

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

CO₂-Reduktion in der Oxidation von Mikroverunreinigungen –
energieintensive Prozesse ersetzt durch neue Sonnenlicht-basierte
Prozesse

CatMemReac

in der Fördermaßnahme

Joint German-Israeli Water Technology Research Program

Autor(en)

Christiane Chaumette, Benjamin Wriedt
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
christiane.chaumette@igb.fraunhofer.de
benjamin.wriedt@igb.fraunhofer.de

Projektlaufzeit: 01.07.2021 – 30.06.2024

Erstellungsdatum: 28.02.2025

Projektpartner

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB / 02WIL1605

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI / 02WIL1605

Tel-Aviv University TAU / WT2003

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I Kurzfassung	3
I.1	Aufgabenstellung.....	3
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	3
I.3	Wesentliche Ergebnisse im Überblick	4
II.	Teil II Eingehende Darstellung	5
II.1	Motivation und Aufgabenstellung.....	5
II.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	5
II.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
II.4	Erzielte Ergebnisse.....	8
II.5	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	16
II.6	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	17
II.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	17
II.8	Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.	18

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Mikroverunreinigungen wie Hormone, Arzneimittel und Pestizidrückstände in Wassermatrizen stellen eine erhebliche Gefahr für die Umwelt und die menschliche Gesundheit dar. Die aktualisierte Richtlinie der Europäischen Union empfiehlt nun eine quaternäre Behandlung in Kläranlagen, um Mikroverunreinigungen zu beseitigen, die mit herkömmlichen Verfahren nicht entfernt werden können. Ziel der Forschung war die Entwicklung eines photokatalytischen Reaktors (PCR) zum Abbau von Mikroverunreinigungen in Wasser durch Immobilisierung eines Katalysators auf Nickelschaum mit einer Porengröße von 200-600 µm und dessen Integration in den Reaktor. In einer Lebenszyklusanalyse (LCA) werden die Umweltauswirkungen der entwickelten und getesteten Labor- und Pilotanlage bewertet und mit vorausblickender LCA der industrielle Vollmaßstab abgeschätzt, wobei Parameter der Technologiereife-Stufe 9 (TRL-9) simuliert werden.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Photokatalytische Membranreaktoren (PMR) nutzen Photonenenergie, Katalysatoren und Trägermembranen, um Hydroxylradikale zu bilden (sog. Advanced Oxidation Processes, AOP), die Mikroverunreinigungen mineralisieren. Diese Forschungsarbeit fokussiert sich auf die Entwicklung eines solchen CatMemReac-Reaktors, der nachfolgend im Labor- und Pilotmaßstab für den CBZ-Abbau getestet wurde. Ein neuartiges Merkmal dieses Reaktors ist die Verwendung von Nickelschaum, einem hochporösen, robusten und kostengünstigen Substrat, das mit elektrisch leitfähigen, relativ preiswerten und sehr robusten Nanopartikeln beschichtet ist. U.a. durch den Einsatz von Hochleistungs-LEDs soll der Energie- und Kohlenstoff-Fußabdruck des Reaktors im Vergleich zu Alternativtechnologien wie Ozonierung und Adsorption verringert werden.

Die hohe elektrische Leitfähigkeit des Schaums ermöglicht eine Beschichtung durch elektrophoretische Abscheidung (EPD). Nach einer Verfahrensoptimierung wurde der mit kommerziellem TiO₂ beschichtete Ni-Schaum durch XRD, SEM-EDS, XPS, ESR, DRS, Zetapotenzial, und Permeabilität charakterisiert, und im Reaktor mit UV-A-LEDs (365 nm) bestrahlt.

Carbamazepin (CBZ) wurde als Prüfschadstoff ausgewählt und seine Elimination mittels HPLC-MS quantifiziert. In Experimenten wurden die Entfernung und die Energieeffizienz optimiert, indem Durchflussraten, Bestrahlungsintensitäten, Expositionszeiten, pH-Werte und Wellenlängen systematisch untersucht wurden. Mit CBZ versetzte Abwässer wurden getestet, um die Elimination zu bewerten und die reaktionstechnischen Parameter zu charakterisieren (WP2). Methyleneblau wurde für Literaturvergleiche und verfahrenstechnische Anwendungen wie die Online-Kinetikmessung verwendet. Wichtige Messinstrumente wie Aktinometrie, Nachweis freier Radikale (Fängerpotenzial) und Verweilzeitverteilung wurden an das System angepasst, um vor dem Scale-Up die Leistungskennzahlen zu bestimmen. Die Übertragbarkeit wurde anhand zweier Röntgenkontrastmittel als exemplarische Zielschadstoffe in unterschiedlichen Wassermatrizen validiert. Das Abwasser, das aus der deutschen Kläranlage Bösau nach der dritten Behandlungsstufe stammt, simulierte die mögliche Anwendung von CatMemReac als vierte Reinigungsstufe. Unter optimalen Bedingungen wurde eine maximale Entfernungsrates von 787 nmol L⁻¹ s⁻¹ Entfernung (WP2, 3 und 4) erreicht.

Um die Sonne direkter als über PV nutzen zu können, wurde ein Reaktor für sichtbares Licht im Labormaßstab entworfen und gebaut. Der Betrieb erfolgte mit flächigen, organischen LEDs (OLEDs), um Sonnenspektrum und -geometrie im Labor nachzustellen. Die Ergebnisse wurden durch eine reaktionstechnische Charakterisierung begleitet, um aussagekräftige Leistungskennzahlen für ein künftiges Scale-up zu ermitteln (WP3).

Die Aufskalierung des Reaktors und der EPD-Beschichtungszelle zum Pilotmaßstab erfolgte auf Grundlage der Laborerkenntnisse. Das System umfasst sechs Reaktoren mit jeweils 24,5 x 18 cm² TiO₂-Ni, die in Reihe oder in zwei Dreiergruppen konfiguriert werden können. Die Effizienz des Reaktors beim CBZ-Abbau wurde bei verschiedenen Durchflussraten, Wellenlängen und Wassermatrizen (DI,

Grundwasser, SAT, Abwasser) getestet, einschließlich niedrigerer CBZ-Konzentrationen, um reale Wasserquellen zu simulieren (WP 5+6).

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Mit den erhaltenen Daten wurde eine Ökobilanz der CatMemReac-Technologie nach ISO 14040-Standards durchgeführt, um ihr Treibhauspotenzial (GWP) für die Beseitigung von Mikroverunreinigungen abzuschätzen, insbesondere für CBZ. Als funktionelle Einheit der Bewertung wurde 1 m³ gewählt. Die Systemgrenze umfasste auch Betriebskomponenten wie Pumpen, Nickelschaum, EPD und LEDs. Die Ökobilanz wurde mit der Software OpenLCA 2.0.0 und der Ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent 3.9.1) durchgeführt. Das Lebenszyklusinventar wurde individuell entwickelt, während die Hintergrunddaten aus der Ecoinvent-Datenbank übernommen wurden. Das Hintergrunddateninventar wurde anhand von Literatur und Patenten entwickelt. Die Auswirkungen auf den Lebenszyklus wurden mit Hilfe von ReCiPe 2016 v1.03 ermittelt, einem Mid-Point-Ansatz, der IPCC-Modelle für Faktoren zur Charakterisierung des globalen Erwärmungspotenzials verwendet. Die GWP-Schätzungen für die Labor- und Pilotversuche bei 1000 ppb CBZ-Konzentrationen betragen 3492,03 kgCO₂eq/m³ bzw. 86,53 kgCO₂eq/m³. Ähnliche signifikante Unterschiede wurden für die CBZ-Konzentrationen von 20 ppb und 5 ppb festgestellt, letzterer erzielte für die Pilotanlage den insgesamt niedrigsten Wert von 15,85 kgCO₂eq/m³. Der Stromverbrauch trug zu 99 % des gesamten GWP bei, wobei hauptsächlich Kühler, LEDs, Pumpen und Sensoren mit 33 %, 29 %, 23 % bzw. 15 % ins Gewicht fallen. Die Bestands- und Verbrauchsmaterialien in der Nickelschaum- und EPD-Anlage sind zu vernachlässigen. Um die Leistungsfähigkeit des Reaktors langfristig zu erhalten, wurde ein Szenario mit einer Spülung mit H₂O₂ alle 40 Zyklen modelliert. Um die Robustheit der LCA-Ergebnisse zu verbessern, wurde die Unsicherheitsbewertung auch mit dem Monte-Carlo-Simulationsansatz durchgeführt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse für den Labor- und Pilotmaßstab wurde zudem eine vorausschauende Ökobilanz für den großtechnischen Prozess erstellt. Zukünftige Rahmenparameter für den industriellen Maßstab wurden durch Interviews und Workshops mit dem Team der Technologieentwickler sowie durch Interviews mit externen Experten erarbeitet. Die prospektive Ökobilanz errechnete ein GWP von 2,2 kgCO₂eq/m³ für das Best-Case-Szenario im industriellen Maßstab der CatMemReac-Technologie.

