

SERPIC Teilprojekt 1

Verwendungsnachweis

Sachbericht Teil I Kurzbericht

Vorhabenbezeichnung:	AquaPol - Kooperationsprojekt SERPIC: Nachhaltige Reduzierung von Spurenstoffen und Krankheitserregern im Kläranlagenablauf mittels elektrochemischer Prozesse zur Bewässerung von Feldfrüchten, Teilprojekt 1
Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer-Gesellschaft e.V.: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Projektpartner:	SolarSpring GmbH, Germany (Teilnahme bis 1.6.2024) (SSP) Università degli Studi di Ferrara, Italien (UNIFE) Universidad de Castilla-La Mancha, Spanien (UCLM) Universidade do Porto, Portugal (UP) AdP VALOR, Serviços Ambientais, SA, Portugal (AdP) Norwegian Institute for Water Research, Norwegen (NIVA) Stellenbosch University, Südafrika (SU)
Förderkennzeichen:	02WAP1617A
Laufzeit des Vorhabens:	1.9.2021 bis 31.12.2024
Berichtszeitraum:	1.1.2024 – 31.12.2024
Autoren:	Dr.-Ing. Jan Gäbler (IST), Dr.-Ing. Joachim Koschikowski (ISE)
Erstellungsdatum:	6.2.2025
Vertraulichkeit:	Öffentlich

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die zunehmende Wasserknappheit ist eine der größten Herausforderungen weltweit. Die Bereitstellung von sicherem Wasser in ausreichenden Mengen ist entscheidend für die menschliche Gesundheit (Trinkwasser und sanitäre Einrichtungen) und – durch die Bewässerung von Pflanzen – für eine ausreichende Ernährung. **Die Wiederverwendung der Abwässer von Kläranlagen stellt eine bedeutende und ständig verfügbare Wasserressource dar, die sicher zur Bewässerung genutzt werden kann.**

Allerdings sehen sich Kläranlagen einer zunehmenden Menge an neuen Schadstoffen (z.B. verschreibungspflichtige und rezeptfreie Medikamente, Körperpflegeprodukte sowie Chemikalien aus Landwirtschaft und Industrie), Krankheitserregern, antibiotikaresistenten Bakterien (ARB) und Antibiotikaresistenzgenen (ARGs) gegenüber, die im Folgenden als **contaminants of emerging concern (CECs)** bezeichnet werden. Entsprechende regulatorische Grenzwerte für die kritischsten CECs im Kläranlagenablauf wurden im November 2024 von der Europäischen Kommission festgelegt¹. Vorhandene Technologien weisen Nachteile in Bezug auf fehlenden Multibarrierenansatz, hohe Energieverbräuche oder schlechte Abbauleistung auf. **Dies war die Motivation für das SERPIC-Projekt, eine neue Technologie zur Reduzierung von CECs aus konventionellem Kläranlagenabwasser zu entwickeln.**

Das Ziel von SERPIC war es, CECs aus Kläranlagenabwässern durch die Entwicklung einer innovativen Behandlungstechnologie, basierend auf Membranfiltration und photonisch aktivierten elektrochemischen Prozessen, zu reduzieren.

¹ Europ. Kommission (27.11.2024): Richtlinie (EU) 2024/3019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung). In: *Amtsblatt der Europ. Union* (12.12.2024). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj>, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

2 Ablauf des Vorhabens

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse des BMBF-Teilprojektes, das Teil des europäischen Projektes *Sustainable Electrochemical Reduction of contaminants of emerging concern and Pathogens in WWTP effluent for Irrigation of Crops – SERPIC* war. Dieses wurde von insgesamt sechs Fördergebern aus Europa und Südafrika gefördert im Rahmen des ERA-Net Cofund AquaticPollutants. Das ERA-Net wurde durch die drei European Joint Programming Initiatives (JPIs) Water, Oceans und Antimicrobial Resistance aufgesetzt. SERPIC war eines von insgesamt 18 Projekten, die zum 2020 Joint Transnational Call ausgewählt und gefördert wurden.

Mit einem Multibarrieren-Ansatz durchliefen die sekundär behandelten Abwässer aus der kommunalen Kläranlage eine Reihe von Behandlungen, die mit einer Nanofiltration begannen. Diese trennte den Kläranlagenablauf in einen hochwertigen Permeatstrom (sogenannte Route A) und einen stärker verschmutzten Konzentratstrom (sogenannte Route B). Beide Ströme wurden weiter behandelt, wobei die erste Route A für die sichere Bewässerung von Pflanzen und die zweite Route B für die sichere Einleitung in die Umwelt verwendet wurde.

Um sicherzustellen, dass das Bewässerungswasser mikrobiell sicher ist, wurde der Strom der Route A einer Desinfektion durch Ozonierung unterzogen. Das Ozon wurde in einem Elektrolyseur mit einer Protonenaustauschmembran (PEM) und Diamant-Elektroden erzeugt.

Der Konzentratstrom der Route B durchlief einen Oxidationsprozess, der durch Zugabe und Licht-Aktivierung von Persulfaten in einem Photoreaktor erreicht wurde. Diese Oxidationsmittel wurden ebenfalls in einer speziell entwickelten elektrochemischen Zelle hergestellt. Der Photoreaktor wurde speziell entworfen, um die Persulfate mit UV-Licht zu aktivieren.

3 Wesentliche Ergebnisse

Zunächst wurde mithilfe einer eigens entwickelten Auswahlmethodik eine Auswahl von sechs repräsentativen CEC-Zielanalyten ausgewählt. Gleichzeitig wurden die separaten Prozesseinheiten und Komponenten entworfen, aufgebaut und optimiert. Danach wurden alle getesteten Prozesseinheiten und Komponenten nach Ciudad Real, Spanien, an UCLM versendet, um zur SERPIC-Prototypanlage zusammengebaut zu werden.

Anschließend wurde die Prototypanlage in Feldtests für die Bewässerung evaluiert. Karotten und Kartoffeln wurden in Testbeeten gepflanzt und mit dem behandelten Wasser bewässert. Um die Leistung der Behandlungstechnologie zu bewerten, wurde das Produktwasser aus der Prototypanlage auf die CEC-Entfernungsraten hin analysiert.

Die Nanofiltration hat sehr gute Ergebnisse zur Abtrennung der Schadstoffe aus dem Kläranlagenablauf gezeigt: Alle sechs ausgewählten Schadstoffe konnten unter den gesetzten Konzentrationswerten reduziert werden. Damit besteht die Möglichkeit, kontinuierlich ein sehr sauberes Permeat zu erzeugen, das nicht nur für die Bewässerung verwendet werden kann, sondern auch in anderen Anwendungen, bei denen hochwertiges Wasser benötigt wird.

Die Desinfektion durch elektrochemisch hergestelltes Ozongas mithilfe von Diamantelektroden hat sich als energie- und kostensparende Alternative zur üblichen Gasozonierung bewiesen, bei der das Ozon aus flüssigem Sauerstoff oder Luft hergestellt wird.

Der SERPIC-Ansatz zum Abbau von kritischen Schadstoffen durch UV-aktivierte Oxidation mit Persulfat war ebenfalls sehr erfolgreich: Bei fünf der sechs ausgewählten Zielschadstoffe wurden die Abbauziele erreicht. Im Vergleich zur UV-C-Bestrahlung wurden eine wesentlich höhere Abbauleistung und eine kürzere Abbauphase beobachtet. Bei der Produktion des Persulfats mit Diamantelektroden wurden die bislang erreichten Konzentrationen und Stromeffizienzen deutlich übertroffen. Insgesamt wurden die als Ziel gesetzten CEC-Entfernungsraten zu 92 % erreicht.

Für Detailergebnisse siehe Sachbericht Teil II sowie die Projektwebseite www.serp-pic-project.eu.

SERPIC Teilprojekt 1

Verwendungsnachweis

Sachbericht Teil II Eingehende Darstellung

Vorhabenbezeichnung:	AquaPol - Kooperationsprojekt SERPIC: Nachhaltige Reduzierung von Spurenstoffen und Krankheitserregern im Kläranlagenablauf mittels elektrochemischer Prozesse zur Bewässerung von Feldfrüchten, Teilprojekt 1
Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer-Gesellschaft e.V.: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Projektpartner:	SolarSpring GmbH, Germany (Teilnahme bis 1.6.2024) (SSP) Università degli Studi di Ferrara, Italien (UNIFE) Universidad de Castilla-La Mancha, Spanien (UCLM) Universidade do Porto, Portugal (UP) AdP VALOR, Serviços Ambientais, SA, Portugal (AdP) Norwegian Institute for Water Research, Norwegen (NIVA) Stellenbosch University, Südafrika (SU)
Förderkennzeichen:	02WAP1617A
Laufzeit des Vorhabens:	1.9.2021 bis 31.12.2024
Berichtszeitraum:	1.1.2024 – 31.12.2024
Autoren:	Dr.-Ing. Jan Gäbler (IST), Dr.-Ing. Joachim Koschikowski (ISE)
Erstellungsdatum:	6.2.2025
Vertraulichkeit:	Öffentlich

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse des BMBF-Teilprojektes, das Teil des europäischen Projektes *Sustainable Electrochemical Reduction of contaminants of emerging concern and Pathogens in WWTP effluent for Irrigation of Crops – SERPIC* war. Dieses wurde von insgesamt sechs Fördergebern aus Europa und Südafrika gefördert im Rahmen des ERA-Net Cofund AquaticPollutants. Das ERA-Net wurde durch die drei European Joint Programming Initiatives (JPIs) Water, Oceans und Antimicrobial Resistance aufgesetzt. SERPIC war eines von insgesamt 18 Projekten, die zum 2020 Joint Transnational Call ausgewählt und gefördert wurden.

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Einführung

Die zunehmende Wasserknappheit ist eine der größten Herausforderungen weltweit. Die Hauptursachen dafür sind der Klimawandel, die Urbanisierung und die Wüstenbildung. Die Bereitstellung von sicherem Wasser in ausreichenden Mengen ist entscheidend für die menschliche Gesundheit (Trinkwasser und sanitäre Einrichtungen) und – durch die Bewässerung von Pflanzen – für eine ausreichende Ernährung. Wasser wird nach der Nutzung durch den Menschen in die Umwelt gegeben. Dabei können die hinzugefügten anthropogenen Schadstoffe die aquatische Umwelt beeinträchtigen.

SERPIC verbindet den kommunalen Wasserkreislauf mit dem Wasserkreislauf in der Landwirtschaft und dem natürlichen Wasserkreislauf. Länder, die unter Knappheit oder Ungleichgewichten in der Wasserversorgung leiden, wie die Mittelmeerregion und Afrika, sind auf die Nutzung alternativer Wasserquellen angewiesen, zusätzlich zu natürlichen Oberflächen- und Grundwasserquellen. **Die Wiederverwendung der Abwässer von Kläranlagen stellt eine bedeutende und ständig verfügbare Wasserressource dar, die sicher zur Bewässerung genutzt werden kann.**

Allerdings sehen sich kommunale und industrielle Kläranlagen einer zunehmenden Menge an neuen Schadstoffen (z.B. verschreibungspflichtige und rezeptfreie Medikamente, Körperpflegeprodukte sowie Chemikalien aus Landwirtschaft und Industrie), Krankheitserregern, antibiotikaresistenten Bakterien (ARB) und Antibiotikaresistenzgenen (ARGs) gegenüber, die im Folgenden als **contaminants of emerging concern (CECs)** bezeichnet werden. CECs stellen eine besonders vielfältige Bedrohung für die menschliche Gesundheit dar, mit dem Risiko vieler Krankheiten, einschließlich Krebs. Ein besonderes Risiko ist die antimikrobielle Resistenz (AMR), da sie die Gefahr birgt, dass Antibiotika bei bakteriellen Infektionen nicht mehr wirken. Entsprechende regulatorische Grenzwerte für die kritischsten CECs im Kläranlagenablauf wurden im November 2024 von der Europäischen Kommission festgelegt¹.

Mit geeigneten Behandlungsprozessen wäre eine hohe Reduktion von CECs erreichbar, und behandeltes Abwasser würde eine stets verfügbare, sichere Wasserquelle für die landwirtschaftliche Bewässerung darstellen. **Dies war die Motivation für das SERPIC-Projekt, Technologien zur Reduzierung von CECs aus konventionellem Kläranlagenabwasser zu entwickeln.**

Die **übergeordnete Motivation** des SERPIC-Projekts war es, die Verbreitung von CECs und ARB/ARG zu untersuchen und zu minimieren, mit einem Fokus auf zusätzliche Wasserquellen für die Nahrungsmittelproduktion.

