Anlage 10

Sachbericht
zum Verwendungsnachweis
zu FuE-Vorhaben

Reg.-Nr.:	**MF150019**
FuE-Einrichtung:	**Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie e.V.**
Titel:	**SOLWADES** (Solare Wasserdesinfektion)
Projektlaufzeit:	**01.09.2015 - 31.12.2017**
Berichtszeitraum:	**01.09.2015 - 31.12.2017**

Berlin, den 21.03.2018

Name des Projektleiters: **Heiko Rexin**
Tel.-Nr. des Projektleiters: **+49 30 609847-225**

Firmenstempel

Unterschrift des Projektleiters

Rechtsverbindliche Unterschrift

1. Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Etwa die Hälfte der Weltbevölkerung hat keinen Zugang zu Trinkwasser adäquater Qualität. Der zunehmende Wasser- Prokopfverbrauch auf der Erde und die gleichzeitig wachsende Weltbevölkerung werden das Problem der Wasserversorgung in Zukunft noch brisanter werden lassen. Dabei ist die Belastung mit pathogenen Keimen eines der größten Probleme. Die Desinfektion wird durch chemische und physikalische Methoden durchgeführt, wobei die UV-Bestrahlung neben der Behandlung mit Chlorgas den größten Anteil bei der Abwasserbehandlung hat. Die Bestrahlung von organischem Material und Mikroorganismen mit hoch energetischer Strahlung (UV) hat eine Zersetzung bzw. Inaktivierung zur Folge. Es sollten sich im Idealfall keine KBE (Koloniebildenden Einheiten) nach der Bestrahlung in der behandelten Lösung befinden. Im Rahmen dieses Projektes soll ein Verfahren entwickelt werden, Trinkwasser effizient zu desinfizieren, und somit die Wasserqualität zu steigern. Es soll dazu eine Methode der fotokatalytischen Wasserdesinfektion mit einer Kombination aus Sonnenstrahlung und UV-LEDs auf ihre Anwendbarkeit geprüft werden. Dabei wird ein Aufbau aus Strahlern und optischen Bauteilen verwendet werden. Zudem soll der Einsatz von Titandioxid als Fotokatalysator zur Effizienzsteigerung geprüft werden. Durch kontinuierliche Bestrahlung von Wasser, welches durch eine Leitung fließt, soll die Anzahl von vitalen Mikroorganismen in dem Wasser maßgeblich reduziert werden. Als Motivation im Rahmen dieses Projektes den Einsatz von LED Strahlern zu wählen ist die höhere Lebensdauer, die Vermeidung des Gefahrenpotentials von Quecksilber im Wasser und die bessere Effektivität durch elektronische Regelung und Pulsen der Strahler in Kombination mit Sonnenstrahlung. Der gestiegene Bedarf, wie auch die gesteigerte Effizienz bei UV LEDs lassen eine stetig rückläufige Entwicklung des Preises zu Gunsten der Massenanwendung von solchen Strahlquellen in naher Zukunft zu.

2. Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse

Mit dem im Projekt realisierten Demonstrator konnte gezeigt werden, dass eine Wasserdesinfektion mittels eines photokatalytischen Reaktors, der mit UV-LED anstatt Hg- Strahlern betrieben wird, möglich und sinnvoll ist. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz dieser Strahlungsquellen nicht nur Vorteile besitzt. Beispielsweise ist die Ansteuerelektronik im Vergleich zu Hg-Strahlern deutlich aufwendiger und wegen der erforderlichen Kühlung vor allem schwerer.

Das ursprüngliche Ziel eines UV-LED unterstützten solargetriebenen photokatalytischen Reaktors musste wegen thermischer Probleme aufgegeben und in ein verändertes Konzept, nämlich den solarunterstützten UV-LED betriebenen photokatalytischen Reaktor abgeändert werden.

Dabei wird die Haupt- Desinfektionsleistung im Reaktor mit den UVC-LED erbracht und vom Solarreaktor ggf. unterstützt.

Bis zum Abschluss des Projekts konnten alle AP planmäßig durchgeführt und abgeschlossen werden.