Bereits ohne die in den kommenden Jahren zu erwartenden materialtechnischen Verbesserungen zeigt der CatMemReac-Reaktor im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren nur leicht höhere Treibhausgasemissionen. Somit ist ein Einsatz der Technologie für die dezentrale Behandlung zur Wasserreinigung und -wiederverwendung zu empfehlen, sobald das unausgeschöpfte Potenzial zur Effizienzsteigerung etwa um den Faktor 8 erhöht wird. Bereits vorher sind Vorteile bei der Skalierbarkeit von Betriebsbedingungen und Handhabung zu berücksichtigen, die konkurrierende Technologien wie die Ozonierung behindern.

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Vorsorglich und aufgrund neuer Grenzwerte für Mikroschadstoffe werden derzeit zahlreiche Kläranlagen um eine sogenannte vierte Reinigungsstufe erweitert. Dabei werden nach der mechanischen, biologischen und chemischen Behandlung die verbleibenden Reste von Medikamenten, Pestiziden oder Industriechemikalien entfernt. Die aktuell überwiegend eingesetzten Verfahren Ozonierung und Aktivkohleadsorption sind jedoch energieintensiv. Eine potenziell energieeffizientere Methode mit reduziertem CO₂-Fußabdruck stellt die Sonnenlicht-getriebene photokatalytische Schadstoffoxidation dar. Im Rahmen von CatMemReac soll daher eine Wassertechnologie zur Entfernung von organischen Spurenstoffen oder Mikroverunreinigungen (OMPs) aus Wasser (Abwasser/Grundwasser) durch einen solar-photokatalytischen Membranreaktor (CatMemReac) weiterentwickelt und demonstriert werden.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Die Eruierung des technischen Stands zu Beginn des Vorhabens war Teil des Projekts. So wurde ein Überblick über die gesetzlich festgelegten Zielparameter für Kläranlagen in Deutschland und Israel im WP1-Bericht erstellt. Zusätzlich wurde die progressive Schweizer Gesetzgebung als Vergleich hinzugezogen. Des Weiteren wurde der Energiebedarf der konkurrierenden Technologien Ozon (0.045 – 0.2 kWh m⁻³) und Aktivkohle (0.01 – 0.08 kWh m⁻³) bestimmt.

Zum systematischen Verständnis des photokatalytischen Prozesses und möglichen Verbesserungen wurden ein R&I-Diagramm sowie ein Flow-Diagramm erstellt. Das Flow-Diagramm ermöglicht im Rahmen des LCA eine zielgenaue Literaturrecherche hinsichtlich der als Schlüsselparameter gewählten CO₂-Bilanzierung, die beim Vergleich der neu entwickelten Technologie mit bestehenden Methoden essentiell ist.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Um die die Meilensteine 2 und 3 zu erfüllen, wurde in enger Absprache zwischen Mitgliedern des IGB sowie Mitgliedern der TAU ein Photoreaktor im Labormaßstab (0,1 L bei einer Flussrate von 6 L/h) designt. Während sich die TAU auf Katalysatorproduktion und -entwicklung, Membranbeschichtung und Implementierung der Strahlungsquelle fokussierte, bereitete das IGB einen Plan für die systematische Untersuchung des Photoreaktors auf multifaktorielle Einflussgrößen vor, beschaffte den keramischen Katalysatorträger und entwickelte das grundlegende Integrationsschema.

Zur Bewertung der Einflussfaktoren wurde zunächst der Abbaugrad von Carbamazepin festgelegt. Anhand dieses Zielparameters können die optimale Parameterkombination und auch gekoppelte Einflüsse auf die Abbauraten identifiziert werden, um im Zuge des Scale-Up durch systematische Anpassung eine maximale Effizienz des Photoreaktors zu erreichen.

Weiterhin wurden am IGB Studien zur Ermittlung von Skalierungskennzahlen und Designregeln für das Scale-up durchgeführt (WP3). Mittels Aktinometrie-Experimenten wurde eine externe photonische Gesamteffizienz von 15,7 % für den Aufbau im Labormaßstab ermittelt. Aus dieser Einkopplungsrate konnte der spezifische Photonenbedarf für die erreichten Leistungsmerkmale unabhängig von der Skalierung abgeleitet werden. Dies ermöglichte beim Scale-up die wechselseitige Abstimmung von Rahmenkenngrößen wie der Dimensionierung der beschichteten Ni-Schaumoberfläche, der Schichtdicke des zu behandelnden Wasserstroms und der Bestrahlungsleistung.

Zum Test der Übertragbarkeit anhand realer Behandlungsanforderungen wurden am IGB Versuche zum Abbau von Methylenblau und zwei verschiedenen Röntgenkontrastmitteln (Iohexol und Iopamidol) als Benchmarktests durchgeführt. Der Abbau der Röntgenkontrastmittel wurden jeweils in Trinkwasser, destilliertem Wasser und Abwasser (nach der dritten Reinigungsstufe) sowie unter verschiedenen Bestrahlungsintensitäten (11 mW/cm² und 26 mW/cm²) und Bestrahlungsdauern (21,4 min, 8,5 min und 3,2 min) untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Komplexität der Wassermatrix die Abbauraten der Röntgenkontrastmittel überproportional zurückgehen. Mit

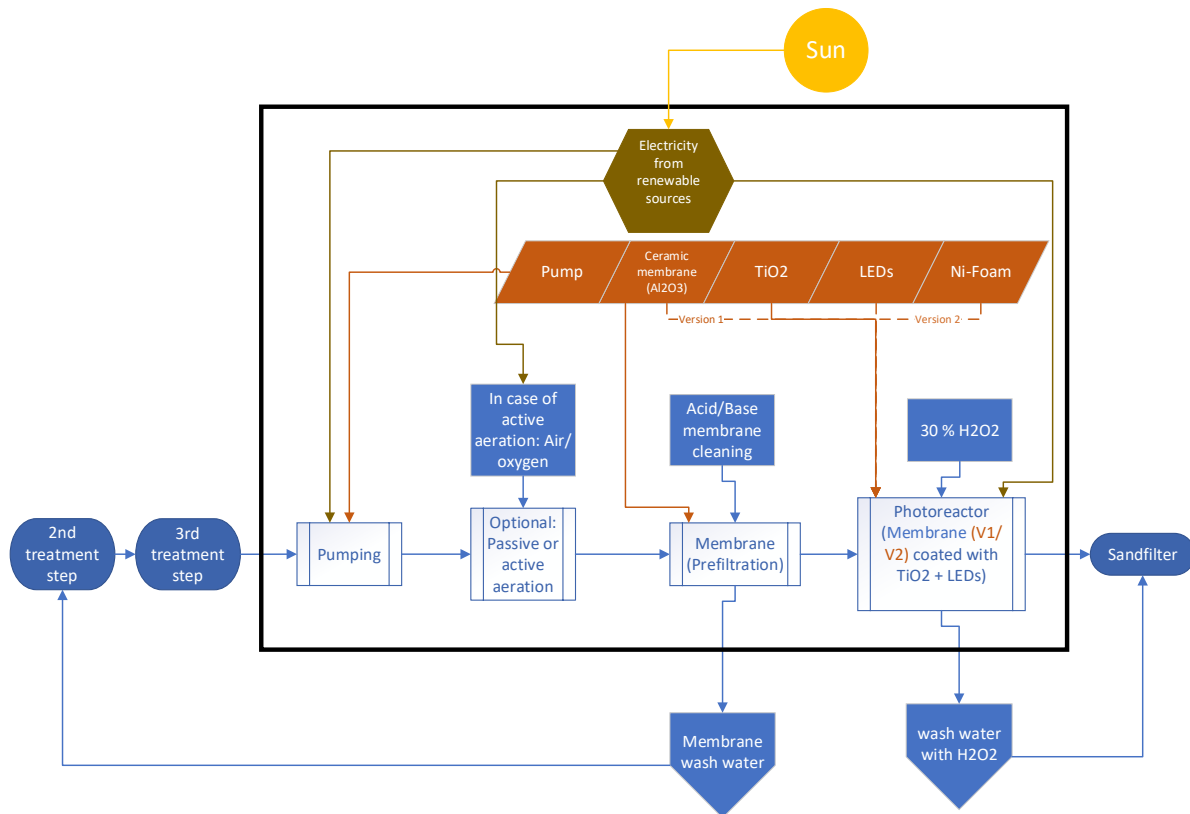


Abbildung 1: Integration des katalytischen Membranreaktors in das Fließdiagramm einer Kläranlage.

zunehmender Bestrahlungsdauer und Zeit steigt die Abbaurrate linear an, solange die Reaktion photonenlimitiert ist. Zudem wurde festgestellt, dass sich Iohexol wesentlich besser durch Photokatalyse abbauen lässt als Iopamidol (relative Differenz >55 %).