Das Konsortium verfolgte drei Ziele:

Ziel 1 war es, die Verbreitung und Transformation von CECs einschließlich ARB und ARG im Wasserkreislauf von Haushalten und Industrien zu den Kläranlagenabwässern und danach über die Bewässerung in die Nahrungsmittelversorgung, in Böden und Grundwasser sowie in Flusseinzugsgebiete, Mündungen, Küstengebiete und Ozeane zu minimieren;

Ziel 2 war es, CECs aus Kläranlagenabwässern durch die Entwicklung einer innovativen Behandlungstechnologie, basierend auf Membranfiltration und photonisch aktivierten elektrochemischen Prozessen, zu reduzieren. Für die beiden Anwendungswege werden unterschiedliche Reduktionsziele verfolgt, definiert als Prozentsatz im Verhältnis zum Kläranlagenablauf, das das SERPIC-System speiste:

- Route A: für Bewässerungszwecke strebten wir eine Reduktion der Ziel-CECs um mindestens 90 % an, gemäß den Zielen der EU-Verordnung über Mindestanforderungen für die Wiederverwendung von Wasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung²;

- Route B: für die Einleitung in die aquatische Umwelt strebten wir eine Reduktion von mehr als 80 % an. Wir haben folgende Reduktionsziele verfolgt:

- ARB, ARGs, Schmerzmittel: > 99 %
- Arzneimittel: > 90 %
- Antiretrovirale (ARVs): > 80 %
- Antikonvulsiva: > 80 %
- Konservierungsstoffe in Körperpflegeprodukten: > 99 %
- Illegale Drogen: > 90 %
- Industrielle Mikroschadstoffe: > 80 %

Ziel 3 war es, Methoden und Werkzeuge für Monitoring, Gesundheits- und Umwelt-Risikoabschätzungen sowie für die Umsetzung neuer Wiederverwendungskonzepte einschließlich neuer Behandlungstechnologien zu entwickeln, als Grundlage für bessere politische Entscheidungen, regulatorische Fragen und neue Standards.

¹ Europ. Kommission (27.11.2024): Richtlinie (EU) 2024/3019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung). In: *Amtsblatt der Europ. Union* (12.12.2024). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj>, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

² Europ. Kommission (25.05.2025): Verordnung (EU) 2020/741 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung. In: *Amtsblatt der Europ. Union* (L 177), S. 32–55. Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

1.2 Methodik

Mit dem Multibarrieren-Ansatz von SERPIC durchliefen die sekundär behandelten Abwässer aus der kommunalen Kläranlage eine Reihe von Behandlungen, die mit einer Nanofiltration begannen. Diese trennte den Kläranlagenablauf in einen hochwertigen Permeatstrom (sogenannte Route A) und einen stärker verschmutzten Konzentratstrom (sogenannte Route B). Beide Ströme wurden weiter behandelt, wobei die erste Route A für die sichere Bewässerung von Pflanzen und die zweite Route B für die sichere Einleitung in die Umwelt verwendet wurde (siehe Abbildung 1).

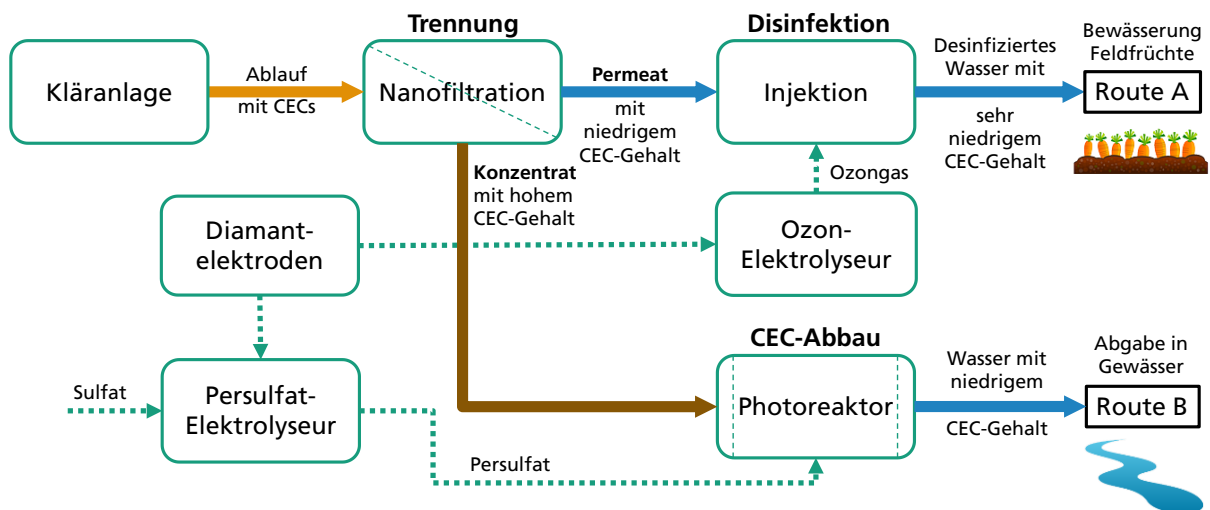


Abbildung 1. Prozesskette der SERPIC-Wasserbehandlung.

Um sicherzustellen, dass das Bewässerungswasser mikrobiell sicher ist, wurde der Strom der Route A einer Desinfektion durch Ozonierung unterzogen; anfänglich wurde Chlordioxid vorgeschlagen, aber dieser Ansatz wurde verworfen, da er mit einem deutlich höheren Energiebedarf und der potenziellen Bildung von Chloraten als Rückständen weniger nachhaltig gewesen wäre. Das Ozon wurde in einem Elektrolyseur mit einer Protonenaustauschmembran (PEM) und Diamant-Elektroden erzeugt. Dies gewährleistete eine vollständige Desinfektion und Entfernung von CECs, die durch eine schlechte Leistung der Nanofiltration entstehen könnten.

Der Konzentratstrom der Route B durchlief einen Oxidationsprozess, der durch Zugabe und Licht-Aktivierung von Persulfaten in einem Photoreaktor erreicht wurde. Diese Oxidationsmittel wurden ebenfalls in einer speziell entwickelten elektrochemischen Zelle hergestellt, die durch 3D-Druck gefertigt wurde. Der Photoreaktor wurde speziell entworfen, um die Persulfate mit UV-Licht zu aktivieren.

Da sehr viele CECs im Ablauf kommunaler Kläranlagen vorhanden sein können, konnten wir während des Projekts nicht alle vorkommenden analysieren. Daher haben wir eine Auswahl von sechs repräsentativen CEC-Zielanalyten (einschließlich ARGs & ARB und mikrobiellen Krankheitserregern) ausgewählt, die wir während des Projekts überwacht haben (T1.1). Um die relevantesten CECs zu identifizieren, wurde eine eigene Auswahlmethodik entwickelt (siehe 3.1).

Im ersten Zeitraum des Projekts wurden die separaten Prozesseinheiten und Komponenten entworfen, aufgebaut und optimiert (T2.1 – T2.7): die Nanofiltration bei NIVA, die Diamant-Elektroden am Fraunhofer IST, die zwei Elektrolyseure bei UCLM, der Photoreaktor bei UP und die Steuerung bei SSP. Danach wurden alle getesteten Prozesseinheiten und Komponenten nach Ciudad Real, Spanien, an UCLM versendet, um zur SERPIC-Prototypanlage zusammengebaut zu werden. Die Anlage wurde mit Hilfe der Partner eingerichtet und in Betrieb genommen (T2.8).

Anschließend wurde die Prototypenanlage in Feldtests für die Bewässerung evaluiert (T2.9). Pflanzen wurden in Testbeeten gepflanzt und mit dem behandelten Wasser bewässert. Schließlich wurden die Prozesseinheiten und die Prototypenanlage gemäß den Erfahrungen aus dem Feldtest weiterentwickelt und optimiert (T2.10).

Um die Leistung der Behandlungstechnologie zu bewerten, wurden umfassende Analysen durchgeführt. Nach der Entwicklung geeigneter analytischer Methoden (T1.2) wurde das Produktwasser aus der Prototypenanlage auf die CEC-Entfernungsraten hin analysiert (T1.3). Darüber hinaus wurden die CEC-Gehalte im bewässerten Boden und in den Pflanzen analysiert, um die Ausbreitung der verbleibenden CECs nach der Behandlung zu bestimmen.

1.3 Wasserquelle und CECs

Die Ziel-CECs wurden in T1.1 ausgewählt, um die Leistungsfähigkeit der im Projekt entwickelten SERPIC-Technologie zur Entfernung von organischen und mikrobiellen CECs und zur Reduzierung ihrer Verbreitung in der Umwelt und in der Nahrungsmittelkette zu bewerten. Die Auswahl ist das Ergebnis einer eingehenden Untersuchung von Literaturdaten in den vier Zielregionen, die für das Projekt relevant sind: Spanien, Portugal, Italien und Südafrika. Die Auswahl wurde mit diesen vier Kriterien getroffen: ihr Vorkommen im Kläranlagenablauf, ihrer Persistenz gegenüber der biologischen Kläranlagenbehandlung, ihrer Bioakkumulation in organischem Gewebe und ihrer Toxizität für aquatisches Leben. Gleichzeitig wurden CECs, die in anderen Projekten, die von demselben Aufruf JPI Aquatic Pollutants gefördert werden, einbezogen, sowie außerdem CECs, die in aktuellen europäischen Berichten über strategische Ansätze zur Umweltqualität und Nachhaltigkeit empfohlen werden. Schließlich wurde das Potenzial der ausgewählten CECs zur Entfernung durch Solarstrahlung analysiert und mit den CECs verglichen, die in anderen Projekten zur Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser überwacht wurden. Sechs Ziel-CECs – vier organische CECs (Diclofenac DIC, Venlafaxin VNLX, Sulfamethoxazol SMX und I-opromid IOP), ein ARB (*E. coli*) und ein ARG (*sul1*) – wurden ausgewählt, um in der SERPIC-Projektkette analysiert zu werden; zusätzlich wurden 24 weitere CECs – 21 organische CECs, ein ARB und zwei ARGs – identifiziert und für zukünftige Projekte zur Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser empfohlen.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D1.1 *Target CECs* sowie Verlicchi, Grillini et al. 2023.

1.4 Prozesseinheiten

1.4.1 Nanofiltration

Die experimentelle Bewertung von Nanofiltrationsmembranen in T2.6 wurde in einem schrittweisen Ansatz durchgeführt, der die Wirksamkeit bei der Abtrennung i) von genetischen Markern (Kanamycin ARG), ii) von Nährstoffen (TP, TN, K, Ca, Mg, NH₄, NO₃), iii) von ausgewählten chemischen CECs (Diclofenac, Sulfamethoxazol, Venlafaxin) und iv) von antibiotikaresistenten Bakterien (ARB) (*Escherichia coli*) inkl. dem *sul1* ARG-Marker umfasste.

Basierend auf der durchgeführten Bewertung wurden fünf NF-Membranen als vielversprechend für Pilotversuche identifiziert. Es wurde die Membran DuPont NF270 für die Pilotbewertung ausgewählt. Während der Laborevaluation hatte die Membran > 6 LRV für ARG, > 70 % Retention von TN und ca. 80 % Abtrennung von chemischen CECs erzielt.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D2.5 *Nanofiltration unit*.

1.4.2 Desinfektions-Elektrolyseur

Im Rahmen des Projekts SERPIC wurde die elektrochemische Herstellung von zwei Oxidationsmitteln erforscht: eines zur Desinfektion von Route A (Ozon) und eines für die Behandlung von Route B (Persulfat).

Ursprünglich wurde Chlordioxid zur Desinfektion des Permeatstroms in Route A vorgeschlagen. Es kann durch die Kombination von Wasserstoffperoxid und Perchlorat hergestellt, die beide

elektrochemisch hergestellt werden können. Die Untersuchung dieses Oxidationsmittels ergab, dass die erforderlichen Wirkungsgrade in Bezug auf Produktions- und Energiekosten nicht erreicht wurden. Daher wurde in T2.4 beschlossen, eines der gebräuchlichsten Oxidationsmittel für die Wasserdesinfektion zu verwenden: elektrochemisch erzeugtes Ozon. Gasförmiges Ozon wird häufig zur Behandlung von Bewässerungsströmen für Pflanzen verwendet. Es erzeugt keinen Abfall, eliminiert Mikroorganismen und verhindert die Zugabe von Pflanzenschutzmitteln.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Reports D2.1 *Design of electrolyser units*, D2.2 *Diamond electrodes* und D2.3 *Electrolyser unit* sowie Rodriguez-Silva et al. 2024.

1.4.3 Persulfat-Elektrolyseur

Persulfate sind Oxidationsmittel, die aufgrund ihrer hohen Abbaukraft bei Aktivierung durch ultraviolett Licht häufig bei der Behandlung von Abwässern sowie bei der Beseitigung schwer abbaubarer Verbindungen im Wasser eingesetzt wird. Es ist leicht zu lagern und im Vergleich zu anderen Oxidationsmitteln lange haltbar.

Für die elektrochemische Herstellung von Persulfat wurden bordotierte Diamant (BDD)-Anoden hergestellt und vom Fraunhofer IST (T2.3) zur Verfügung gestellt. Diese Elektroden hatten die Abmessungen 50 mm x 50 mm. Die Kathode der Zelle produziert hauptsächlich Wasserstoff, so dass jedes korrosionsbeständige Material geeignet ist; in diesem Fall wurde Edelstahl als geeignete Option ausgewählt.