AP 1.1 : Komponentenauswahl

Laufzeit: 09/15 - 10/15

Der Markt um die neusten Entwicklungen bei Photokatalysatoren ist von entscheidender Relevanz für das Projekt, so dass vorrangig Präparationsvarianten für die geplanten Immobilisierungen, Konzentrations- und Verunreinigungseffekte betrachtet werden müssen. Bereits erfolgte Langzeituntersuchungen bei Einsatz dieser Katalysatoren sowie Wiedergewinnungs- und Reinigungsverfahren sind auf ihre Eignung zu bewerten. UVED werden bereits von verschiedenen Herstellern für Gas- und Wasserdesinfektion, Wellness und Healthcare usw., vor allem im Bereich von Kleingeräten, eingesetzt. Hier galt es, Vor- und Nachteile bei der Anwendung der UVED herauszuarbeiten, welche für das Projekt bedeutsam sind. Dies betrifft vor allem die Lebensdauer und die Performance beim Einsatz über größere Zeiträume. Eine weitere aktuelle Marktrecherche wird halbjährlich erforderlich, da viele Hersteller neu auf den Markt drängen (siehe Einleitung). Dabei wird sich auf bestimmte, wirtschaftlich interessante Wellenlängen konzentriert sowie bei „Advanced UV for life" nachgefragt. Der Farbstoff für das Modellsystem muss ausgewählt werden. Dazu werden die erforderlichen Recherchen durchgeführt. Für den Reaktor müssen zunächst die Materialien hinsichtlich ihrer Eignung ausgewählt oder charakterisiert werden. Dies betrifft vor allem die Eigenschaften wie UV-Transparenz, Alterungsbeständigkeit und Eigenfluoreszenz der UV-Strahlung ausgesetzten Komponenten. Weiterhin müssen die optischen Komponenten sehr sorgfältig ausgewählt werden, damit im untersuchten (sehr kurzwelligen UV-Bereich) die wellenlängenabhängigen Eigenschaften nicht in den Vordergrund treten und somit ohne relevanten Einfluß bleiben.

Bei den Spiegeln bzw. der Verspiegelung spielt der wellenlängenabhängige Reflexionsgrad eine wichtige Rolle. Dieser muß ermittelt werden, um in die Simulationen eingepflegt werden zu können. Bei der gilt es, den für das angestrebte Verfahren optimalen Katalysator zu finden. Gute Suspendierbarkeit, kombiniert mit hoher fotokatalytischer Aktivität bei hoher effektiver Oberfläche sind Auswahlkriterien. Vor allem hohe Dauerstabilität und Unempfindlichkeit gegenüber Kontaminationen sind dabei ebenfalls von Bedeutung.

Die Prüfung und Auswahl der zu verwendenden Komponenten für die Voruntersuchungen und den Aufbau der Bestrahlungseinrichtung wurden im AP 1.1 beendet. Die Auswahl der optoelektronischen Komponenten ist in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführt:

UVC Quelle	Nikkiso VPS171 (285nm)
UVB Quelle	Nichia NCSU 33B (365 nm)
Breitband Fotodiode	SG01 D – 18ISO90
UVB Fotodiode	SG01 D B 18ISO90

Tabelle 1

Die aktuelle Auswahl aus den Produkten führender Anbieter von UVEDs (Tabelle 2) mit einem Emissionsmaximum bei ca. 280 nm favorisierte die LED VPS171 des Herstellers Nikkiso.

LED- Hersteller	Emissionswellenlänge [nm]	opt. Leistung [mW]	Strom [mA]	Spannung [V]
Nikkiso	285	30	350	6,5
Crystal IS	250…280	20	300	12
Nichia (50µs_Pulsbetrieb)	280	93	350	16,2
SETI	275	30	350	7,2

Tabelle 2

Die Auswahl erfolgte aufgrund der Verfügbarkeit, der vergleichsweise guten optischen Leistung und der Untersuchungsergebnisse. Die LEDs wurden vermessen und charakterisiert. Ein Vergleich mit Konkurrenten zeigte technologische Reife und lässt somit eine stabile und zuverlässige Betriebsweise prognostizieren, was von großer Bedeutung für die geplante Anwendung ist.

Es ist zu beachten, dass sich diese Auswahl für den Demonstrator durch aktuelle Entwicklungen beispielsweise in dem Bereich der UVED und aktuellen Forschungsergebnissen noch ändern kann. Insbesondere durch die aktuellen Ankündigungen von Nikkiso und LG Innotek ist Bewegung in den Markt der UV-C-Quellen gekommen.