Bei den Abbaueversuchen zu Methylenblau wurden verschiedene Membranen (Ni-Schaum, PVDF, Keramik) sowie unterschiedliche Bestrahlungsintensitäten (8 mW/cm^2 , $16,3 \text{ mW/cm}^2$, 25 mW/cm^2) und Durchflussraten ($0,025 \text{ l/h}$, $0,07 \text{ l/h}$, $0,15 \text{ l/h}$, $0,28 \text{ l/h}$) untersucht. Der Ni-Schaum zeigte dabei keinen Rückgang der Leistungsfähigkeit durch Adsorption von Methylenblau. Dies unterstreicht die Wertigkeit dieser Auswahl entsprechend des Antrags. Die Keramikmembran konnte aufgrund der sehr starken Adsorption des Methylenblaus an die Membran unabhängig von weiteren äußeren Parametern nicht aussagekräftig vermessen werden. Auch die Membran aus PVDF zeigte Verfärbungen aufgrund von Adsorption, und obwohl diese weniger stark als bei der Membran aus Keramik war, trat auch hier eine signifikante Leistungsminderung von über 50% nach wenigen Stunden auf.

Die effektivste Durchflussrate für diesen Reaktoraufbau wurde mit $0,07 \text{ l/h}$ ermittelt. Bei dieser Rate liegt der Gesamtentfernungswert mit 54 % weit über den erreichten Werten mit anderen Durchflussraten. Deswegen wurde diese Durchflussrate für die Versuche mit unterschiedlichen Strahlungsintensitäten verwendet. Die höchste Abbaurrate wurde bei 25 mW/cm^2 festgestellt. Dies entspricht der größtmöglichen Intensität welche bei diesem Aufbau angewendet werden kann. Eine Steigerung der Abbaurrate durch Erhöhung der Strahlungsintensität ist somit möglich, da noch keine Photonlimitierung erreicht wurde.

An der TAU wurde währenddessen eine Zielparameterstudie mit dem Modellschadstoff Carbamazepin im Laborreaktor durchgeführt, um die Erkenntnisse ins Upscaling einfließen lassen zu können (WP4). Dazu wurde die höchste Abbaurrate in Abhängigkeit von der einfallenden Strahlung, der Durchflussrate und der Wellenlänge der LEDs bestimmt. Ab einer Bestrahlung mit 20 W ist ein Rückgang des Abbaus zu beobachten, und eine weitere Erhöhung erhöht die Abbaurrate tritt auch bei stärkeren Intensitäten nicht mehr auf. Die Flussrate beeinflusst sowohl den Stofftransport als auch die Retentionszeit. Bei 6 l/h (Bestrahlzeit ca. $4,5 \text{ min}$) konnte der maximale Abbaugrad für Carbamazepin im Laborreaktor

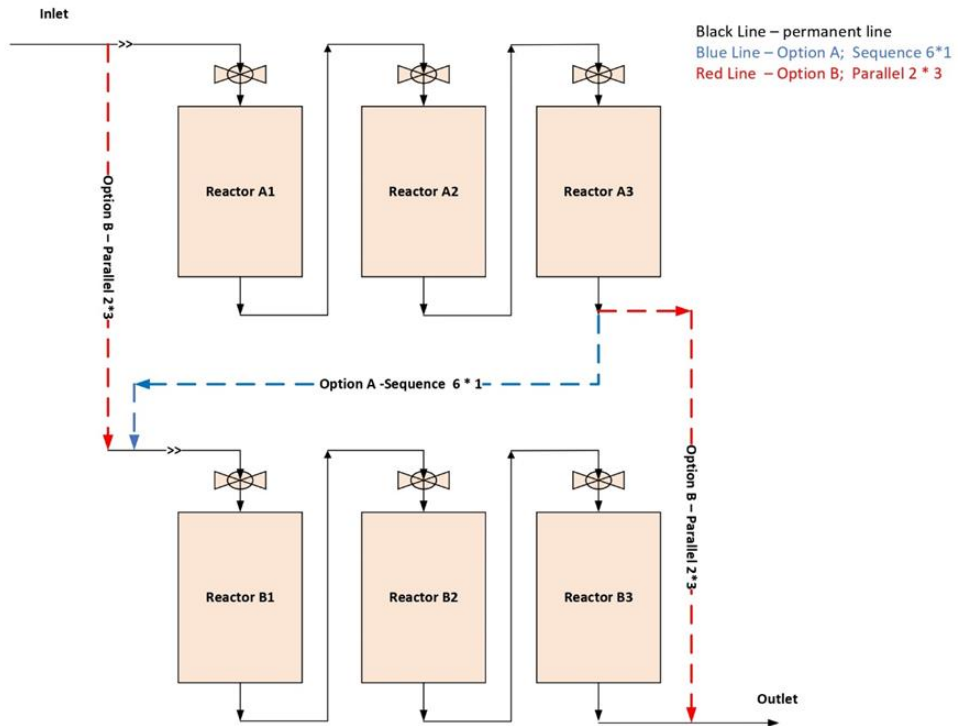
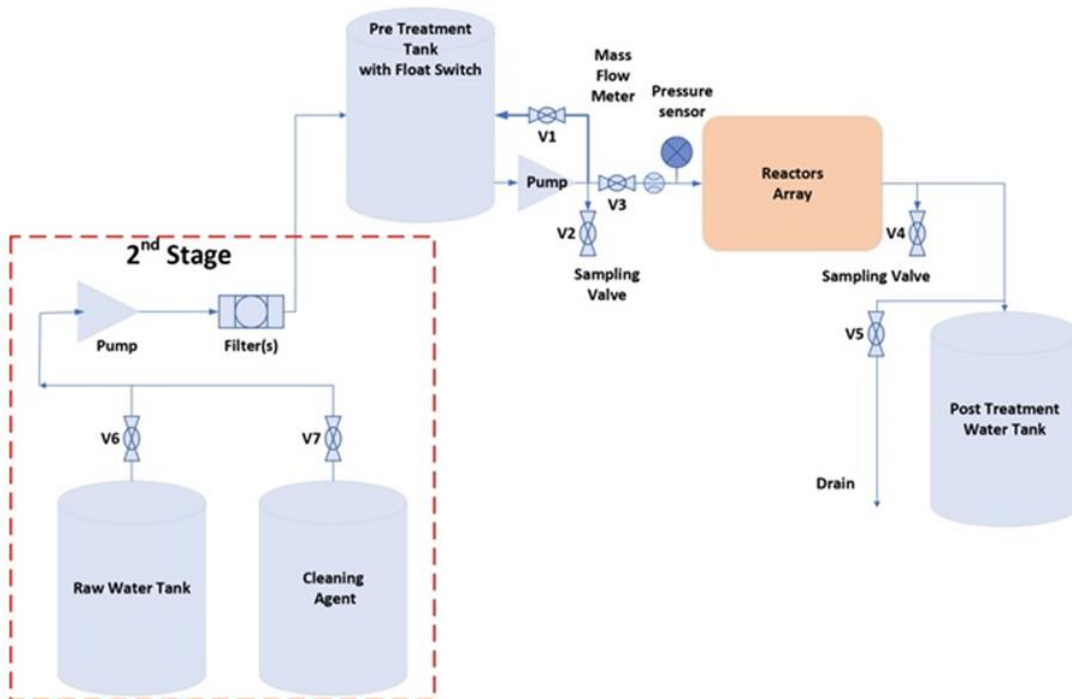


Abbildung 2: Reaktorkonfigurationsbeispiel, eine Reihe von 6 Reaktoren in Reihe geschaltet (blau) und zwei parallele Reihen von je 3 Reaktoren (rot).



An

Abbildung 3: Allgemeines Verfahrensschema in der PCR. Vorbehandlungstank mit Schwimmerschalter, Pumpe mit Wasserzirkulationsoption, Druck- und Durchflusssensoren, Reaktorordnung und Nachbehandlungwassertank. Die zweite Stufe bezieht sich auf die Filtrations-/Sorptionsprozesse zur Vorbehandlung komplexer Wassermatrizen.

festgestellt werden, sodass hier die Photonenlimitierung in eine Massentransportlimitierung übergeht. Bei den Versuchen zu den verschiedenen Wellenlängen wurden drei unterschiedliche LEDs (365 nm, 385 nm und 405 nm) bei optimalem pH-Wert und Durchflussrate getestet. Wie zu erwarten konnte bei einer Wellenlänge von 365 nm die beste Abbaurrate festgestellt werden, da diese am nächsten zum Absorptionsmaximum von TiO₂ bei ca. 350 nm liegt.