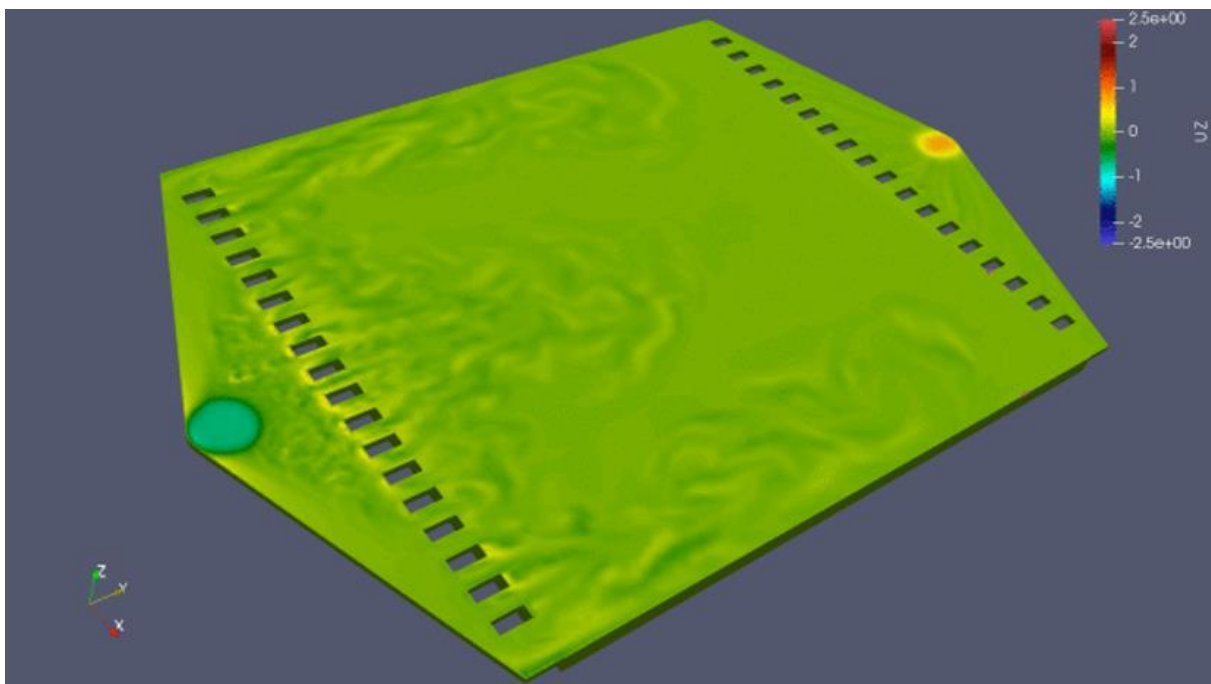


Abbildung 2: Strömungssimulation des Durchflusses durch die elektrochemische Zelle, Farbskala: Geschwindigkeit in Z-Richtung, senkrecht zur Elektrodenoberfläche.

Die Elektrolyseureinheit wurde von UCLM mit computergestütztes Design (CAD) konstruiert und mit 3D-Druck aus Kunststoff gebaut. Fraunhofer IST erstellte Strömungssimulationen, um das Design für eine möglichst geringe Durchmischung senkrecht zur Elektrodenoberfläche sicherzustellen, damit das Persulfat nicht gleich wieder an der Kathode zu Sulfat zurückreagiert, siehe **Abbildung 2**. Es wurde festgestellt, dass sich das CAD-Design in Kombination mit Strömungsoptimierung und 3D-Druck für die Persulfatproduktion als sehr zufriedenstellend erwiesen hat, da bei Konzentrationen von 200 mM Persulfat eine coulombische Effizienz von 57,19 % bzw. eine Energieeffizienz von $10,67 \text{ mmol} \cdot (\text{Ah})^{-1}$ erreicht wurde, was im Vergleich zu ähnlichen Prozessen deutlich höhere Werte sind.

Die SERPIC-Technologie ist für die Aufbereitung von Kläranlagenablauf vorgesehen. Um dies zu erreichen, muss die Anlage entsprechend dem Volumenstrom ausgelegt werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projekts die Skalierung der elektrochemischen Persulfatzelle erforscht. Diese Skalierung erfolgte mit zwei Ansätzen: zum einen durch das Testen eines Stapels von vier Zellen mit einer Gesamtelektrodenfläche von 100 cm² und zum anderen durch die Größenänderung der elektrochemischen Zelle, um ein Elektrodenpaar mit Abmessungen von je 100 cm² aufzunehmen. Es konnte festgestellt werden, dass die größere Zelle mit einem Elektrodenpaar einen geringeren Energieverbrauch sowie eine einfachere Bedienung, Wartung und Installation aufweist.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Reports D2.1 *Design of electrolyser units*, D2.2 *Diamond electrodes* und D2.3 *Electrolyser unit* sowie Castro, Montiel et al. 2023, Castro, Mena et al. 2023 und Castro, Mena et al. 2024, Castro, Montiel et al. 2024 und Rodriguez-Silva et al. 2024.

1.4.4 Photoreaktor

Nach der Überprüfung der Wirksamkeit des röhrenförmigen Photoreaktors im Labormaßstab wurde in T2.5 ein Prototyp entworfen und bei UP gebaut, der die folgenden Hauptkomponenten und Materialien umfasste: (i) eine Quarzröhre; ii) ein poröses Keramikrohr (Inopor®); iii) Niederdruck-UVC-Lampen (Philips) und Vorschaltgeräte (OSRAM); sowie (iv) reflektierende Aluminiumbleche (Alanod GmbH & Co. KG).

Das zu behandelnde Wasser, in diesem Fall das Nanofiltrationskonzentrat, wird tangential zur Wand des Quarzrohrs eingeleitet, wodurch eine spiralförmige Strömung entlang der Außenfläche des Keramikrohrs entsteht. Das Oxidationsmittel Persulfat (PS) wird über die Innenseite des porösen Keramikrohres zugeführt und durch die Poren in die Reaktionszone dosiert. Dies ermöglicht eine gleichmäßige axiale und radiale Verteilung des Oxidationsmittels entlang der ringförmigen Reaktionszone und gewährleistet eine effiziente Photolyse. Der Prototyp des Photoreaktors wurde in die Prototypanlage des SERPIC-Projekts bei UCLM integriert.

Um den photonischen Fluss innerhalb des Reaktors zu erhöhen, ist das System von einem 3-seitigen Geometriereflektor umgeben. Diese Aluminiumstruktur verhindert nicht nur den direkten Kontakt des Bedienpersonals mit der UVC-Strahlung, sondern erhöht dank ihres hohen Reflexionsvermögens auch die photonische Energie, die die Reaktionszone erreicht.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D2.4 *Photoreactor unit* sowie Martín-Sómer et al. 2023 und López-Vázquez 2024.

1.5 SERPIC-Prototypanlage

1.5.1 Entwicklung und Aufbau

Die einzelnen Prozesseinheiten – Nanofiltration, Desinfektionselektrolyseur, Ozongasmischer, Persulfatelektrolyseur und Photoreaktor – wurden mit Unterstützung der liefernden Partner von UCLM in Ciudad Real zusammengebaut und zum Laufen gebracht. Der gesamte Behandlungsablauf bestand aus einem Beschickungstank, der im Freien aufgestellt und mit dem Ablauf der Kläranlage Ciudad Real gefüllt wurde. Für die Steuerung und Automatisierung der Anlage wurden von SSP verschiedene Durchfluss-, Druck-, Temperatur-, Füllstands- und andere Messgeräte installiert und mit einer einfachen Steuerung verbunden.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Reports D2.6 *Electrics and control unit* und D2.7 *Prototype 1st version*.

1.5.2 Re-engineering

An der Prototypanlage wurden mehrere Verbesserungen vorgenommen. Es wurden Zwischentanks und Ventile hinzugefügt, sowie der Betriebs der Anlage optimiert, u. a. durch neue Ozongasdiffusoren, Verbesserungen am Bewässerungssystem und an den Kühlaggregaten, um die Temperatur des Elektrolyten bei der Herstellung der Oxidationsmittel zu senken.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D2.8 *Prototype final version*.

1.5.3 Pflanzversuche und Bewässerung

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Feldtests durchgeführt. Ein vorläufiger Feldversuch wurde in T2.9 in kleinen Töpfen durchgeführt, wobei die Bewässerung manuell erfolgte und nicht alle Anlageneinheiten in Betrieb waren. Der abschließende Langzeit-Feldtest wurde in einem Versuchsbeet mit 48 m³ Erdvolumen durchgeführt. Es war in sechs Bereiche zu je acht m³ aufgeteilt. Es wurde mit automatisierten Solarpumpen aus drei verschiedenen Wasserqualitäten bewässert: (i) Leitungswasser, (ii) Kläranlagenablauf sowie (iii) Kläranlagenablauf, der von der SERPIC-Prototypanlage aufbereitet wurde.

Zu Beginn jeder Prüfung wurde eine erste Bodenprobe entnommen. Während der rund sechstägigen Tests in beiden Versuchen wurden Proben aus den drei verschiedenen Bewässerungswässern entnommen und außerdem Proben von Wurzeln, Blätter und essbaren Pflanzenteilen sowie dem bewässerten Boden gesammelt.

1.6 Schadstoffanalysen

Organische Verbindungen (DIC, IOP, SMX und VNLX) aus den Wasserproben wurden mittels Festphasenextraktion (solid phase extraction, SPE) mit Polymersorbenskartuschen extrahiert. Die Analysen wurden mittels Flüssigchromatographie und Flugzeit-Massenspektrometrie (liquid chromatography time-of-flight mass spectrometry, LC-MS/TOF) durchgeführt. Die Keimzahlen von *Escherichia coli* (*E. coli*) wurden mit einer indirekten Impedanzmethode bestimmt. Die Genkopienzahlen der *sul1*-DNA, die mit Hilfe des Urine DNA Isolation Kit aus den Wasserproben extrahiert wurden, wurden durch Amplifikation mittels quantitativer Echtzeit-Polymerase-Kettenreaktion (qPCR) bestimmt.

Die Diagramme in **Abbildung 3** **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Abbildung 4** zeigen die durchschnittliche Gesamtreduzierungsrate, die in Route A und in Route B erzielt wurden. Für die meisten der analysierten CECs erreichten sie die gesetzten Ziele (gestrichelte rote Linien) des SERPIC-Projekts. Route A weist eine durchschnittliche Reduzierung bei allen organischen und mikrobiellen CECs um mehr als 90 % auf. Bei Route B wiesen Diclofenac (Arzneimittel), Sulfamethoxazol (Arzneimittel) und Iopromid (Kontrastmittel) eine durchschnittliche Reduzierung um mehr als 95 % auf; coliforme Bakterien wurden vollständig entfernt. Die Reduzierung von Venlafaxin bei Route B liegt unter dem Grenzwert von 90 %, der für Arzneimittel festgelegt wurde. Darüber hinaus erreichte *Sul1* den Schwellenwert von 99 % für ARGs bei höheren Persulfat-Konzentrationen von 0,99 mM und 1,6 mM.

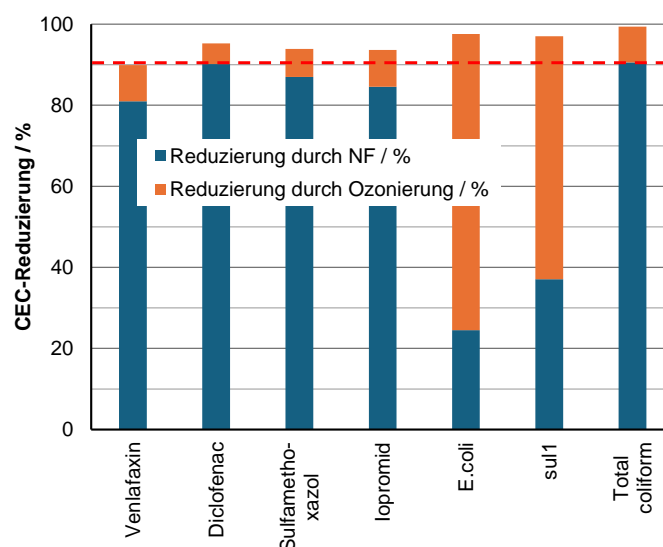


Abbildung 3. Durchschnittliche Werte der Reduzierung, die für die untersuchten CECs in Route A erreicht wurden, gesamt sowie Beitrag des Nanofiltrations- und des Ozonierungsprozesses. Die rote gestrichelte Linie ist das im SERPIC-Projekt festgelegte Reduzierungsziel.

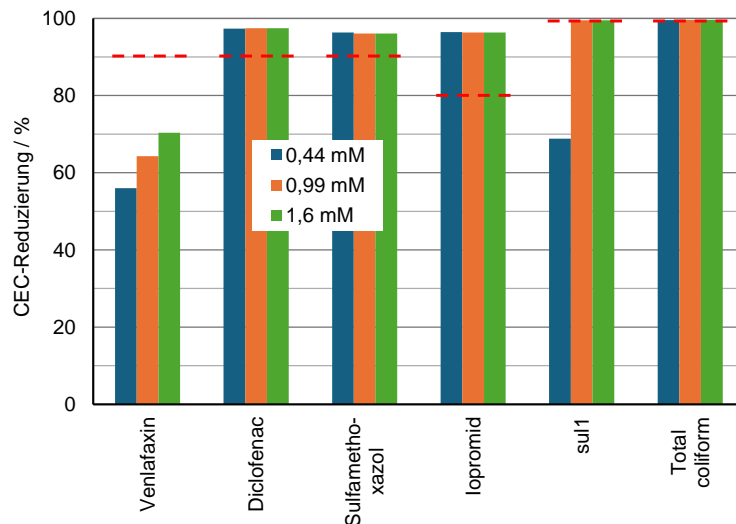


Abbildung 4. Durchschnittliche Werte der Reduzierung, die für die untersuchten CECs in Route B erreicht wurden, in Abhängigkeit von der Persulfat-Konzentration. Die Behandlung dauerte 2 min und 42 s. Die rot gestrichelten Linien sind die Entfernungsziele, die im SERPIC-Projekt festgelegt wurden.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Reports D1.2 *Analytical procedures*, D1.3 *Performance of bench-scale process units*, D1.4 *CECs in product water of v1 prototype*, D1.5 *CECs in soil and plants* und D1.7 *Performance of final prototype version*.

