy, Water & (Bio)Industry	Organized by AEE INTEC (Operating Agent)	30. January 2020 (Vienna, Austria)
Conference Nexus Energy, Water & (Bio)Industry: Renewable energy driven technologies for water treatment - ex.: Solar Disinfection	Presentation Subtask B Isabel Oller	30. January 2020 (Vienna, Austria)
Conference Nexus Energy, Water & (Bio)Industry: Resource and energy efficiency in municipal waste water treatment plants	Presentation Wolfgang Gruber-Glatzl (AEE INTEC)	30. January 2020 (Vienna, Austria)
Conference Nexus Energy, Water & (Bio)Industry: Applicability of Solar Energy & Water in a new collector for applications in the bio-industry	Presentation Alexander van der Kleij (SolarDew)	30. January 2020 (Vienna, Austria)
The 2nd International Conference on Energy-Efficient Separation	Invited speaker Mikel Duke: Experiences from pilot plant trials of membrane distillation in industrial water treatment	27-30 November 2019, Melbourne Australia
2019 Asia-Pacific Solar Research Conference	Speaker Dr Cagil Ozansoy: Using Solar in Managing Water for Industry. IEA SHC Task 62: Solar Energy in Industrial Water Management	3-5 December 2019, Canberra, Australia
Solar World Congress 2019	Invited Theme Chair for Clean Water Technologies	4-7 November 2019, Santiago, Chile
IWA-MTC	Oral presentation of application of diffusion dialysis in separation of sulfuric acid and copper from electroplating wastewater.	23-27 June (Toulouse, France)
Conference: Holistic approaches for water and resource efficiency in process industry	Presentation: Resource recovery from industrial waste water by cutting edge membrane technologies – Outcomes of the ReWaCEM project	25th – 26th of March 2020

Conference: Holistic approaches for water and resource efficiency in process industry	Energy Footprint of Water Treatment	25th – 26th of March 2020
IEA SHC Solar Academy: Webinar on Task 62: Solar Energy in Industrial Water & Wastewater Management.	Presenters: Christoph Brunner and Isabel Oller	23.03.2021 % 25.03.2021
ICheaP 15, The 15th International Conference on Chemical and Process Engineering	Poster	23-26 May, 2021, Naples
PHOTOPUR (FEDER EC funded project) Online Symposium	Water-Energy-Food nexus in industrial and urban wastewater recovery (Keynote)	9-10 December, 2020
ODAKTR Seminar Series (SOLARTWINS H2020 project)	Water-Energy-Food nexus in industrial and urban wastewater recovery (Keynote)	26 February, 2021
SECAT 2021	Poster presentation	Valencia, 18-20 October 2021 (Spain)
ISEC 2022	Presentation on “More than just water -Waste water and sewage as a valuable source”	Graz; 5-7 April 2022 (Austria)
ISEC 2022	Presentation by Mikel Duke: Industrial Water Treatment Technologies Driven by Renewable or Waste Energy Sources	Graz; 5-7 April 2022 (Austria)
ISEC 2022	Poster by Sarah Meitz: NEXUS ENERGY & WATER: SOLAR ENERGY IN INDUSTRIAL WATER AND WASTEWATER MANAGEMENT WITHIN THE IEA SHC TASK 62	Graz; 5-7 April 2022 (Austria)
Solarthermie Symposium	Presentation by Sarah Meitz: NEXUS Energie & Wasser: Solarenergie im industriellen Wasser- und Abwassermanagement im Rahmen des IEA SHC Task 62	Bad Staffelstein, 3-5. May 2022, (Germany)
EUROSUN	Presentation by Sarah Meitz: Nexus Energy and Water: Integration Concepts for Solar	Kassel, 25-29 September 2022, (Germany)

Energy in Industrial Water and Waste  
Water  
Management

EUROSUN

Presentation by Mikel Duke: Solar  
Thermal and Photon Technology  
Selection  
Guidelines and Application Examples  
for Industrial Water  
Treatment: Updates from IEA Task 62  
Subtask C

Kassel, 25-29 September  
2022, (Germany)

EUROSUN

Presentation by Alba Ruiz Aguirre:  
Pilot-Scale Photocatalytic Hydrogen  
Production,  
Decontamination and Disinfection  
Using TiO<sub>2</sub> Mixed With  
Metal-Cocatalysts Under Natural  
Radiation

Kassel, 25-29 September  
2022, (Germany)

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a diagonal left edge that slopes downwards from the top-left towards the bottom-right.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)