II.4 Erzielte Ergebnisse

Basierend auf den Ergebnissen des Laborreaktors wurde ein modularer Großreaktor entworfen und hergestellt (WP5). Dieser besteht aus 6 Einheiten mit je 441 cm² und kann im Durch- oder Kreislauf betrieben werden (Abbildung 2). Zusätzlich wird der Wasserdurchfluss bzw. Druckverlust durch einen Durchflussmesser und ein Manometer überwacht. Wasserqualitätssensoren liefern Echtzeit-Daten über die Qualität des aufbereiteten Wassers. Über einen Stromzähler wird der Gesamtverbrauch aufgezeichnet (Abbildung 3). Zusätzlich wurde eine große EPD-Zelle entwickelt und hergestellt, um die Beschichtung von Metallschäumen zu ermöglichen, die den Abmessungen der hochskalierten Reaktormodule entsprechen. Sie decken etwa das 50-fache der Fläche ab, die für den Reaktor im Labormaßstab verwendet wird. Die Zelle hat (Innen-)Abmessungen von 29 x 20 x 2,5 cm³, was der minimalen Größe für die erforderliche Elektrodengröße entspricht. Dafür wurde der EPD-Prozess neu geplant und umgebaut, um Abfall zu reduzieren und das Recycling von Materialien zu ermöglichen. Ab voraussichtlich Mai können im Demonstrator Langzeitversuche mit Realabwasser gemäß WP 6 durchgeführt werden, um den Meilenstein M5 zu erreichen.

Die erste Phase des LCA wurde abgeschlossen und die Definition von Ziel und Umfang bestimmt (WP7). Außerdem wurden die Systemgrenzen und die funktionelle Einheit (1 m³) festgelegt. Durch implementierte Sonden konnte begonnen werden, kontinuierliche Messdaten des Demonstrators als elementare Basisgrößen für das globale LCA in Phase 2 aufzuzeichnen (Teil von WP8). Die Methoden für die Phasen drei (Modellierung der Auswirkungen des Lebenszyklus) und vier (Interpretation der Auswirkungen) des LCA als weiterer Bestandteil des WP8 wurden mit Beispieldaten getestet und verfeinert.

Die in WP2 von der TAU und in WP3 vom IGB ermittelten effizientesten Katalysatorbeschichtungen und Betriebsbedingungen für die Kombination von Titandioxid-beschichteten Nickelschäumen flossen bereits in die Konzeption und den Bau der Pilotanlage in Israel ein (WP5). Parallel zur Implementierung und dem vor-Ort-Betrieb durch die TAU wurden am IGB weitere Experimente durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des entwickelten Reaktorsystems unvoreingenommen und verfahrensübergreifend zu bewerten und verbliebene Optimierungspotenziale zu identifizieren.

So wurden fortführend in WP3 reaktionstechnische Untersuchungen am bestehenden Testsystem 1 (1L/h) vorgenommen. Die Berechnung reaktionstechnischer Kennzahlen ist entscheidend für einen aussagekräftigen Vergleich verschiedener Behandlungsmethoden und ein entscheidender Faktor für die Auslegung im anschließenden Scale-up-Prozess. Notwendige Werkzeuge zum Verständnis und zur systematischen Optimierung photokatalytischer Prozesse sind die Aktinometrie (s. Zwischenbericht 2022), die Bestimmung des Oxidationspotentials durch freie Radikale (Kapitel 1.1) und die Verweilzeitverteilung während des Schadstoffabbaus (Kapitel 1.2). Abgeleitet aus diesen Ergebnissen können limitierende Faktoren der Leistungsfähigkeit identifiziert werden, um das verbleibende Optimierungspotenzial der untersuchten Technologie präzise aufzuzeigen und zu quantifizieren Kapitel 1.3).

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde unterstützend für die TAU im WP4 alternative Materialien und Beschichtungen in einem neu entworfenen Reaktorkonzept getestet, das speziell auf sichtbares Licht und einen möglichen Betrieb mit Sonnenlicht ausgelegt ist (Kapitel 1.4). Literaturbekannte Katalysatoren wurden am IGB präpariert und mit unterschiedlichen Methoden auf den bereits verwendeten Nickelschaumträger sowie eine 3D-gedruckte Struktur aufgebracht (Kapitel 1.5). Zusätzlich zu Abbauversuchen verschiedener Farbstoffe wurden äquivalent zum Testsystem 1 die reaktionstechnischen Untersuchungen zur Aktinometrie Kapitel 1.6) und Verweilzeitverteilung (Kapitel 1.7) durchgeführt. Da das Reaktorkonzept eine atmosphärenoffene Wanne beinhaltet, konnte die

sauerstoffempfindliche Messung der OH-Radikale bisher noch nicht durchgeführt werden.

Basierend auf den Labordaten des IGB und der TAU wurden in mehreren online-Gesprächen die nicht rein messdatenbasierten Informationen für die prospektive Umweltbewertung (WP7) zusammengestellt, um die Treibhausgasemissionen für TRL 9 abzuschätzen (Kapitel 1.8). Damit wurde die Datengrundlage geschaffen, um am Projektende eine valide Bewertung vornehmen zu können.

Eine Fortführung des WP3 über die geplante Laufzeit hinaus wurde vorgenommen, um die Skalierung und den Test im Pilotmaßstab noch während der detaillierten Konzeption mit weiteren Erkenntnissen erheblich unterstützen und verbessern zu können. Dies umfasste eine umfängliche reaktionstechnische Charakterisierung anhand selbstetablierter Anpassungsmethoden der Standardmethoden an individuelle Reaktor Anforderungen sowie eine Vorbereitung der Übertragung der Erkenntnisse aus Reaktorbetrieb und LCA auf eine direkt solarbetriebene Anlage.

Um zunächst die OH-Radikalkonzentration des katalytischen Membranreaktors zu messen, wurde die literaturbeschriebene Methode zur photometrischen Quantifizierung der OH-Radikale an die intensivierten Bedingungen im neuentwickelten Reaktoraufbau angepasst. Dazu wird die Indikatorsubstanz para-Chlorbenzoesäure (pCBA) verwendet. Die Methode, die normalerweise durch zeitverzögerte HPLC-MS/MS überwacht wird, wurde so modifiziert, dass sie sowohl in-situ-Daten unter Verwendung der UV/Vis-Spektroskopie zur kontinuierlichen Bestimmung der Konzentration mit einer Durchflussmesszelle als auch Daten in einer regelmäßig entnommenen Probe liefert, die zeitaufgelöst mittels eines UV/Vis-Spektrometers ausgewertet werden können. Die niedrigsten OH-Radikalbildungsraten werden beim niedrigsten Volumenstrom gemessen (siehe Abbildung 4). Bei der Messung mit dem Photospektrometer sind dies $0,3 \text{ nmol s}^{-1}$ bei $0,53 \text{ mL min}^{-1}$. Mit zunehmendem Volumenstrom von $3,46 \text{ nmol s}^{-1}$ steigt die Abbaurrate um etwa 42 % auf $0,7 \text{ nmol s}^{-1}$. Die starke Abhängigkeit des Umsatzes vom Volumenstrom war erwartungsgemäß, da sie auf die Diffusionsbegrenzung im Reaktor und die Bildung von Kurzschlussströmen und Totzonen zurückzuführen ist.

Die Messung der Verweilzeitverteilung im Reaktor zeigte die Bildung von Kurzschlussströmungen und Totzonen, insbesondere bei geringen Volumenströmen. Die mittlere tatsächliche Verweilzeit weicht bis

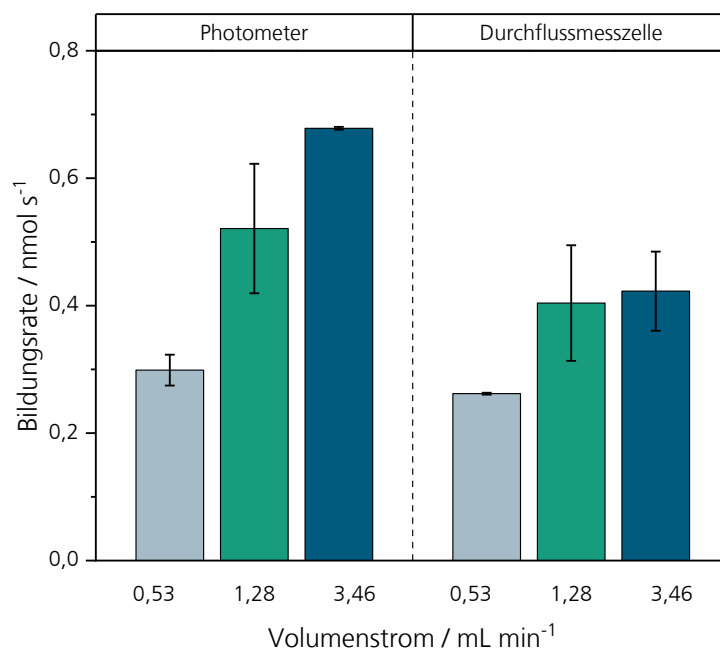


Abbildung 4: Bildungsrate von OH-Radikalen in Abhängigkeit vom Volumenstrom, gemessen sowohl im Photometer als auch in der Durchflusszelle.

zu 48 % von der hydrodynamischen Verweilzeit ab. Dieses Strömungsverhalten führt zu einer reduzierten Effizienz des Abbaus und der nutzbaren Katalysatoroberfläche pro Zeitintervall. Der Vergleich zu einem aktualisierten Reaktormodell wird in einem folgenden Abschnitt diskutiert. Durch die Methodenentwicklung zur Quantifizierung der gebildeten Radikale kann eine ganzheitliche, prozessschrittaufgelöste Betrachtung der limitierenden Faktoren erfolgen. Um die größten Einflüsse auf die Effizienz und die Limitierungen des Reaktoraufbaus zu visualisieren, wurde ein Sankey-Diagramm der verschiedenen Reaktionsschritte des Schadstoffabbaus erstellt (Abbildung 5).