1.7 Kommunikation

Während des Projekts wurden vom Konsortium 45 Kommunikations- und Veröffentlichungsaktivitäten durchgeführt (siehe Kapitel 6):

- Neun Artikel in begutachteten wissenschaftlichen Zeitschriften
- Acht mündliche Beiträge auf wissenschaftlichen Konferenzen
- Acht Posterbeiträge auf wissenschaftlichen Konferenzen
- Ein Beitrag zu einer Monographie
- Ein Beitrag zu einem Newsletter
- Drei Beiträge zu Zeitungsartikeln
- Zwei Videos
- Neun Websites oder Beiträge zu Websites
- Fünf Workshops.

Das Fraunhofer IST erstellte zu Projektbeginn die Projektwebseite serpic-project.eu und pflegte sie während der Projektlaufzeit kontinuierlich durch Einstellen von Projektfortschritten, -berichten und -veröffentlichungen.

Stand 6.1.2025 wurden die neun wissenschaftlichen SERPIC-Zeitschriftenbeiträge von 235 Leserinnen und Lesern (Mendeley) gelesen und insgesamt 47-mal zitiert (Scopus). Als ein Höhepunkt der Kommunikationsaktivitäten organisierte SERPIC während der World Water Week 2024 gemeinsam mit fünf anderen Projekten des Programms AquaticPollutants eine Session. Die einstündigen Online-Session bestand aus drei Vorträgen ([Link zur Aufzeichnung auf YouTube](#)). Eine davon wurde von Paola Verlicchi vom SERPIC-Partner UNIFE gehalten, in der sie die unterschiedlichen technologischen Ansätze der sechs Projekte zur Minderung von CECs in verschiedenen Wasserquellen und für unterschiedliche Wassernutzungen vorstellte. Die Sitzung endete mit einer Diskussion mit dem Publikum (ca. 40 Teilnehmende).

Mitglieder des Konsortiums nehmen an allen vier Cross-Cutting-Issue-Workgroups des AquaticPollutant TransNet-Projekts teil.

1.8 Verwertungsplanung

Aufgrund der Bedeutung der Verwertung der Ergebnisse für eine erfolgreiche zukünftige Anwendung wurde eine schrittweise Strategie zur Entwicklung des Verwertungsplans verfolgt: Eine vorläufige Version bildete das Deliverable D4.1 und wurde ausgewählten Stakeholdern zur Diskussion und Rückmeldung vorgelegt. Die Einigung der Beteiligten über die generelle Strategie des Nutzungsplans bildete den Meilenstein M4.1. Bei der Weiterentwicklung des Plans wurden die Beiträge der Interessengruppen berücksichtigt. Die endgültige Version wird im öffentlichen Bericht als Deliverable D4.2 bereitgestellt.

Der Verwertungsplan adressiert ein Publikum außerhalb des Konsortiums und richtet sich an drei Gruppen: akademische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Gruppen. Da jede Gruppe unterschiedliche Interessen und Bedürfnisse hat, wurden separate Verbreitungsaktivitäten durchgeführt, um alle drei Gruppen gründlich über die Ergebnisse des Projekts zu informieren. Auf diese Weise können andere Organisationen wie Unternehmen oder F&E-Akteure die Ergebnisse aufgreifen und die Technologie zu einem höheren Technologie-Reifegrad für ihre spezifische Anwendung weiterentwickeln. Wissenschafts- und Bildungseinrichtungen sind wichtig, um die Technologie weiter zu erforschen und die wissenschaftlichen Ergebnisse auf andere Anwendungsbereiche zu übertragen. Die Gruppe aus der Wirtschaft setzt sich zusammen aus Anbietern von Kläranlagenausrüstung, Herstellern von Wasseraufbereitungstechnik und entsprechenden Komponenten sowie Endverbrauchern wie Landwirten, Bauernverbänden und Wasserversorgern. Es ist wichtig, auch mit der breiten Öffentlichkeit zu kommunizieren, um sie über neue Lösungen für CEC-freie Pflanzen und Lebensmittel zu informieren und Rechenschaft über die Verwendung öffentlicher Gelder abzulegen. Dabei wurden sowohl europäische, afrikanische als auch nationale Kanäle berücksichtigt, auch in Landessprachen. Ein wichtiger Punkt bei der Planung von Folgeaktivitäten des Konsortiums war die Suche nach Fördermitteln, wie z. B. Forschungsprogrammen, für ein mögliches späteres F&E-Projekt.

Beim General Assembly GA6 wurde begonnen, mögliche Folgeprojekte zu diskutieren. Als erster Schritt wäre ein Aufskalieren der Technologie nötig, unter Beteiligung von Unternehmen der Wasser- und Umwelttechnik sowie Kläranlagenbetreibern. Dazu wurde nach Fördermöglichkeiten gesucht. Außerdem wurden Ideen generiert, einzelne der SERPIC-Technologien für andere Anwendungen zu nutzen. Diskutiert wurde die Erzeugung von hochreinem Wasser für die Wasserstoffelektrolyse, der gezielte Abbau von PFAS oder die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Abfalldoniesickerwasser. Als mögliche Option sieht das Konsortium die Ausschreibung von Horizon Europe HORIZON-CL6-2025-02-FARM2FORK-03 *Overcoming the barriers for scaling up circular water management in agriculture*, die im Entwurf vorliegt und voraussichtlich im April 2025 veröffentlicht wird.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Reports D4.1 *Exploitation Plan 1st version* und D4.1 *Exploitation Plan final version*.

1.9 Stakeholdereinbindung

Während der Vorbereitung des Projektantrags wurden 29 Organisationen gewonnen, um den Vorschlag zu unterstützen, sowie das Konsortium zu beraten und Rückmeldungen zu den Ergebnissen zu geben:

- Drei AMR-Organisationen
- Fünf Vertretungen von Landwirten
- Vier Unternehmen
- Fünf öffentliche Einrichtungen, regionale Körperschaften oder Kommunen
- Eine Regulierungsbehörde
- Ein Normungsgremium
- Vier Kläranlagenbetreiber
- Zwei Wasserversorger
- Vier Wasser- und/oder Umwelt-Organisationen.

13 Interessenvertreter wurden in separaten Sitzungen in die Generalversammlungen des Projektes einbezogen, um sich vorzustellen und die Projektergebnisse zu kommentieren.

Um die Projektergebnisse und den Verwertungsplan zu diskutieren, wurden die SERPIC-Ergebnisse im Jahr 2024 in mehreren Workshops und Interviews verschiedenen Interessenvertretern vorgestellt und diskutiert.

In Bezug auf die Einbindung von Stakeholdern haben wir die Erfahrung gemacht, dass die Zusammenarbeit am besten von den lokalen Partnern auf der Grundlage bestehender Beziehungen und in deren Sprache erfolgt. Eine zentrale Kommunikation und Interaktion durch den Koordinator ist möglicherweise nicht so effektiv. Darüber hinaus hat sich eine individuelle Kommunikation, z. B. durch Interviews, als sehr effektiv erwiesen und kann effektiver sein als größere Veranstaltungen mit mehreren Stakeholdern.

1.10 Karriereentwicklung

Drei Doktorandinnen und Doktoranden von UNIFE, UCLM und UP sowie eine M.-Sc.-Studentin bei UNIFE arbeiteten an SERPIC-Projektaufgaben. 11 Entsendungen von Mitgliedern des Konsortiums zu anderen Partnern mit Zeitdauern zwischen einer Woche bis zu 300 Tagen wurden durchgeführt.

1.11 Lebenszyklusanalysen (LCA und LCC)

Um den Kosten- und Umwelteinfluss der SERPIC-Technologie zu bewerten, wurden zwei standardisierte Analysen durchgeführt: Mit dem Life Cycle Costing (LCC) wurden die Kosten für die Herstellung und den Betrieb von SERPIC-Systemen untersucht. Die Kosten für ein Projekt dieser Größenordnung hängen sowohl von den Investitionskosten (CAPEX) als auch von den Betriebskosten (OPEX) ab. Im Falle von CAPEX wird dabei die Investition langfristig amortisiert. Um diesen Wert zu bestimmen, wurden drei Szenarien (konservativ, moderat und optimistisch) untersucht, in denen die Stunden der Nutzungsdauer jedes Materials und jedes Gerätes der Kläranlage berücksichtigt wurden. Bei einer Nutzungsdauer von 20.000 Stunden erreicht der CAPEX in moderatem Szenario Werte von ca. 17.500 €. Auf der anderen Seite ermittelt der OPEX die Betriebskosten der Prototypanlage, in diesem Fall wurde er ebenfalls für 20.000 Betriebsstunden (ca. 2 1/2 Jahre ohne Unterbrechung) definiert und erreicht einen Wert von 12.831 €. Dieser Wert beinhaltet den Preis für entionisiertes Wasser, Strom, Perchlorsäure und Schwefelsäure.

Mit dem Life Cycle Assessment (LCA) wurde der Material- und Energieverbrauch sowie der Einfluss in den Wirkungskategorien, die mit dem Bau der SERPIC-Prototypanlage verbunden sind, analysiert wurden. Zu diesen Wirkungskategorien gehören der CO₂-Fußabdruck, der Wasserfußabdruck, die Toxizität für den Menschen und die Auswirkungen auf Ökosysteme. Zusätzlich zu diesen Bewertungen wurde ein Plan zum Risikomanagement gemäß der EU-Verordnung über die Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser entwickelt. Dazu wurde eine Fehlermöglichkeits-, Wirkungs- und Kritikalitätsanalyse (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis, FMECA) durchgeführt. Dabei wurden die Auswirkungen der Fehlermodi der verschiedenen SERPIC-Anlagenkomponenten auf die Qualität des Ablaufwassers und die Eignung für die Bewässerung ermittelt. Im Rahmen der Analyse wurden die Hauptrisiken im Zusammenhang mit den möglichen Fehlermodi ermittelt und welche Präventionsmaßnahmen ergriffen werden sollten, um sie zu verringern.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D3.2 *LCA and LCC results*.

1.12 Energiemanagement und -konzepte

1.12.1 Energiemanagement des Prototyps

Der ursprünglich vorgesehene Einsatz von Photovoltaik für den Betrieb des Prototyps wurde nicht umgesetzt. Bei UCLM in Ciudad Real, wo der Prototyp aufgebaut wurde, war zwar ein PV-Modul vorhanden. Unerwarteterweise stellte sich jedoch heraus, dass sowohl der Wandler als auch die Batterie nicht in einem Zustand waren, der in diesem Forschungsprojekt verwendet

werden konnte. Es stand kein Budget für die Anschaffung neuer Geräte zur Verfügung. Die SERPIC-Technologie würde als zusätzlicher Reinigungsschritt auf dem Gelände von Kläranlagen eingesetzt. In der Regel verfügen Kläranlagen bereits über große Quellen regenerativer Energie, indem Biogas aus dem Schlamm der biologischen Reinigungsstufe über Verbrennungsmotor und Generator verstromt wird. Daher wird das Manko, bei diesem Projekt keine PV zu verwenden, als gering angesehen.

Die SERPIC-Prototypanlage hatte im Vollbetrieb einen Energieverbrauch von 630 W. Der Volumenstrom am Einlass der Nanofiltration betrug 34 L/h. Die Nanofiltration teilte diesen Strom in einen Teilstrom von 13 L/h für Route A zur Bewässerung und einen Teilstrom von 21 L/h für Route B zum Ablauf in die Umwelt auf. Damit ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf von 18,53 Wh pro Liter zu behandelndes Wasser, entsprechend 18,53 kWh pro Kubikmeter. Dieser recht hohe Wert ist auf den labormäßigen Prototypmaßstab zurückzuführen, bei dem nicht alle Komponenten energiemäßig optimiert wurden. In größeren Maßstäben wird der spezifische Energieverbrauch pro Wasservolumen deutlich reduziert werden können.

1.12.2 Energieversorgungskonzepte

In T3.1 wurden die meteorologischen Bedingungen für die Nutzung von Solar- und Windenergie für die verschiedenen potentiellen Anwendungsstandorte in Bezug auf die Gesamtenergieintensität und die jährliche Verteilung untersucht. Dabei wurde sowohl der Gesamtenergiebedarf der Demonstrationsanlage als auch der Bedarf der einzelnen Komponenten analysiert, um das Potenzial für einen individuellen und flexiblen Betrieb mit transients Stromversorgung bei minimierter elektrischer Speicherkapazität zu identifizieren. Für die verschiedenen Einsatzorte wurde eine PV-Anlage für unterschiedliche Deckungsgrade konzipiert, um die Prototypanlage mit reinen PV- bzw. mit PV-Hybridlösungen zu versorgen.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D3.1 *Energy supply concepts*.

1.13 Koordination

Projektkoordinator war von Projektbeginn bis zum Juli 2023 Dr. Lothar Schäfer vom Fraunhofer IST. Nach seinem altersbedingten Ausscheiden aus dem IST übernahm Dr.-Ing. Jan Gäbler die Rolle des Koordinators. Beide erfüllten alle erforderlichen Aufgaben des Projektkoordinators, unter anderem:

- Weiterleitung der Informationen vom Projektsekretariat und vom Begleitprojekt
- Teilnahme am Aquatic-Pollutants Core Synergy Forum (Juli 2023, Dezember 2023, Mai 2024)
- Organisation der Teilnahmen von Konsortialpartnern an den CCI working groups
- Organisation der Kommunikation mit den Mitgliedern des Stakeholder-Boards
- Leitung der General Assemblies GA1 bis GA6 und der monatlichen Online-Konsortial-Besprechungen
- Überwachung der Einhaltung der Aquatic-Pollutants-Richtlinien.