Die Farbstoffauswahl (Tabelle 3) erfolgte nach vorhandenen Vorschriften (DIN) sowie nach Handhabbarkeit. Bei Degradationstests erwies sich Methylenblau gegen Strahlung allein stabil, jedoch gegen Photokatalyse empfindlich.

Farbstoffe	Methylenblau/ Rhodamin 6G/ Fluorescein

Tabelle 3

Rhodamin 6G degradierte bei Konzentrationen von 10^{-4} mol/l, dies ist zu gering für brauchbare Messungen. Daher werden die Untersuchungen demnächst mit dem empfindlicheren Fluorescein fortgesetzt. Als Photokatalysator wurde zunächst das Produkt KRONOS 3000 eingesetzt, welches auf Glasslides (Abb. 1, rechts) immobilisiert wurde. Der Photokatalysator wurde durch 10-minütiges Bestrahlen aktiviert und anschließend mit dem Farbstoff Methylenblau durch Eintauchen in die Lösung gefärbt.

Durch die Bestrahlung (Abb. 1 links) wurde die bestrahlte Region ausgeblichen (Abb. 1 rechts). Damit ist die Wirksamkeit des Photokatalysators bestätigt.

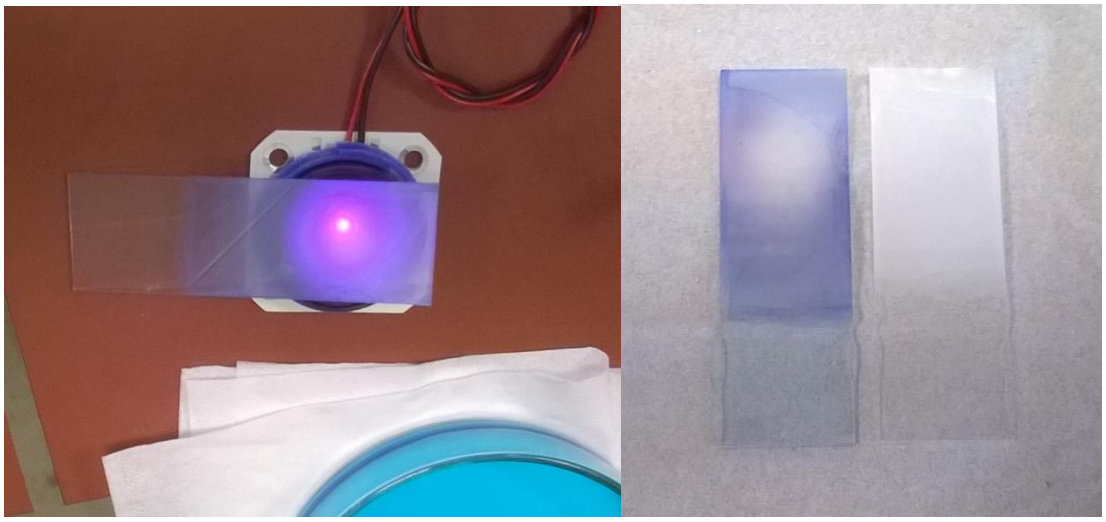

Abb. 1: Versuch zur Photokatalyse: Aufbau (links) Ergebnisse (rechts)

Andere Produkte werden im weiteren Verlauf des Projektes bei Bedarf untersucht. Für den Aufbau des Laborreaktors erforderlichen Komponenten wurden ausgewählt und bestellt.

AP1.2: Laboraufbau für Voruntersuchungen
Laufzeit: 9/15 - 12/15

Mit Hilfe des Laboraufbaus sollen hauptsächlich der Advanced Oxydation Process (AOP) sowie die Desinfektionsleistung sowie deren Interaktion untersucht werden. Für den AOP wird ein Modellsystem mit einem Farbstoff, welcher während des Prozesses abgebaut wird, mit einer definierten Sauerstoffkonzentration eingesetzt. Der Sauerstoff für den AOP wird über Elektrolyse mittels einer sauerstoffproduzierenden Elektrode am Eingang des Reaktors (Küvette) eingebracht. Die Sauerstoffkonzentration wird über Sensorelektrode verfolgt und entsprechend den Erfordernissen eingestellt. Die farbstoffhaltige Lösung soll unter verschiedenen Bedingungen bestrahlt und die resultierende Abnahme der Farbstoffkonzentration photometrisch verfolgt werden. Die Messung der Verteilung des Strahlungsfeldes im Reaktor erfolgt über eine wasserdicht eingekapselte UV-Photodiode, die in diesen eingebracht wird. Diese wird vorher gealtert und im optischen Labor kalibriert.