Es ist deutlich zu erkennen, dass der größte Teil der Effizienz schon beim Auftreffen des Photonenstroms von $1,19 \mu\text{mol s}^{-1}$ auf die Reaktoroberfläche verloren geht. Nur ca. 29 %, oder $0,34 \mu\text{mol s}^{-1}$ gelangen durch das Bestrahlfenster in den Reaktionsraum. Die anderen 71 % treffen auf den Rand des Reaktors und können nicht mit dem Katalysator reagieren. Der Photonenstrom, der in den Reaktor und auf den Katalysator gelangt, kann Hydroxylradikale generieren. Allerdings gibt es hierbei erhebliche Verluste. Mit der entwickelten Methode konnten Radikale gemessen werden, die entstanden sind und mit dem pCBA reagieren ($0,5 \text{ nmol s}^{-1}$). Demnach beträgt der Anteil der zur Bildung von OH-Radikalen genutzten Photonen weniger als 1% des Photonenstroms, der theoretisch im Reaktor zur Verfügung steht. Gründe dafür sind wie bereits erwähnt, die Bildung von unterschiedlichen Strömungs- und Totzonen, wodurch nicht alle gebildeten Radikale erfasst werden können. Auch die Qualität der Beschichtung des Katalysatorträgers und somit die zur Verfügung stehende Katalysatormenge können einen Einfluss auf die Bildungsrate haben.

Ein folgendes Aufgabenpaket konzentrierte sich auf die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in Richtung Photokatalyse, die durch sichtbares Licht initiiert wird. Die Photokatalyse mit sichtbarem Licht verspricht energieeffizienter zu sein als die traditionelle UV-basierte Photokatalyse, da die Photonen theoretisch nur die Hälfte der Energie besitzen, aber numerisch den gleichen katalytischen Effekt bewirken können. Zur Erforschung im Labor oder in Situationen, in denen direktes Sonnenlicht nicht zur

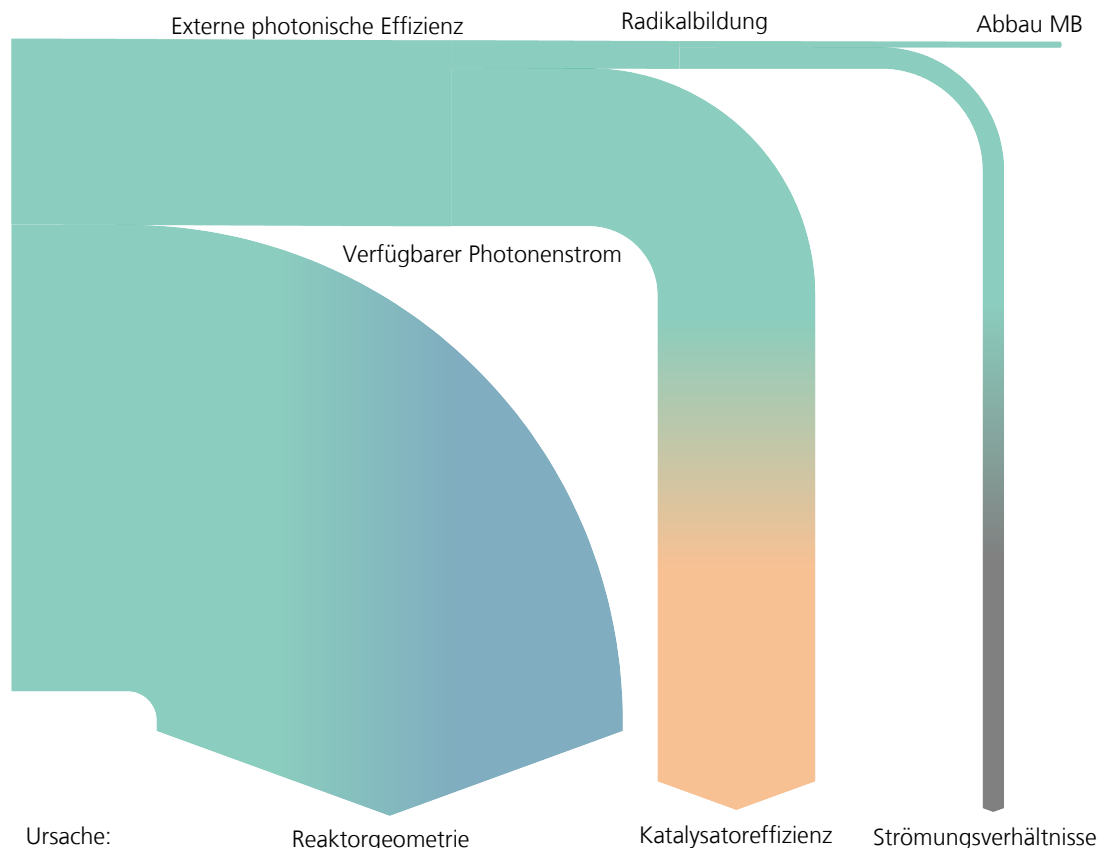


Abbildung 5: Sankey-Diagramm des eingestrahnten Photonenstroms, das die Verteilung auf die Faktoren Reaktorgeometrie, Katalysatoreffizienz, Strömungsverhältnisse (Diffusionslimitierung) und tatsächlichem Schadstoffabbau quantifiziert darstellt.

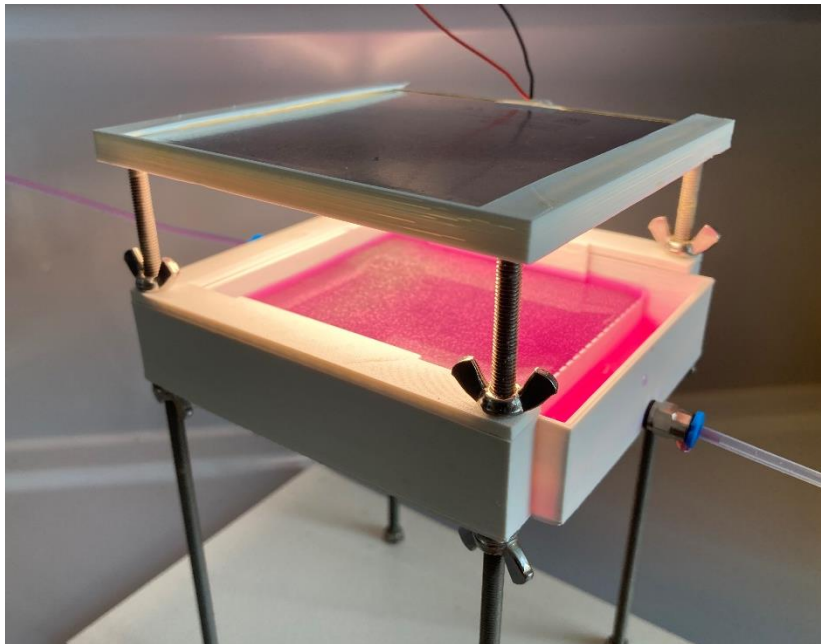


Abbildung 6: 3D-gedruckter OLED-Reaktor

Verfügung steht, bieten OLEDs (Organic Light-Emitting Diodes) eine geeignete Lösung. Sie könnten daher eine noch effizientere und nachhaltigere Wasseraufbereitung ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde eine neue Reaktorgeometrie entworfen, um die photokatalytische Abwasserbehandlung mit einer OLED zu untersuchen. Das Reaktormodell wurde auf eine ausgewählte OLED ausgerichtet und basiert auf dem Prinzip des hydrodynamischen Durchflusses ohne Pumpeneinsatz. Im Gegensatz zum katalytischen Membranreaktor wurde der Reaktor dazu mit einer Überlaufkante konzipiert. Die Realisierung des Modells erfolgte mittels 3D-Druck.