1.14 Projektmanagement

Dr.-Ing. Jan Gäbler vom Fraunhofer IST nahm alle erforderlichen Aufgaben des Projektmanagers war, unter anderem:

- Installation und Pflege der projektinternen Dateiablageplattform
- Bereitstellung eines Videokonferenzsystems für das Konsortium
- Management der Berichtspflichten (Aquatic-Pollutants-Berichte, projektinterne Deliverables, Berichte für den deutschen Fördergeber)
- Vertretung des SERPIC-Projektes auf dem Mid-term Review Meeting 31.5.-1.6.2023 in Alcalá Henares, Spanien
- Organisation der General Assemblies GA1 bis GA6
- Organisation der monatlichen Online-Konsortialtreffen
- Daten-Management und Open-Science-Management.

Im Februar 2024 wurde im Konsortium entschieden, das Projekt um sechs Monate bis zum 31.12.2024 zu verlängern. Damit wurde es möglich, die Kosten für die Teilnahme am Final Review Meeting dem Projekt zu belasten sowie die geplanten Aktivitäten zu Veröffentlichungen und Verwertung gründlich vornehmen zu können.

Es wurde entschieden das ursprünglich geplante letzte General Assembly GA7 nicht durchzuführen. Die monatlichen Online-Projekttreffen wurden als ausreichend betrachtet um die noch offenen Aufgaben zu besprechen. So konnte die für die Reisen vorgesehenen Budgetmittel für eine gründlichere Planung der Verwertung eingesetzt werden.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 1: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises in Euro

Position	Abgerechnete Kosten
Materialkosten	6.817,59
Personalkosten	428.217,73
Reisekosten	16.674,37
Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	1.067,87
Summe	452.777,56

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten waren notwendig um die Aufgaben gemäß des Förderbescheides zu erfüllen. Sie waren außerdem angemessen, um die im Antrag gesetzten Ziele zu erreichen.

4 Nutzen und Verwertbarkeit

4.1 Bewertung der Ergebnisse und Vergleich mit dem Stand der Technik

Um CECs aus Kläranlagenablauf zu entfernen, stehen bereits einige Technologien zur Verfügung und werden, vor allem in der Schweiz, bereits installiert. Um die Vorteile des SERPIC-Ansatzes zu bewerten, wurden die Projektergebnisse mit diesem Stand der Technik verglichen. Zum einen wurden die Verfahren zur (i) Desinfektion und (ii) Entfernung von CECs mit bestehenden Verfahren verglichen. Zum anderen kombiniert der SERPIC-Ansatz diese beiden Verfahren in einer neuartigen Kombination mit Hilfe der Nanofiltration, so dass diese gesamte Prozesskette mit bestehenden Prozessketten zur CEC-Minderung verglichen werden kann.

Die **Desinfektion** des NF-Permeats zur Erzeugung von sicherem Wasser für die Bewässerung erfolgt in SERPIC mit Hilfe von Ozongas, das elektrochemisch aus Wasser erzeugt wird. Das Ozongas wird in einem Kontaktor in das Permeat diffundiert, um mit den Krankheitserregern in Kontakt zu kommen. Dieser Ansatz wird heute bereits z.B. bei der Desinfektion von Trinkwasser eingesetzt. Das Ozongas wird heute jedoch nicht aus Wasser, sondern aus Sauerstoff erzeugt. Der Sauerstoff wird in flüssiger Form unter hohem Druck gespeichert. Es wird verdampft und durch einen Ozongenerator geleitet, der es über ein dielektrisches Barriereentladungsplasma (DBD) in Ozon umwandelt. Das Ozongas wird dann mit Hilfe eines Kontaktors, ähnlich wie bei SERPIC, in den Wasserstrom geleitet.

Der größte Vorteil des SERPIC-Ansatzes gegenüber der Standard-Ozonung aus Sauerstoff besteht darin, dass nur begrenzte Energiemengen zur Erzeugung des Ozongases benötigt werden. Im Gegensatz dazu benötigt die Ozonung aus Sauerstoff viel Energie für die Vergasung und den

Plasmagenerator. Ein weiterer Vorteil von SERPIC ist, dass nur Wasser als Ausgangsstoff benötigt wird; Die Abgabe von flüssigem Sauerstoff ist nicht notwendig. Darüber hinaus erfordert dies auch viel weniger Aufwand für Sicherheit, Hardware-Installation und Wartung.

Der SERPIC-Ansatz zum Abbau von CECs durch UV-C-aktivierte Oxidation mit Persulfat kann mit der Entfernung von CECs allein durch UV-C-Bestrahlung verglichen werden, ein Ansatz, der bislang noch nicht implementiert ist, aber verschiedentlich getestet wird. Der zusätzliche Effekt des Persulfats ist eine wesentlich höhere Abbauleistung und eine kürzere Abbauphase. Als Nachteil benötigt der SERPIC-Ansatz Sulfat als Verbrauchsmaterial.

Die komplette Prozesskette von SERPIC, bestehend aus Nanofiltration, Desinfektion des Permeats über elektrogeniertes Ozongas und CEC-Abbau des Konzentrats über UV-C-aktivierte Oxidation mit Persulfat, ist vergleichbar mit den oben genannten Technologien, die bereits in Kläranlagen eingesetzt werden: Ozonung mit Ozongas aus Sauerstoff und Adsorption mit Aktivkohle (GAC, PAC). Diese Technologien werden verwendet, um CECs aus dem Ablauf von Kläranlagen zu entfernen und sicheres Wasser in die aquatische Umwelt abzuleiten. In Abgrenzung zum Stand der Technik implementiert die vollständige Prozesskette von SERPIC einen Multibarrierenansatz. Dieser wird oft als Voraussetzung erachtet, um verschiedene Arten von chemischen und mikrobiellen CECs sicher zu entfernen, und somit das Problem der großen Vielfalt und der starken Variation der Konzentration des CEC-Vorkommens sinnvoll angeht.

Der Hauptvorteil von SERPIC besteht darin, dass zwei Ströme erzeugt werden: ein sicherer Strom für die Einleitung in die aquatische Umwelt und ein weiterer Strom, der als zusätzliche Wasserquelle für Anwendungen verwendet werden kann, die eine höhere Wasserqualität erfordern. Hier ist die Wasserqualität in Bezug auf CEC-Gehalt und Krankheitserreger im Vergleich zur Ozonung oder Adsorption deutlich höher. Somit kann es z. B. zur Bewässerung verwendet werden. Aber durch die Weiterentwicklung der Technologie könnten auch andere Wassernutzungen möglich sein, sogar die Aufbereitung von Trinkwasser wird als möglich erachtet. Darüber hinaus bietet die Nanofiltration das Potenzial, auch PFAS, Mikroplastik und Nanoplastik aus dem Ablauf von Kläranlagen zu entfernen. Damit ist die Entscheidung für die SERPIC-Technologie zukunftsicher, wenn in Zukunft Grenzwerte für diese Schadstoffe in Kraft treten.

4.2 Zielerreichung

Ziel 1 war es, die Verbreitung und Transformation von CECs einschließlich ARB und ARG im Wasserkreislauf von Haushalten und Industrien zu den Kläranlagenabwässern und danach über die Bewässerung in die Nahrungsmittelversorgung, in Böden und Grundwasser sowie in Flusseinzugsgebiete, Mündungen, Küstengebiete und Ozeane zu minimieren.

Dieses Ziel 1 wurde erreicht, da SERPIC erfolgreich eine CEC-Behandlungstechnologie bis zum Prototypmaßstab (TRL5) entwickelt hat. Die Technologie bietet damit eine Wissensbasis für die weitere Entwicklung bis hin zur realen Anwendung in Kläranlagen (TRL9). Wenn dies erreicht ist, werden die CEC einschließlich ARB und ARG reduziert, was zu einer Minimierung ihrer Ausbreitung sowohl in kommunalen als auch in natürlichen Wasserkreisläufen führt.

Ziel 2 war es, CECs aus Kläranlagenabwässern durch die Entwicklung einer innovativen Behandlungstechnologie, basierend auf Membranfiltration und photonisch aktivierten elektrochemischen Prozessen, zu reduzieren. Für die beiden Anwendungswege werden unterschiedliche Reduktionsziele verfolgt, definiert als Prozentsatz im Verhältnis zum Kläranlagenablauf, das das SERPIC-System speiste:

- Route A: für Bewässerungszwecke strebten wir eine Reduktion der Ziel-CECs um mindestens 90 % an, gemäß den Zielen der EU-Verordnung über Mindestanforderungen für die Wiederverwendung von Wasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung;

- Route B: für die Einleitung in die aquatische Umwelt strebten wir eine Reduktion von mehr als 80 % an. Wir haben folgende Reduktionsziele verfolgt:

- ARB, ARGs, Schmerzmittel: > 99 %
- Arzneimittel: > 90 %

- *Antiretrovirale (ARVs): > 80 %*
- *Antikonvulsiva: > 80 %*
- *Konservierungsstoffe in Körperpflegeprodukten: > 99 %*
- *Illegale Drogen: > 90 %*
- *Industrielle Mikroschadstoffe: > 80 %*

Für Route A erzielte SERPIC Reduktionsraten zwischen 89,9 % und 99,4 % für die sechs Ziel-CEC, d. h. eine volle Zielerreichung.

Für Route B erzielte SERPIC Reduktionsraten zwischen 96,1 % und 99,6 % für fünf der sechs Zielverbindungen und 70,3 % für Venlafaxin.

Damit erreichte das SERPIC-Konsortium 11 der 12 Reduktionsziele, d. h. 92 % von Ziel 2.

Ziel 3 war es, *Methoden und Werkzeuge für Monitoring, Gesundheits- und Umwelt-Risikoabschätzungen sowie für die Umsetzung neuer Wiederverwendungskonzepte einschließlich neuer Behandlungstechnologien zu entwickeln, als Grundlage für bessere politische Entscheidungen, regulatorische Fragen und neue Standards.*

SERPIC entwickelte eine Methodik zur Auswahl relevanter Ziel-CECs auf der Grundlage der vier Kriterien Vorkommen, Persistenz, Bioakkumulation und Toxizität. Diese Methode kann nicht nur für die Entwicklung von Wasserbehandlungstechnologien eingesetzt werden, sondern auch für viele andere Zwecke wie Überwachung und Risikobewertung.

4.3 Gelernte Lektionen und Ausblick

Unter Berücksichtigung der Projektergebnisse und des Rückmeldungen der Stakeholder lassen sich drei Lehren und Ausblicke ziehen:

A) Die Desinfektion durch elektrochemisch hergestelltes Ozongas gilt als vielversprechende Alternative zur Gasozonierung mit Ozon, das bislang aus flüssigem Sauerstoff hergestellt wird. Letzteres Verfahren benötigt viel Energie, so dass die elektrochemische Gaserzeugung das Potenzial hat, eine energie- und kostensparende Alternative zu werden. Darüber hinaus wäre diese Technologie technisch viel weniger komplex und damit ausfallsicherer und würde weniger Wartung erfordern. Außerdem würde kein flüssiger Sauerstoff als Verbrauchsmaterial benötigt, was für Regionen, in denen er nicht leicht verfügbar ist, einen großen Vorteil darstellen würde. Die Anwendung dieser Desinfektionsmethode beschränkt sich nicht nur auf die Desinfektion von Abwasser für die Bewässerung. In ähnlicher Weise könnte es z. B. zur Desinfektion bei der Trinkwassergewinnung eingesetzt werden.

B) Nanofiltration wird oft nicht als sinnvolle Technologie zur CEC-Minderung in Kläranlagen angesehen. Ein Grund, der genannt wird, ist, dass die CEC nicht abgebaut, sondern nur abgetrennt werden. Bisher gibt es keine guten Methoden, um das Retentat mit den konzentrierten CEC zu behandeln. Unsere Ergebnisse zeigen nicht nur eine sehr gute NF-Trennleistung, sondern SERPIC bietet auch eine neue Methode, um die CEC im Konzentrat auf sehr effiziente Weise abzubauen. Dies bietet neue Möglichkeiten für die Nanofiltration als zentrale CEC-Trennmethode. NF hat auch den Vorteil, dass kontinuierlich ein sehr sauberes Permeat entsteht, das nicht nur für die Bewässerung verwendet werden kann, sondern auch in anderen Anwendungen, bei denen hochwertiges Wasser benötigt wird, einschließlich der Industrie (Kühlung, Prozesswasser) und – mit einigen geringfügigen zusätzlichen Aufbereitungen – auch für Trinkwasser.

C) Eine Aufskalierung der SERPIC-Technologie auf die volle Kläranlagengröße würde eine Erhöhung der Durchflussrate um fünf Größenordnungen erfordern. Das bedarf enormer Weiterentwicklungen und Ressourcen. Einen besonderen Vorteil sehen wir allerdings auch für Anwendungen, die die Aufbereitung kleinerer Volumenströme erfordern, z. B. bei der dezentralen Abwasserbehandlung, wie z. B. in abgelegenen Orten oder ländlichen Gebieten, in denen kein Kanalisationssystem zur Verfügung steht. Eine Entwicklung von SERPIC bis TRL9 und damit eine reale Anwendung würde in kleinen Maßstäben entsprechend viel schneller gehen.