Für die photokatalytischen Untersuchungen unter sichtbarem Licht wurden drei verschiedene Katalysatoren ausgewählt: Titandioxid (KronoClean 7000), Bismutwolframat und graphitisches Kohlestoffnitrid


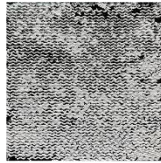


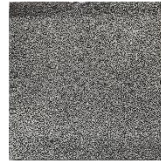
Katalysator \ Trägermaterial	KRONOClean® 7000 (TiO ₂)	Bismutwolframat (Bi ₂ WO ₆)	Graphitisches Kohlestoffnitrid (g-C ₃ N ₄)
3D PLA Druck			
Nickelschaum	—		

Abbildung 7: Schema der untersuchten Kombinationen von Katalysatoren und Katalysatorträgern.

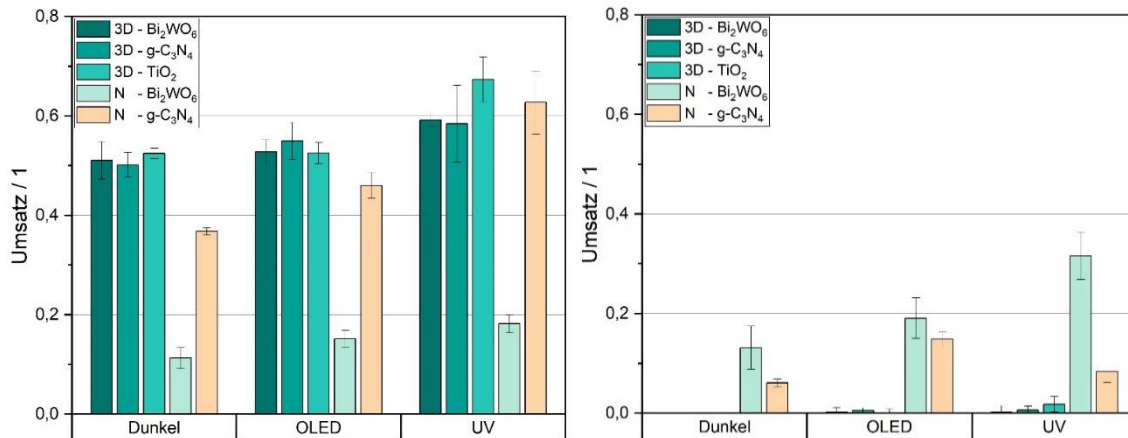


Abbildung 8: Abbau von Methylblau (links) und Bengalrosa (rechts) durch verschiedene Katalysatoren und Bestrahlung

Kohlenstoffnitrid. Sie alle können in den entwickelten Reaktoren variabel eingesetzt werden. Als Katalysatorträger wurden die Katalysatoren entweder auf 3D-gedrucktes PLA-Material mit einer Beschichtung auf Geopolymerbasis (Kaliumsilikat und ein Härter auf Calciumaluminatbasis, 5,7 Gew.% Katalysator) aufgetragen oder auf dem Nickelschaum mit elektrophoretischer Abscheidung (EPD) immobilisiert. Abbildung 7 zeigt die unterschiedlich beschichteten Träger.

Zur Prüfung der Katalysatoren auf ihre photokatalytische Aktivität wurden Batch-Tests durchgeführt. Die Katalysatoren wurden 1 h lang in kationische (Methylblau, MB) und anionische (Bengalrosa, BR) Farbstoffe getaucht und unter verschiedenen Lichtbedingungen getestet (Abbildung 7). Es wurde eine hohe Adsorption von MB auf dem immobilisierten Geopolymer-Katalysator beobachtet, während keine signifikante Adsorption von RB festgestellt wurde. Unter OLED-Bestrahlung zeigte die Katalysator-Geopolymer-Beschichtung Unterschiede im Vergleich zur dunklen Probe, während unter UV-Bestrahlung ein deutlicher Unterschied beobachtet wurde. Die beiden mit Katalysator beschichteten Nickelschäume zeigten Wechselwirkungen mit beiden Farbstoffen. Trotz der geringen Menge an Bismutwolframat, die auf dem Schaum immobilisiert werden konnte, wurde eine photokatalytische Aktivität unter OLED- und UV-Bestrahlung beobachtet. Das graphitische Kohlenstoffnitrid (CN) zeigte eine ähnliche Adsorption von MB wie die Geopolymerbeschichtungen und eine photokatalytische

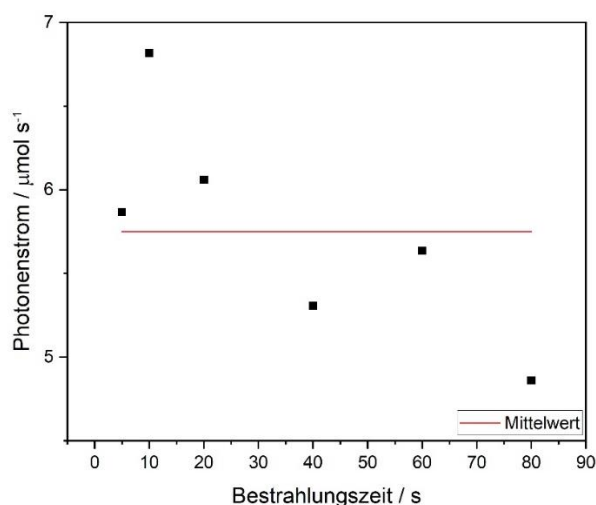


Abbildung 9: Aktinometrie-Ergebnisse im OLED-Reaktor.

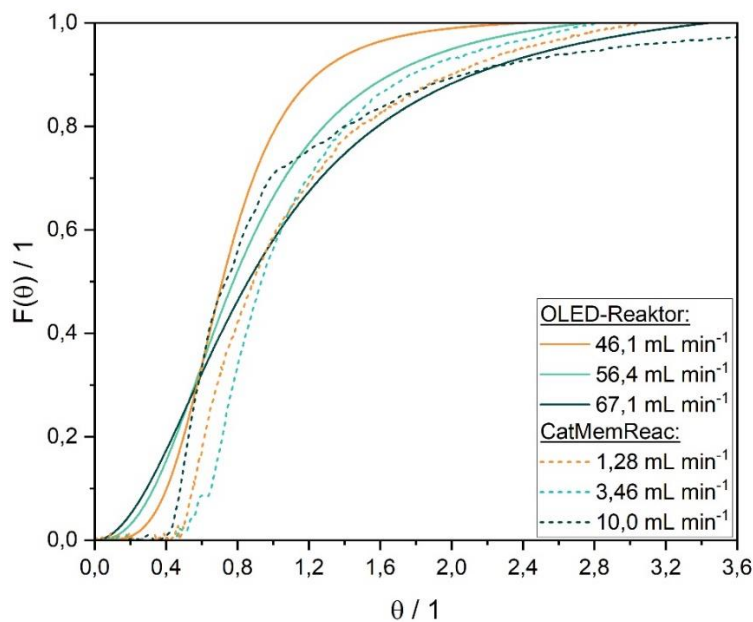


Abbildung 10: Verweilzeitverteilungsfunktion des OLED-Reaktors im Vergleich zum ursprünglichen CatMemReac-Konzept.

Wirkung, wenn es sichtbar und UV-Licht ausgesetzt wurde. Unter UV-Bedingungen zeigt das graphitische Kohlenstoffnitrid eine geringere Umwandlung für RB, was weitere Untersuchungen erfordert, um eine stichhaltige Erklärung zu finden.

Die starken Adsorptionseffekte auf die Geopolymerbeschichtung und CN können auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften des CN zurückgeführt werden, die zu einer negativen Nettoladung führen und eine bevorzugte Bindung des kationischen MB ermöglichen.

In kontinuierlichen Experimenten wurde der pharmazeutische Wirkstoff Carbamazepin auf seinen photokatalytischen Abbau hin untersucht. Die verschiedenen immobilisierten Katalysatoren wurden in dem entwickelten Durchflussreaktor unter OLED-Bestrahlung untersucht. Es wurde jedoch festgestellt, dass keiner der Katalysatoren eine Adsorption oder einen Abbau dieser Komponente bewirkte. Nachforschungen über die Ursache sollten deshalb in einem Anschlussprojekt verfolgt werden, um tatsächlich eine Weiterentwicklung auf reine Bestrahlung durch Sonnenlicht, ganz ohne externen Energieeinsatz (bei der Nutzung natürlichen Gefälles) zu ermöglichen. Nichtsdestotrotz wurde auch hier eine reaktionstechnische Charakterisierung vorgenommen, um andere Arbeiten vergleichen und hieran anknüpfen zu können.

Bei den aktinometrischen Versuchen wurde festgestellt, dass ein Photonenstrom von $5,76 \mu\text{mol s}^{-1}$ zur Verfügung steht und die externe photonische Effizienz bei 93,3% liegt, was auf eine sehr effiziente Nutzung des Lichts hinweist. Diese Ergebnisse bestätigen die Auslegung der Reaktorgeometrie auf die Lichtquelle. In Abbildung 10 ist der Vergleich der Verweilzeitverteilung des OLED-Reaktors mit dem des katalytischen Membranreaktors zu sehen.

Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass die Kurven des katalytischen Membranreaktors später ansteigen als die des OLED-Reaktors. Die Steigung der CatMemReac-Kurven entspricht ungefähr dem niedrigsten Volumenstrom des OLED-Reaktors. Im Allgemeinen weisen die Kurven des OLED-Reaktors eine homogenere Verteilung auf. Die Strömungsverhältnisse im OLED-Reaktor sind besser, insbesondere zu Beginn der Zeit. Es ist daher zu beachten, dass ein größerer Volumenstrom angestrebt werden sollte, um eine effektive Durchmischung und Verteilung zu erreichen. Es wurden keine langanhaltenden Totzonen im OLED-Reaktor beobachtet, was auf eine positive Auslegung der Reaktorsysteme hindeutet.

Tabelle 1: Verschiedene berechnete Werte aus der Verweilzeitverteilung des OLED-Reaktors.

Volumenstrom	Hydrodynamische Verweilzeit	Reale Verweilzeit	Bodensteinzahl	Kesselzahl
$\dot{V} / \text{mL min}^{-2}$	τ / s	\bar{t} / s	Bo / 1	N / 1
46,1	247,5	193,5	21	11
56,4	202,2	181,0	16	8
67,1	169,8	177,6	14	7

Tabelle 2: Verschiedene berechnete Werte aus der Verweilzeitverteilung des katalytischen Membranreaktors.

Volumenstrom	Hydrodynamische Verweilzeit	Reale Verweilzeit	Bodensteinzahl	Kesselzahl
$\dot{V} / \text{mL min}^{-2}$	τ / s	\bar{t} / s	Bo / 1	N / 1
1,28	18,34	11,28	38	19
3,46	6,78	4,83	31	16
10,00	2,35	1,21	18	9

Darüber hinaus können die hydrodynamischen und exakten Verweilzeitzahlen sowie die Bodensteinzahl und die (theoretische) Gefäßanzahl zwischen den beiden unterschiedlichen Reaktoren verglichen werden.

Die Bodensteinzahl Bo beschreibt das Verhältnis von konvektivem Stoffaustausch und axialer Durchmischung im Reaktor. Der Grad der Rückvermischung nimmt mit zunehmender Bodensteinzahl ab. Die Kesselzahl N beschreibt einen Parameter des Kaskadenmodells. Sie gibt an, wie viele Kessel erforderlich sind, um eine vollständige Rückvermischung zu erreichen. Die Bodensteinzahlen liegen alle in dem Bereich, der einem realen Rührkesselreaktor entspricht. Mit steigendem Volumenstrom nehmen sowohl die Bodensteinzahl als auch die Anzahl der Kessel ab. Die Beobachtung einer niedrigeren Bodensteinzahl bei höheren Volumenströmen deutet darauf hin, dass die Dispersion mit steigender Geschwindigkeit zunimmt. Dies lässt sich durch die verstärkte Durchmischung bei höheren Volumenströmen erklären.

Am Fraunhofer ISI wurde schließlich mit den Daten der Labor- und Pilotanlagen eine LCA durchgeführt. Das Ziel der Umweltbewertung ist ein Vergleich der Treibhausgasemissionen der in CatMemReac entwickelten Technologien mit konventionellen Technologien für die vierte Reinigungsstufe (Ozonierung, Aktivkohle). Dazu wurde beschlossen, ein exploratives Best-Case-Szenario für die CatMemReac-Technologie zu entwickeln, um zu analysieren, ob sie bei optimistischen Annahmen über ihre Entwicklung geringere Treibhausgasemissionen als herkömmliche Technologien wie die Ozonierung aufweist. Um die jeweiligen Best-Case-Annahmen zu den als relevant identifizierten Parametern und Faktoren zu treffen, wurden zwei Interviews mit externen Experten sowie acht Interviews mit technischen Experten des CatMemReac-Konsortiums geführt.

Bei den Schlüsselfaktoren und Hintergrundparametern wurde davon ausgegangen, dass Deutschland (als definierte geografische Grenze, vgl. Ziel und Anwendungsbereich) seine angekündigten klimapolitischen Ziele für 2030 erfüllt, was zu einem grüneren Strommix als heute führt. Des Weiteren wurde angenommen, dass Deutschland die EU-Wasserrichtlinie erfüllt, die die Schweizer Anforderungen an die Entfernung von organischen Spurenstoffen in einem bestimmten Prozentsatz der kommunalen Kläranlagen bis 2030 übernimmt. Bei differenzierteren Annahmen zum Wasserstoffperoxid-Verbrauch für die Reinigung wurde festgestellt, dass kein signifikanter Einfluss auf die Gesamt-THG-Emissionen besteht, sodass keine Annahmen zur alternativen, elektrochemischen Produktion vor Ort getroffen wurden. Da sich der Strommix für alle Technologien ändern würde, ist nicht zu erwarten, dass die Berechnungen mit einem zukünftigen Strommix die Gesamtaussagen dieser Studie verändern.

Bei den Primärparametern wurden die folgenden Annahmen über Verbesserungen beim weiteren Upscaling vom Labor- und Pilotmaßstab getroffen:

- a) *Senkung des Energiebedarfs durch Optimierung der Reaktorgeometrie:* Es wurde davon ausgegangen, dass der Energieverbrauch für LEDs und Pumpen ausgehend vom Labormaßstab durch eine Optimierung der Reaktorgeometrie um den Faktor 150 reduziert werden kann (Nutzung eines Tankbehälters anstelle von Rezirkulation). Dieser Wert basiert auf Schätzungen des CatMemReac-Technikteams, die auf theoretischen Überlegungen und den Erfahrungen in diesem Projekt beruhen.
- b) *Senkung des Energiebedarfs durch Optimierung des Katalysators:* Wir sind davon ausgegangen, dass eine zusätzliche Senkung des Strombedarfs um 10 % durch eine Optimierung des Katalysators möglich ist, d. h. durch die Verwendung von TiO₂ mit optimierten Kristallstrukturen anstelle des in den Labor- und Pilotversuchen verwendeten P25-TiO₂ bei gleichen Beschaffungskosten.
- c) *Verringerung des Energiebedarfs durch Skaleneffekte beim Pumpen:* Wir haben angenommen, dass die Pumpeneffizienz vom Pilotmaßstab bis zum optimalen industriellen Maßstab um 20 % steigt, da im Anwendungsmaßstab größere, effizientere und zweckoptimierte Pumpen eingesetzt werden.
- d) *Verringerung des Energiebedarfs durch Weglassen von Sensoren und Kühlung:* Die Pilotanlage hatte einen erheblichen Energiebedarf für Sensoren, die im industriellen Maßstab nicht erforderlich sind. Außerdem sind wir davon ausgegangen, dass eine Kühlung der LEDs nicht erforderlich ist, da die LEDs im günstigsten Fall durch den Abwasserstrom im industriellen Maßstab ausreichend gekühlt werden.
- e) *Annahmen zu Reaktormaterialien/Infrastrukturelementen:* Wir haben mögliche Änderungen bei den Reaktormaterialien/Infrastrukturelementen vernachlässigt, da die Analyse im Labor-/Pilotmaßstab gezeigt hat, dass sie die Ergebnisse der Ökobilanz nicht wesentlich beeinflussen. Es wird angenommen, dass während der Lebensdauer des Reaktors kein Austausch von Infrastrukturelementen erforderlich ist.
- f) *Annahmen zur Reaktorreinigung:* Wir sind davon ausgegangen, dass die Sandfiltration Trübungen vor der CatMemReac-Behandlung beseitigt, so dass eine Reinigung mit Wasserstoffperoxid einmal im Monat ausreicht, wie dies auch bei anderen Membrananwendungen der Fall ist.