4.4 Ergebnistransfer

Da die Ergebnisse von SERPIC auf TRL5 basieren, ist viel Weiterentwicklung notwendig, bis die Technologie in der Praxis angewendet werden kann.

Die Zuverlässigkeit der Technologie hängt mit ihrer Eignung für kontinuierlichen Betrieb und ihrer Fähigkeit zusammen, die von nationalen und europäischen Vorschriften festgelegten Grenzwerte einzuhalten. Ein sinnvoller Weg für die weitere Entwicklung wäre eine Risikobewertung für Umwelt und menschliche Gesundheit, die gemäß den jüngsten EU-Richtlinien für das gesamte System (Behandlung, Lagerung und Endverwendung) durchgeführt werden sollte. Das würde auch die aktuellen präventiven Sicherheitsmaßnahmen des gesamten Prozesses bestätigen können.

Die Technologie hat bewiesen, dass die CEC-Reduzierungsraten sehr zufriedenstellend und vielversprechend sind. Der wichtigste Schritt für die weitere Entwicklung ist es, die Technologie zu skalieren und zu zeigen, dass sie auch bei höheren Volumenströmen gut funktioniert. Die SERPIC-Prototypenanlage hatte einen Volumenstrom von 34 Litern pro Stunde. Eine mittelgroße Kläranlage hat einen Volumenstrom im Bereich von 1000 Kubikmetern pro Stunde. Das bedeutet, dass die Technologie für den Einsatz in Kläranlagen um fünf Größenordnungen skaliert werden muss. Dies kann nur in mehreren Schritten umgesetzt werden. Der erste Schritt wäre die Skalierung auf Demonstrator-Niveau mit einem Volumenstrom von ca. einem Kubikmeter pro Stunde (1000 Liter). Dies könnte durch ein weiteres gefördertes Projekt mit Beteiligung von Maschinenbauern, wie z.B. Membranherstellern, Diamantelektrodenherstellern oder Herstellern von elektrochemischen Zellen, erreicht werden. Förderprogramme wie LIFE+, Horizon Europe oder Water4All könnten für diesen Schritt geeignet sein. Diese Förderprogramme bieten unter anderem ausreichend Hardware-Budget für den Aufbau in größerem Maßstab. Daher werden ERANETs höchstwahrscheinlich nicht geeignet sein, da sie in der Regel keine hohen Hardware-Budgets bieten. Erweist sich die Technologie auch bei der Reduzierung von CECs auf diesem Volumenstromlevel, können zuverlässigere Abschätzungen des Energiebedarfs und der Investitionskosten vorgenommen werden.

Damit wäre die Voraussetzung für den nächsten Schritt geschaffen: das Aufskalieren auf ein nahezu technisches Niveau von 100 Kubikmetern pro Stunde. Auf diesem Maßstab könnten nicht nur die Gerätehersteller, sondern auch die Kläranlagen bereit sein, sich zu beteiligen und die notwendigen Anforderungen und Randbedingungen in Bezug auf Energieeffizienz, Bezahlbarkeit und praktischen Betrieb zu schaffen. Als Förderprogramme könnten sich für diesen Schritt KIC oder die deutschen BMBF-Programme unter der Voraussetzung eignen, dass die notwendigen nicht-deutschen Partner eingebunden werden können.

Da seit Anfang 2025 europäische Grenzwerte in Kraft sind, müssen jetzt Kläranlagen zusätzliche Aufbereitungsprozesse installieren, um diese Grenzwerte für ihre Einleitung oder für die Bereitstellung von Wasser zur Wiederverwendung einzuhalten. Hersteller von Wasseraufbereitungsanlagen sollten dies als sinnvollen Markt betrachten und entsprechende Wasseraufbereitungsprodukte auf Basis der aufskalierten SERPIC-Technologie entwickeln. Schließlich können Kläranlagen in diese Produkte investieren, sie installieren und in Betrieb nehmen.

Die SERPIC-Technologie bietet sowohl erhebliche Vorteile als auch einige bemerkenswerte Herausforderungen für Anwendungen zur Wasserwiederverwendung. Durch die Nutzung seiner Stärken bei gleichzeitiger Behebung von Schwächen durch strategische Planung und Einbeziehung der Bevölkerung besteht das Potenzial, die Praktiken der Wasserwiederverwendung in Afrika, Europa und darüber hinaus erheblich zu verbessern. Die kontinuierliche Ausrichtung an den regulatorischen Rahmenbedingungen und den Interessen der Interessengruppen wird für die erfolgreiche Implementierung und Nachhaltigkeit der Technologie bei der Bewältigung der Herausforderungen der Wasserknappheit im Agrarsektor von entscheidender Bedeutung sein. Sowohl geplante als auch bestehende Initiativen deuten darauf hin, dass das Umsetzungstempo im Wasserdienstleistungssektor durch soziopolitische, technische und wirtschaftliche Herausforderungen behindert wurde. Dennoch erkennen die Wasserversorgungsbehörden zunehmend, dass die Wiederverwendung von Wasser nicht mehr nur als Notfallmaßnahme betrachtet werden

sollte. Stattdessen wird die Wasserrückgewinnung und -wiederverwendung zu einer alternativen Wasserquelle, die in langfristige Wasserversorgungsstrategien im Rahmen der Ressourcenplanung integriert werden muss.

Die Wiederverwendung von Wasser stellt eine praktikable Lösung dar, um die drängenden Wasserprobleme Afrikas zu bewältigen. Es wurde eine Roadmap vorgeschlagen, mit deren Umsetzung in Afrika Potenzial für eine erfolgreiche Implementierung der SERPIC-Technologie besteht. Während es Potenzial für erhebliche Fortschritte durch die Sensibilisierung der Öffentlichkeit gibt, ist die Überwindung regulatorischer, infrastruktureller und finanzieller Hindernisse entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung in Afrika und darüber hinaus. Ein koordinierter Ansatz, an dem Regierungen, der Privatsektor und die Einbeziehung der Bevölkerung beteiligt sind, wird unerlässlich sein, um die Bemühungen zur Wasserrückgewinnung voranzutreiben.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D3.3 *Transfer concepts*.

4.5 Empfehlungen für politische Entscheidungsträger

Die Ergebnisse des SERPIC-Projekts wurden dahingegen bewertet, welche Empfehlungen den nationalen und europäischen politischen Entscheidungsträgern für die Aktualisierung von Richtlinien in Bezug auf die Abwasserbehandlung und die Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser sowie für zukünftige Standards in Bezug auf organische und mikrobielle CECs gegeben werden können. Als relevante Projektergebnisse wurde identifiziert: die Entwicklung (i) einer Methodik zur Auswahl relevanter organischer und mikrobieller KEK für Überwachungspläne, (ii) die SERPIC-Technologie als Alternative zu herkömmlichen Aufbereitungsmethoden (z. B. Tiefenfiltration und UV-Desinfektion), die in der Lage ist, ein Produktwasser zu gewährleisten, das den Standards für eine direkte Wiederverwendung entspricht (wie z. B. in der Europäischen Verordnung 2020/741 festgelegt), (iii) eine Methodik für die Risikobewertung der entwickelten Technologie im Hinblick auf die Umsetzung des erforderlichen Risikomanagementplans für die Wasserwiederverwendung und (iv) eine Technologie für die vierte Reinigungsstufe als Alternative zu den bekannten und bereits umgesetzten (Ozonung und granuliert Aktivkohlefiltration) für die Entfernung von CECs aus dem Wasser vor der Einleitung Oberflächengewässer.

Für Detailergebnisse siehe Deliverable Report D4.3 sowie Verlicchi, Lacasa et al. 2023.

4.6 Erfindungen und Schutzrechte

Es sind im Berichtszeitraum keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen durch das Konsortium erfolgt.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Hier sind in erster Linie die anderen Projekte zu erwähnen, die im Rahmen der gleichen Ausschreibung gefördert wurden³. Davon sind insbesondere die sechs weiteren Projekte des Themas 3 „Taking Actions“ wichtig, die ebenfalls Lösungen zur Reduzierung von CECs in Wasser erarbeitet haben. Je nach Wasserquelle, Wasserverwendung und weiteren Randbedingungen wurden individuell angepasste Lösungen entwickelt:

Im Projekt **NanoTheC-Aba** (<https://www.nanothecaba.unito.it>) wurde Thermokatalyse benutzt, um ebenfalls CECs in Kläranlagenablauf aber auch in Industrieabwässern zu reduzieren, für Anwendungen ebenfalls in der Bewässerung und zur Abgabe in die Umwelt aber auch als Industrieprozesswasser. Dabei kamen ebenfalls Membranfiltrationen und oxidative Prozesse zum Einsatz. Es wurden Reduktionsraten z. B. für Bisphenol A von 90 % erreicht.

³ <https://aquatic-pollutants.eu/Projects.html>

Im Projekt **GreenWaterTech** (https://aquatic-pollutants.eu/Projects/Theme+3_+Taking+Actions/GreenWaterTech.html) wurde eine Kombination von „grünen“ chemischen Prozessen genutzt, um Oberflächenwasser für verschiedenste Nutzungen zu reinigen. Als „grüne“ Prozesse kamen Adsorptionsprozesse, enzymatische Reinigung und Photokatalyse zum Einsatz. Die Lösung zeichnet sich durch einen Multibarrierenansatz, niedrige Energieverbräuche und einen geringen Chemikalienbedarf aus.

Das Projekt **PRESAGE** (<https://biogroup.usc.es/presage>) nutzte fortschrittliche biologische Prozesse zur Behandlung von Haushalts-, Industrie- und Klinikabwässern, um die CECs vor der Abgabe in die Umwelt zu reduzieren. Verschiedene Bioreaktoren, Membranfiltration und chemische Desinfektion kamen zum Einsatz. Reduktionsraten zwischen 2,5 und 4 Log-Einheiten für mikrobielle Pathogene wurden erreicht.

Das Projekt **REWA** ([Link auf Projektwebseite](#)) nutzte auf natürlichen Materialien basierende chemische Prozesse zur Reduzierung von CECs in Kläranlagenablauf, Industrieabwässern und Oberflächenwasser. Es kamen Sorptionsprozesse, Biokoagulation sowie Photokatalyse zum Einsatz. Es wurden Reduktionsraten zwischen 71 % und 99,7 % für organische Schadstoffe und Schwermetalle erreicht. Betrachtete Anwendungen waren die Abgabe in die Umwelt sowie die Nutzung als Trinkwasser.

Im Projekt **NATURE** (<https://www.natureproject.eu>) wurden naturbasierte Prozesse entwickelt, um CECs im Kläranlagenablauf bzw. im Oberflächenwasser zu reduzieren und es zur Bewässerung zu nutzen bzw. in die Umwelt abzugeben. Es wurden verschiedenste Arten von Pflanzenkläranlagen sowie die Reduzierung bei natürlichen Renaturierungsprozesse in Flüssen sowie in Salzmarschen untersucht. Es wurden Reduzierungsraten zwischen 18 % und 99 % für verschiedene organische Schadstoffe sowie zwei bis drei Log-Einheiten Reduzierung für antibiotikaresistente Bakterien gemessen.

Im BMBF-Projekt **HOTMATS** (FKZ 01KI2208) wird die gerichtete Beseitigung von Antibiotikaresistenzgenen und pathogenen Bakterien durch modulare Behandlungsverfahren untersucht. Dazu wird an Hotspots wie Krankenhäusern, Pflegeheimen und Schlachtbetrieben eine Abwasserbehandlung erprobt, die unterschiedliche oxidative, adsorptive und lichtbasierte Methoden kombiniert.

Das BMBF-Projekt **ELARIA** (FKZ 02WIL1657) erarbeitet gemeinsam mit israelischen Partnern die Entfernungseffizienz und Risikobewertung von Antibiotikaresistenzen, Pathogenen und Fäkalindikatoren bei der weitergehenden Abwasserbehandlung. Ziel des Forschungsprojektes ist es, verlässliche Daten über zusätzliche Abwasserbehandlungsschritte hinsichtlich der Entfernung von multiresistenten Erregern, Antibiotikaresistenzgenen, Enteroviren, Protozoen und Indikatormikroorganismen zu gewinnen.

Im BMBF-Projekt **Pho2zon** (FKZ 03WIR1808A) wird untersucht, wie Elektrolysesauerstoff zur Elimination von Mikroschadstoffen in Abwässern über Ozonierung und Photokatalyse genutzt werden kann. Dabei wird u. a. ein Ozonierungsreaktor zur effizienten Einbringung von Ozon ins Abwasser entwickelt. Das System wird unter Realbedingungen getestet werden.

Das BMBF-Projekt **InReUse** (FKZ 67EXI6005A) setzt in Kooperation mit einem vietnamesischen Partner auf die Implementierung eines integrierten Membranbioreaktor- und Umkehrosmosesystems (MBR-RO), um Abwasser aus der Textilindustrie, der Galvanik, der Metallverarbeitung und der Pestizidproduktion effizient und platzsparend aufzubereiten und so wiederverwenden zu können. Dadurch wird einerseits mehr Wasser verfügbar und andererseits die Einleitung von verschmutztem Industrierwasser in Gewässer verringert.