Abbildung vergleicht das Treibhauspotenzial des voraussichtlichen Best-Case-Prozesses von CatMemReac im industriellen Maßstab mit dem deutschen, europäischen und israelischen Strommix. Für Deutschland ergibt sich ein GWP von 2,2 kgCO₂eq/m³ für das beste Szenario im industriellen Maßstab der CatMemReac-Technologie. Es wird durch den Stromverbrauch für LEDs und Pumpen bestimmt, während Reinigung und Infrastrukturkomponenten zusammen weniger als 0,1 % dieser Emissionen verursachen. Aufgrund des frühen Stadiums der technologischen Entwicklung und der vielen Annahmen, die getroffen werden mussten, ist dieser Wert mit großer Unsicherheit behaftet. Für

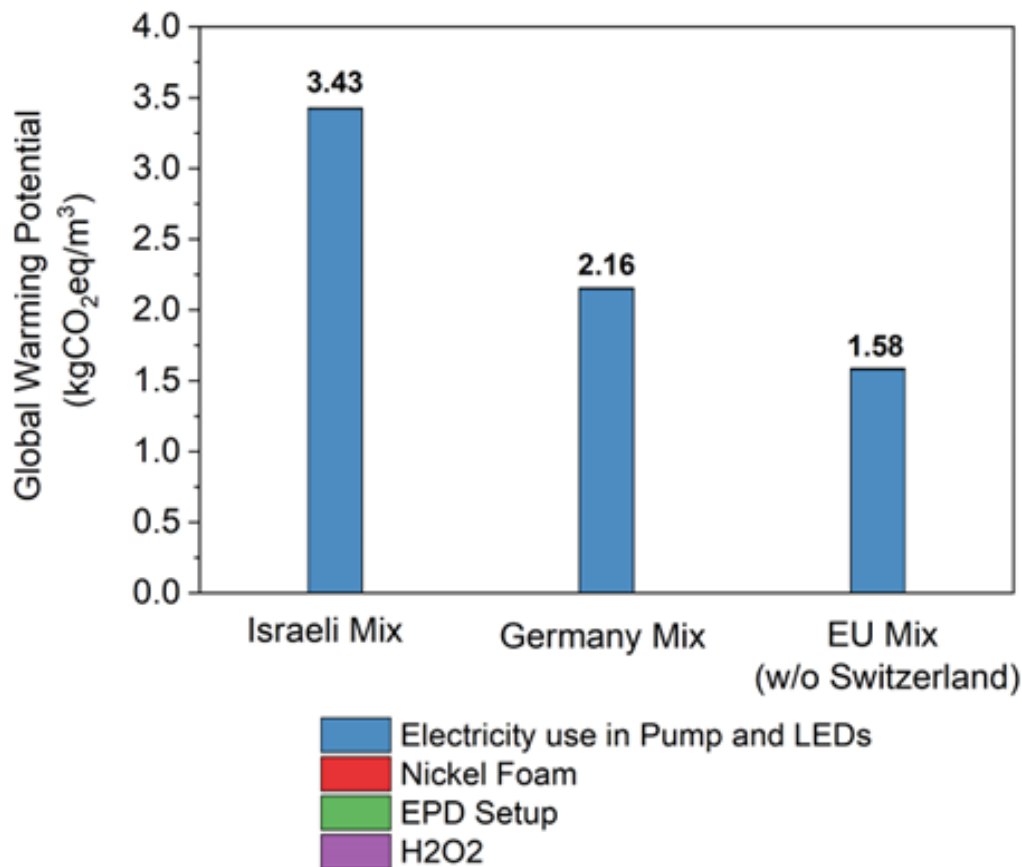


Abbildung 11: Treibhauspotenzial eines potenziellen CatMemReac-Verfahrens im industriellen Maßstab gemäß einer prospektiven Ökobilanz mit optimistischen Annahmen für die weitere technologische Entwicklung.

eine genauere Schätzung sind weitere Versuche unter industriellen Bedingungen erforderlich. Angesichts des optimistischen Charakters der getroffenen Annahmen und der Tatsache, dass der resultierende Wert achtmal so hoch ist wie der Literaturwert für konventionelle Technologien (0,28 kgCO₂eq/m³), ist dies jedoch ein Hinweis darauf, dass die CatMemReac-Technologie derzeit nur mit weiteren reaktortechnischen und materialseitigen Optimierungen eine vielversprechende Option zur Verringerung der THG-Emissionen bei der Entfernung von organischen Spurenstoffen in kommunalen Kläranlagen darstellt. Neben den getroffenen Annahmen wäre ein weiteres Potenzial zur Reduzierung der THG-Emissionen der CatMemReac-Technologie am naheliegendsten die Verwendung von Solarlicht anstelle von LEDs oder ein höherer Photonennutzungsgrad auf das gesamte eingestrahlte Spektrum gesehen.

Für weitere Details zu den wissenschaftlich-technischen Ergebnissen wird auf den *Joint Final Report* aller beteiligten Forschungseinrichtungen sowie den *Final Scientific Report* der TAU, beide in englischer Sprache, verwiesen.

Die Ausgaben- und Zeitplanung konnte über den gesamten Projektrahmen hinweg gesehen erfüllt werden.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Uns sind keine externen FE-Ergebnisse bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind. Die verwendete Literatur ist in den jeweiligen englischen Berichten zu finden.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Weitere Forschungen zu einer breiteren Anwendbarkeit spezieller und v.a. kombinierter Technologien zur Behandlung von unterschiedlichen Wasserverunreinigungen und Wasserqualitäten sowie eine langfristige Demonstration sind für eine differenzierte Bewertung unumgänglich. Diese werden dazu beitragen, die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Technologie zu ermitteln und quantitativ vergleichen zu können.

Der Aufbau im Labormaßstab weist ein vergleichsweise hohes Treibhauspotenzial (GWP) auf. Nach einer Optimierung des Designs, das in der Umsetzung eine Vergrößerung der Oberfläche des Nickelschaums und des behandelten Volumens umfasst, wird die notwendige Behandlungsdauer für den Abbau einer Realstoffkonzentration im Labor- bzw. Pilotmaßstab um den Faktor 25 reduziert. Das demonstriert die Dimension der Skalierungseffekte photochemischer Ansätze, die in der Literatur bisher nur stiefmütterlich erläutert sind.

Die Studie zeigte das Treibhauspotenzial (GWP) auf der Grundlage der Ökobilanz von Labor- und Pilotanlagen der CatMemReac-Technologie für den Abbau von CBZ. Den Hauptbeitrag zum GWP lieferte der Stromverbrauch für Pumpen und LEDs. Die Sensitivitätsanalyse ergab eine 96%-ige Verringerung des GWP für den grüneren Strommix im Vergleich zum israelischen Mix für CatMemReac. Der Wert für den umweltfreundlicheren Strommix beträgt $0,6 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ und ist damit lediglich doppelt so hoch wie der für die Ozonbehandlung angegebene Wert. Somit ist ein Einsatz der Technologie für die dezentrale Behandlung zur Wasserreinigung und -wiederverwendung zu empfehlen, sobald das unausgeschöpfte Potenzial zur Effizienzsteigerung etwa um den Faktor 8 erhöht wird. Bereits vorher sind Vorteile bei der Skalierbarkeit von Betriebsbedingungen und Handhabung zu berücksichtigen, die konkurrierende Technologien wie die Ozonierung behindern.

Darüber hinaus sind folgende Aspekte wichtig und können entscheidend bei der Zielfortführung sein:

- Eine Partnerschaft mit kommerziellen Herstellern von Metall- oder Keramikschäumen zur Verbesserung der Immobilisierung von Katalysator auf den Träger kann die Herstellung von TiO_2 -Schaum erleichtern, so dass der Beschichtungsschritt entfällt und ein haltbareres Material geschaffen werden kann. Auch Grundlagenforschung an Universitäten tragen zur Materialentwicklung bei. Hier sollte eine unabhängige Bewertung mit Übertragbarkeit zwischen den Ansätzen und Bezug zur Realanwendung stattfinden (3–5 Jahre).
- Die Durchführung langfristigen Betriebsmonitorings auf einer bestehenden Plattform (z. B. Shafdan) wird dazu beitragen, die Funktionalität der Technologie zu demonstrieren, potenzielle Schwachstellen zu ermitteln und ihre Weiterentwicklung zu unterstützen (1–2 Jahre).
- Aktualisierung der Ökobilanzdaten auf der Grundlage des Betriebs eines noch größeren Systems für einen Vollstrom (Realisierung 3 Jahre, Datenerfassung 1 Jahr).

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Es wurden vor Ort-Besuche zum Erfahrungsaustausch mit Universitäten vorgenommen:

Uni Jena, Uni Potsdam, Uni Stuttgart, Uni Mailand, Uni Nürnberg-Erlangen, TU München.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Veröffentlichungen

A: Eingereicht, warten auf Review:

1. Carbamazepine Degradation with TiO₂ EPD-coated over 3D Nickel Foam in a Photocatalytic Flow Reactor

B: Fast fertige Manuskripte, einzureichen in Q1/2025:

1. Life Cycle Assessment of CatMemReac: Evaluating Impact Reduction Potential in the Transition from Lab to Pilot Scale Setup.
2. Prospective Life Cycle Assessment of Industrial Scale CatMemReac Technology: Feasibility and Comparative Assessment.
3. Carbamazepine Degradation Upscaled Photocatalytic Flow Reactor Based EPD-Coated TiO₂ Over 3D Ni Foam

Vorträge:

- International Conference on UV LED Technologies & Applications ICULTA, 23.-26. April 2023, Berlin
- Zukunftsplattform des Spurenstoffzentrums des Bundes, 17. Oktober 2023, Berlin
- 15. Aachener Tagung Wassertechnologie, 26. Oktober 2023, Aachen

Kooperationsforschung und Beiträge zu akademischen (Abschluss-)Arbeiten:

- 5 Stipendien (2 Doktoranden IGSTC 6 Monate, 1 Doktorand DAAD 3 Monate, 1 Doktorand Minerva 1 Monat, 1 Post-Doc IGSTC 1 Jahr)
- 6 Masterarbeiten