In einem vom BMWK geförderten IGF-Projekt (FKZ 01IF22353N, 20445 N) wurde eine neuartige elektrochemische Zelle zum Abbau von halogenierten organischen Schadstoffen aus Ab- und Prozesswasser entwickelt. In der Zelle sind kohlenstoffnanoröhrchen-basierte Mikroelektroden (CMT) von bordotierten Diamant-Streckmetallelektroden in einer Sandwich-Struktur umschlossen. Die CMTs fungierten durch ihre mikroporöse Oberfläche sowohl als Adsorber, als auch als

Kathodenmaterial, an dem durch Sauerstoffreduktion elektrochemisch Wasserstoffperoxid hergestellt werden konnte. In einem zweistufigen Prozess aus Adsorption und Desorption zur Aufkonzentrierung mit anschließender Mineralisierung konnte gezeigt werden, dass die besonders schwer abbaubaren Modell-Schadstoffe Natriumdiatrizoat und Ammoniumperfluorooctanoat an den BDD-Elektroden vollständig mineralisiert wurden. Die CMTs erwiesen sich dabei als gute Gasdiffusionselektroden für die Wasserstoffperoxid-Produktion.

Zum **Abbau von organischen Schadstoffen durch elektrogenerierte Persulfate** erstellten Divyapriya et al. 2021⁴ eine Übersicht der fundamentalen Mechanismen der Aktivierung der Persulfate durch Diamantanoden sowie der Anwendungen in der Umwelttechnik. Dargestellt wurden u. a. die Bedeutung der Eigenschaften der BDD-Elektrode wie z. B. das Kohlenstoff-sp³/sp²-Verhältnis, die Dotierung und das Substratmaterial sowie der Einfluss des Elektrolytmediums, der Stromdichte und des Vorhandenseins anderer anorganischer Ionen (Chlorid, Karbonat, Nitrat, Phosphat) auf die Elektroerzeugung reaktiver Sulfatspezies und deren Reaktivität. Zu dem Thema untersuchten außerdem Araújo et al. 2022⁵ die Eigenschaften der Oxidationslösung nach ihrer elektrochemischen Synthese. Elektrochemische Persulfate wurden in Bezug auf die Oxidationsleistung der Lösung in Abhängigkeit von der Lagertemperatur, der Lagerzeit und der Ex-situ-Anwendbarkeit bewertet. Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass die Lagertemperatur einen Einfluss auf die Lebensdauer der Lösungen hat.

Araújo et al. 2022⁶ veröffentlichten darüber hinaus eine neuartige dreidimensionale Diamantelektrode zur **Elektrogeneration von Persulfat**. Die Ergebnisse zeigten, dass Persulfat effizient an der Diamantelektrode erzeugt wurde, während das Ionenradikalsulfat im Vergleich zu anderen elektrokatalytischen Materialien, einschließlich Standard-Diamantelektrodenoberflächen, das wichtigste Oxidationsmittel an der Anode sein könnte.

Oliveira et al. 2022⁷ untersuchten **Membranfiltrationsprozesse** zur Abtrennung von CECs aus dem Kläranlagenablauf für die Nutzung zur Bewässerung. Die angewandte Nanofiltrationsbehandlung erzielte Entfernungsraten von über 98 % für die Gesamtbakterien und 99,99 % für alle untersuchten Resistenzgene.

Als alternativen Prozess untersuchten Bilea et al. 2024⁸ die **Plasmabehandlung von Wasser** mit organischen Schadstoffen für die Anwendung in der Bewässerung. Es wurde ein nicht-thermisches Plasma zur Oxidation der Schadstoffe eingesetzt. Ein schneller Abbau von Sulfamethoxazol mit Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten im Bereich von 0,21–0,49 min⁻¹ in Abhängigkeit von der Ausgangskonzentration wurde erreicht. Die wichtigsten reaktiven Spezies, die zum Abbau von Sulfamethoxazol und seinen Zwischenprodukten beitragen, waren Hydroxylradikale und Ozon.

⁴ Divyapriya, G.; Nidheesh, P. V. (2021): Electrochemically generated sulfate radicals by boron doped diamond and its environmental applications. In *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 25 (3), p. 100921. DOI: 10.1016/j.cossms.2021.100921.

⁵ Araújo, Karla C. F.; Silva, Karyn N. O.; Monteiro, Mayra K. S.; da Silva, Djalma R.; Quiroz, Marco A.; dos Santos, Elisama V.; Martínez-Huitle, Carlos A. (2022): Towards Use of Persulfate Electrogenerated at Boron Doped Diamond Electrodes as Ex-Situ Oxidation Approach: Storage and Service-Life Solution Parameters. In *J. Electrochem. Soc.* 169 (3), p. 33506. DOI: 10.1149/1945-7111/ac59f8.

⁶ Freitas Araújo, Karla Caroline de; Vieira dos Santos, Elisama; Pierpaoli, Mattia; Ficek, Mateusz; Santos, José Eudes L.; Martínez-Huitle, Carlos A.; Bogdanowicz, Robert (2022): Diamondized carbon nanoarchitectures as electrocatalytic material for sulfate-based oxidizing species electrogeneration. In *Electrochimica Acta* 430, p. 141069. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.141069.

⁷ Oliveira, Micaela; Leonardo, Inês Carvalho; Silva, Ana Filipa; Crespo, João Goulão; Nunes, Mónica; Crespo, Maria Teresa Barreto (2022): Nanofiltration as an Efficient Tertiary Wastewater Treatment: Elimination of Total Bacteria and Antibiotic Resistance Genes from the Discharged Effluent of a Full-Scale Wastewater Treatment Plant. In *Antibiotics (Basel, Switzerland)* 11 (5). DOI: 10.3390/antibiotics11050630.

⁸ Bilea, Florin; Bradu, Corina; Cicirma, Marius; Medvedovici, Andrei Valentin; Magureanu, Monica (2024): Plasma treatment of sulfamethoxazole contaminated water: Intermediate products, toxicity assessment and potential agricultural reuse. In *The Science of the total environment* 909, p. 168524. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168524.

6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

6.1 Peer-reviewte wissenschaftliche Zeitschriftenbeiträge

Castro, M. Pilar; Montiel, Miguel A.; Mena, Ismael F.; Gäbler, Jan; King, Hunter; Sáez, Cristina; Rodrigo, Manuel A. (2023): Outstanding productions of peroxymonosulfuric acid combining tailored electrode coating and 3D printing. In: *Journal of Water Process Engineering* 53, S. 103902. DOI: [10.1016/j.jwpe.2023.103902](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103902).

Castro, M. P.; Mena, I. F.; Montiel, M. A.; Gäbler, J.; Schäfer, L.; Sáez, C.; Rodrigo, M. A. (2023): Optimization of the electrolytic production of Caro's acid. Towards industrial production using diamond electrodes. In *Separation and Purification Technology* 320, p. 124118. DOI: [10.1016/j.seppur.2023.124118](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124118).

Castro, M. Pilar; Mena, Ismael F.; Sáez, Cristina; Rodrigo, Manuel A. (2024): Treatment of effluent from municipal wastewater treatment plants using electrochemically produced Caro's acid. In: *Journal of environmental management* 373, S. 123686. DOI: [10.1016/j.jenvman.2024.123686](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123686).

Castro, M. Pilar; Montiel, Miguel A.; Mena, Ismael F.; Gäbler, J.; Barton, D.; Sáez, Cristina; Rodrigo, Manuel A. (2024): Towards scaling up of the electrochemical production of Caro's acid: Electrode size and/or stacking? In *Chemical Engineering Journal*, p. 153870. DOI: [10.1016/j.cej.2024.153870](https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153870).

López-Vázquez, Javier; Santos, Carla S.; Montes, Rosa; Rodil, Rosario; Benito Quintana, José; Gäbler, J. et al. (2024): Insights into the application of the anodic oxidation process for the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water matrices. In: *Chemical Engineering Journal*, S. 148925. DOI: [10.1016/j.cej.2024.148925](https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148925).

Martín-Sómer, M.; Moreira, J.; Santos, Carla; Gomes, Ana I.; Moreno-SanSegundo, J.; Vilar, Vítor J.P.; Marugán, J. (2023): Reflector design for the optimization of photoactivated processes in tubular reactors for water treatment. In: *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11 (5), S. 110609. DOI: [10.1016/j.jece.2023.110609](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110609).

Rodrigues-Silva, Fernando; Santos, Carla S.; Marrero, Joaquín A.; Montes, Rosa; Quintana, José Benito; Rodil, Rosario et al. (2024): Continuous UV-C/H₂O₂ and UV-C/Chlorine applied to municipal secondary effluent and nanofiltration retentate: Removal of contaminants of emerging concern, ecotoxicity, and reuse potential. In: *Chemosphere* 361, S. 142355. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2024.142355](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142355).

Verlicchi, P.; Grillini, V.; Lacasa, E.; Archer, E.; Krzeminski, P.; Gomes, A. I. et al. (2023): Selection of indicator contaminants of emerging concern when reusing reclaimed water for irrigation – A proposed methodology. In: *The Science of the total environment* 873, S. 162359. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.162359](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162359).

Verlicchi, Paola; Lacasa, Engracia; Grillini, Vittoria (2023): Quantitative and qualitative approaches for CEC prioritization when reusing reclaimed water for irrigation needs – A critical review. In *The Science of the total environment* 900, p. 165735. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.165735](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165735).

6.2 Mündliche Konferenzbeiträge

Veranstaltung	Titel des Beitrages	Datum
XVI Young Science Symposium, Ciudad Real, Spain	Persulfates electrogeneration using BDD anodes and 3D-printed reactors	23.06.2023

Veranstaltung	Titel des Beitrages	Datum
10 th IWA Membrane Technology Conference & Exhibition for Water and Wastewater Treatment and Re-use, St. Louis, USA	Effectiveness of membrane filtration for removal of cell free antibiotic resistance genes from water and wastewater	26.07.2023
World Water Week (online)	Different Water Scenarios Afford Specific Technologies to Remove CECs	28.8.2024
World Water Week (online)	Exploitation & Implementation - Stakeholder Engagement & Transfer	28.8.2024
World Water Week (online)	Sustainable Electrochemical Reduction of contaminants of emerging concern and Pathogens in WWTP effluent for Irrigation of Crops - SERPIC	28.8.2024
Zukunftsplattform 24 - Die Dialogveranstaltung des Spurenstoffzentrums des Bundes, Berlin	Projekt SERPIC: Ressourcenschonende Technologie ermöglicht Wasserwiedernutzung in der Bewässerung	8.10.2024

6.3 Posterbeiträge

Veranstaltung	Titel des Beitrages	Datum
One Health in the 21 st Century 2021, Oslo, Norway	SERPIC	03.11.2021
3 rd Water JPI Conference, Mülheim/Ruhr, Germany	SERPIC	17.11.2021
XLII Meeting of the specialized group of electrochemistry of the RSEQ, Santander, Spain	Generación electroquímica de persulfatos utilizando ánodos de BDD en un reactor electroquímico adaptado mediante impresión 3D	06.07.2022
6 th conference on the Environmental Dimension of Antibiotic Resistance (EDAR6), Gothenburg, Sweden	Removal of cell free antibiotic resistance genes from water by membrane filtration and from membrane concentrate by 265 nm UV-LED	27.09.2022
X Jornadas Doctorales de la UCLM, Albacete, Spain	Reduction of CECs and ARB/ARG in wastewater from WWTP using electrochemically generated persulfate	25.11.2022
EA3G conference on ozone and advanced oxidation, Toulouse, France	Electrochemical production of persulfate with boron-doped diamond electrodes	28.11.2022
IOA World Congress 2023, Milan, Italy	Disinfection via electrogenerated ozone for wastewater reuse	04.07.2023
1 st Clausthal Conference on Circular Economy, Clausthal-Zellerfeld, Germany	Sustainable Electrochemical Reduction of contaminants of emerging concern and Pathogens in WWTP effluent for Irrigation of Crops	24.11.2023

6.4 Beiträge zu Monographien

Monographie	Titel des Beitrages	Datum
Funded Projects Booklet Joint Transnational Call 2020	SERPIC	29.09.2021

6.5 Beiträge zu Newslettern

Newsletter	Titel des Beitrages	Datum
AquaticPollutants e-newsletter, AquaticPollutants Newsletter #1	Selected target CECs steer the technological process chain development	28.04.2022
Nuova Ferrara, Local newspaper	Anche Unife studia possibili soluzioni: "La tecnologia aiuta a trovare rimedi"	20.06.2022
Resto del carlino, Local newspaper	Studio internazionale dell'Università: Progetto per usare acqua reflua ripulita grazie all'energia solare	20.06.2022
Estense.com, Local newspaper	Unife nel progetto internazionale per fronteggiare la scarsità d'acqua in agricoltura	20.06.2022

6.6 Webseiten und Videos

Webseite	Titel des Beitrages	Veröffentlichungsdatum
AquaticPollutants	SERPIC	06.10.2021
JPI AMR - SERPIC	SERPIC	06.10.2021
AdP (Águas de Portugal)	SERPIC	01.12.2021
SERPIC project website	SERPIC	16.12.2021
UNIFE news	Crisi idrica Unife partecipa a SERPIC, progetto europeo per il riciclo dell'acqua in agricoltura	20.06.2022
UNIFE Dep of Engineering	H2020-SERPIC: progetto europeo che vuole fornire una soluzione contro la siccità e la crisi idrica	20.06.2022
AquaticPollutants	SERPIC project develops a methodology how to select indicator CECs	21.07.2023
YouTube , channel of JPI Oceans	ERA-Net Cofund AquaticPollutants - Communication Activities SERPIC	7.8.2023

SERPIC Teilprojekt 1

Verwendungsnachweis

Sachbericht Teil III Erfolgskontrollbericht

Vorhabenbezeichnung:	AquaPol - Kooperationsprojekt SERPIC: Nachhaltige Reduzierung von Spurenstoffen und Krankheitserregern im Kläranlagenablauf mittels elektrochemischer Prozesse zur Bewässerung von Feldfrüchten, Teilprojekt 1
Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer-Gesellschaft e.V.: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Projektpartner:	SolarSpring GmbH, Germany (Teilnahme bis 1.6.2024) (SSP) Università degli Studi di Ferrara, Italien (UNIFE) Universidad de Castilla-La Mancha, Spanien (UCLM) Universidade do Porto, Portugal (UP) AdP VALOR, Serviços Ambientais, SA, Portugal (AdP) Norwegian Institute for Water Research, Norwegen (NIVA) Stellenbosch University, Südafrika (SU)
Förderkennzeichen:	02WAP1617A
Laufzeit des Vorhabens:	1.9.2021 bis 31.12.2024
Berichtszeitraum:	1.1.2024 – 31.12.2024
Autoren:	Dr.-Ing. Jan Gäbler (IST), Dr.-Ing. Joachim Koschikowski (ISE)
Erstellungsdatum:	6.2.2025
Vertraulichkeit:	Öffentlich

1 Ergebnisse

1.1 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

Das Ziel von SERPIC war es, CECs aus Kläranlagenabwässern durch die Entwicklung einer innovativen Behandlungstechnologie, basierend auf Membranfiltration und photonisch aktivierten elektrochemischen Prozessen, zu reduzieren.

Die separaten Prozesseinheiten und Komponenten wurden entworfen, aufgebaut und optimiert. Danach wurden alle getesteten Prozesseinheiten und Komponenten nach Ciudad Real, Spanien, an UCLM versendet, und wurden erfolgreich zur SERPIC-Prototypanlage zusammengesetzt.

Anschließend wurde die Prototypanlage in Feldtests für die Bewässerung evaluiert. Karotten und Kartoffeln wurden in Testbeeten gepflanzt und mit dem behandelten Wasser bewässert. Um die Leistung der Behandlungstechnologie zu bewerten, wurde das Produktwasser aus der Prototypanlage auf die CEC-Entfernungsraten hin analysiert. Insgesamt wurden die als Ziel gesetzten CEC-Entfernungsraten zu 92 % erreicht.

Für Detailergebnisse siehe Sachbericht Teil II sowie die Projektwebseite www.seric-project.eu.

1.2 Erreichte Nebenergebnisse

Es wurde eine Auswahlmethodik zur Auswahl von repräsentativen CEC-Zielanalyten entwickelt. Weiterhin hat die Nanofiltration sehr gute Ergebnisse zur Abtrennung der Schadstoffe aus dem Kläranlagenablauf gezeigt: Alle sechs ausgewählten Schadstoffe konnten unter den gesetzten Konzentrationswert reduziert werden. Damit besteht die Möglichkeit, kontinuierlich ein sehr sauberes Permeat zu erzeugen, das nicht nur für die Bewässerung verwendet werden kann, sondern auch in anderen Anwendungen, bei denen hochwertiges Wasser benötigt wird.

Die Desinfektion durch elektrochemisch hergestelltes Ozongas mithilfe von Diamantelektroden hat sich als energie- und kostensparende Alternative zur üblichen Gasozonierung bewiesen, bei der das Ozon aus flüssigem Sauerstoff oder Luft hergestellt wird.

Der SERPIC-Ansatz zum Abbau von kritischen Schadstoffen durch UV-aktivierte Oxidation mit Persulfat war ebenfalls sehr erfolgreich: Bei fünf der sechs ausgewählten Zielschadstoffen wurden die Abbauziele erreicht. Im Vergleich zur UV-C-Bestrahlung wurden eine wesentlich höhere Abbauleistung und eine kürzere Abbauzeit beobachtet. Bei der Produktion des Persulfats mit Diamantelektroden wurden die bislang erreichten Konzentrationen und Stromeffizienzen deutlich übertroffen.

1.3 Gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die Desinfektion durch elektrochemisch hergestelltes Ozongas gilt als vielversprechende Alternative zur Gasozonierung mit Ozon, das bislang aus flüssigem Sauerstoff hergestellt wird. Letzteres Verfahren benötigt viel Energie, so dass die elektrochemische Gaserzeugung das Potenzial hat, eine energie- und kostensparende Alternative zu werden. Darüber hinaus wäre diese Technologie technisch viel weniger komplex und damit ausfallsicherer und würde weniger Wartung erfordern. Außerdem würde kein flüssiger Sauerstoff als Verbrauchsmaterial benötigt, was für Regionen, in denen er nicht leicht verfügbar ist, einen großen Vorteil darstellen würde. Die Anwendung dieser Desinfektionsmethode beschränkt sich nicht nur auf die Desinfektion von Abwasser für die Bewässerung. In ähnlicher Weise könnte es z. B. zur Desinfektion bei der Trinkwassergewinnung eingesetzt werden.

Nanofiltration wird oft nicht als sinnvolle Technologie zur CEC-Minderung in Kläranlagen angesehen. Ein Grund, der genannt wird, ist, dass die CEC nicht abgebaut, sondern nur abgetrennt werden. Bisher gibt es keine guten Methoden, um das Retentat mit den konzentrierten CEC zu behandeln. Unsere Ergebnisse zeigen nicht nur eine sehr gute NF-Trennleistung, sondern SERPIC bietet auch eine neue Methode, um die CEC im Konzentrat auf sehr effiziente Weise abzubauen. Dies bietet neue Möglichkeiten für die Nanofiltration als zentrale CEC-Trennmethode. NF hat auch den Vorteil, dass kontinuierlich ein sehr sauberes Permeat entsteht, das nicht nur für die Bewässerung verwendet werden kann, sondern auch in anderen Anwendungen, bei denen hochwertiges Wasser benötigt wird, einschließlich der Industrie (Kühlung, Prozesswasser) und – mit einigen geringfügigen zusätzlichen Aufbereitungen – auch für Trinkwasser.

Eine Aufskalierung der SERPIC-Technologie auf die volle Kläranlagengröße würde eine Erhöhung der Durchflussrate um fünf Größenordnungen erfordern. Das bedarf enormer Weiterentwicklungen und Ressourcen. Einen besonderen Vorteil sehen wir allerdings auch für Anwendungen, die die Aufbereitung kleinerer Volumenströme erfordern, z. B. bei der dezentralen Abwasserbehandlung, wie z. B. in abgelegenen Orten oder ländlichen Gebieten, in denen kein Kanalisationssystem zur Verfügung steht. Eine Entwicklung von SERPIC bis TRL9 und damit eine reale Anwendung würde in kleinen Maßstäben entsprechend viel schneller gehen.

2 Fortschreibung des Verwertungsplans

2.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Da die Ergebnisse von SERPIC auf TRL5 basieren, ist viel Weiterentwicklung notwendig, bis die Technologie in der Praxis angewendet werden kann.

Die Zuverlässigkeit der Technologie hängt mit ihrer Eignung für kontinuierlichen Betrieb und ihrer Fähigkeit zusammen, die von nationalen und europäischen Vorschriften festgelegten Grenzwerte einzuhalten. Ein sinnvoller Weg für die weitere Entwicklung wäre eine Risikobewertung für Umwelt und menschliche Gesundheit, die gemäß den jüngsten EU-Richtlinien für das gesamte System (Behandlung, Lagerung und Endverwendung) durchgeführt werden sollte. Das würde auch die aktuellen präventiven Sicherheitsmaßnahmen des gesamten Prozesses bestätigen können.

Da seit Anfang 2025 europäische Grenzwerte in Kraft sind, müssen jetzt Kläranlagen zusätzliche Aufbereitungsprozesse installieren, um diese Grenzwerte für ihre Einleitung oder für die Bereitstellung von Wasser zur Wiederverwendung einzuhalten. Hersteller von Wasseraufbereitungsanlagen sollten dies als sinnvollen Markt betrachten und entsprechende Wasseraufbereitungsprodukte auf Basis der aufskalierten SERPIC-Technologie entwickeln. Schließlich können Kläranlagen in diese Produkte investieren, sie installieren und in Betrieb nehmen.

Es sind im Berichtszeitraum keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen durch das Konsortium erfolgt.

2.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Ergebnisse des SERPIC-Projekts wurden dahingegen bewertet, welche Empfehlungen den nationalen und europäischen politischen Entscheidungsträgern für die Aktualisierung von Richtlinien in Bezug auf die Abwasserbehandlung und die Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser sowie für zukünftige Standards in Bezug auf organische und mikrobielle CECs gegeben werden können. Als relevante Projektergebnisse wurde identifiziert: die Entwicklung *(i)* einer Methodik zur Auswahl relevanter organischer und mikrobieller KEK für Überwachungspläne, *(ii)* die SERPIC-Technologie als Alternative zu herkömmlichen Aufbereitungsmethoden (z. B. Tiefenfiltration und UV-Desinfektion), die in der Lage ist, ein Produktwasser zu gewährleisten, das den Standards für eine direkte Wiederverwendung entspricht (wie z. B. in der Europäischen Verordnung 2020/741 festgelegt), *(iii)* eine Methodik für die Risikobewertung der entwickelten Technologie im Hinblick auf die Umsetzung des erforderlichen Risikomanagementplans für die Wasserwiederverwendung und *(iv)* eine Technologie für die vierte Reinigungsstufe als Alternative zu den bekannten und bereits umgesetzten (Ozonung und granuliert Aktivkohlefiltration) für die Entfernung von CECs aus dem Wasser vor der Einleitung Oberflächengewässer.

2.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die SERPIC-Technologie hat bewiesen, dass die CEC-Reduzierungsraten sehr zufriedenstellend und vielversprechend sind. Der wichtigste Schritt für die weitere Entwicklung ist es, die Technologie zu skalieren und zu zeigen, dass sie auch bei höheren Volumenströmen gut funktioniert. Die SERPIC-Prototypenanlage hatte einen Volumenstrom von 34 Litern pro Stunde. Eine mittelgroße Kläranlage hat einen Volumenstrom im Bereich von 1000 Kubikmetern pro Stunde. Das bedeutet, dass die Technologie für den Einsatz in Kläranlagen um fünf Größenordnungen skaliert werden muss. Dies kann nur in mehreren Schritten umgesetzt werden. Der erste Schritt wäre die Skalierung auf Demonstrator-Niveau mit einem Volumenstrom von ca. einem Kubikmeter pro Stunde (1000 Liter). Dies könnte durch ein weiteres gefördertes Projekt mit Beteiligung von Maschinenbauern, wie z.B. Membranherstellern, Diamantelektrodenherstellern oder Herstellern von elektrochemischen Zellen, erreicht werden. Förderprogramme wie LIFE+, Horizon Europe oder Water4All könnten für diesen Schritt geeignet sein. Diese Förderprogramme bieten unter anderem ausreichend Hardware-Budget für den Aufbau in größerem Maßstab. Daher werden ERA-NETs höchstwahrscheinlich nicht geeignet sein, da sie in der Regel keine hohen Hardware-Budgets bieten. Erweist sich die Technologie auch bei der Reduzierung von CECs auf diesem Volumenstromlevel, können zuverlässigere Abschätzungen des Energiebedarfs und der Investitionskosten vorgenommen werden.

Damit wäre die Voraussetzung für den nächsten Schritt geschaffen: das Aufskalieren auf ein nahezu technisches Niveau von 100 Kubikmetern pro Stunde. Auf diesem Maßstab könnten nicht nur die Gerätehersteller, sondern auch die Kläranlagen bereit sein, sich zu beteiligen und die notwendigen Anforderungen und Randbedingungen in Bezug auf Energieeffizienz, Bezahlbarkeit und praktischen Betrieb zu schaffen. Als Förderprogramme könnten sich für diesen Schritt KIC oder die deutschen BMBF-Programme unter der Voraussetzung eignen, dass die notwendigen nicht-deutschen Partner eingebunden werden können.

3 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Der ursprünglich vorgesehene Einsatz von Photovoltaik für den Betrieb des Prototyps wurde nicht umgesetzt. Bei UCLM in Ciudad Real, wo der Prototyp aufgebaut wurde, war zwar ein PV-Modul vorhanden. Unerwarteterweise stellte sich jedoch heraus, dass sowohl der Wandler als auch die Batterie nicht in einem Zustand waren, der in diesem Forschungsprojekt verwendet werden konnte. Es stand kein Budget für die Anschaffung neuer Geräte zur Verfügung. Die SER-PIC-Technologie würde als zusätzlicher Reinigungsschritt auf dem Gelände von Kläranlagen eingesetzt. In der Regel verfügen Kläranlagen bereits über große Quellen regenerativer Energie, indem Biogas aus dem Schlamm der biologischen Reinigungsstufe über Verbrennungsmotor und Generator verstromt wird. Daher wird das Manko, bei diesem Projekt keine PV zu verwenden, als gering angesehen.

4 Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Die Kosten wurden gegenüber dem Ausgabenplan um 6.497,56 Euro überschritten.

Im Februar 2024 wurde im Konsortium entschieden, das Projekt um sechs Monate bis zum 31.12.2024 zu verlängern. Damit wurde es möglich, die Kosten für die Teilnahme am Final Review Meeting dem Projekt zu belasten sowie die geplanten Aktivitäten zu Veröffentlichungen und Verwertung gründlich vornehmen zu können. Alle Deliverable Reports wurden erstellt; der letzte Report wurde am 6.2.2025 fertiggestellt.