Der optische Aufbau wurde wie in Abb. 2 ersichtlich, realisiert:

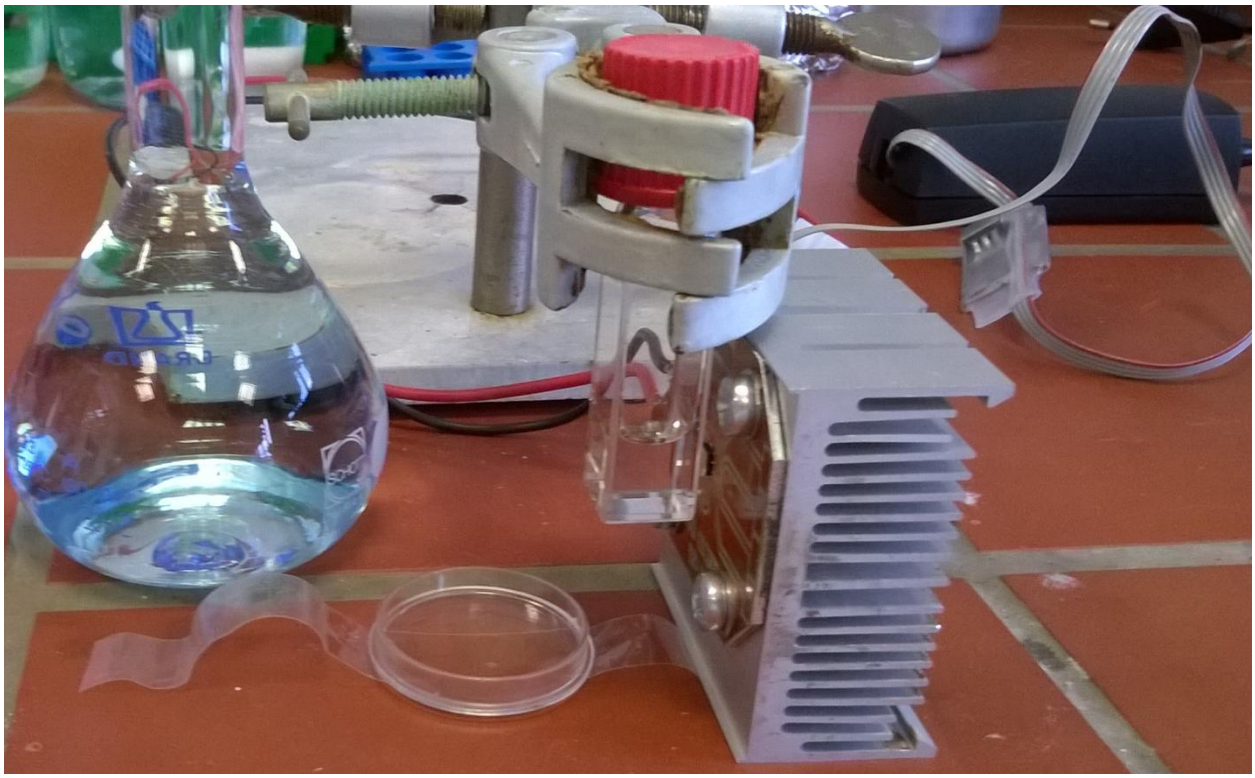

Abb. 2: Laboraufbau mit Küvette und Bestrahlungseinheit UVC sowie Farbstofflösung (links)

Die UVED mit Kühlkörper wurde so dicht wie möglich an die Küvette herangeführt, um möglichst viel Strahlung in die Küvette zu bekommen. (im Hintergrund rechts die Stromversorgung)

Die Ansteuerung der Bestrahlung und Regelung der Bestrahlungsintensität erfolgt über die dafür konzipierte Elektronik. Die Küvette ist mit 1 ml Untersuchungslösung (Farbstoff) gefüllt, welche durch die UVED (Chip in der Mitte) bestrahlt wird (Abb. 3).

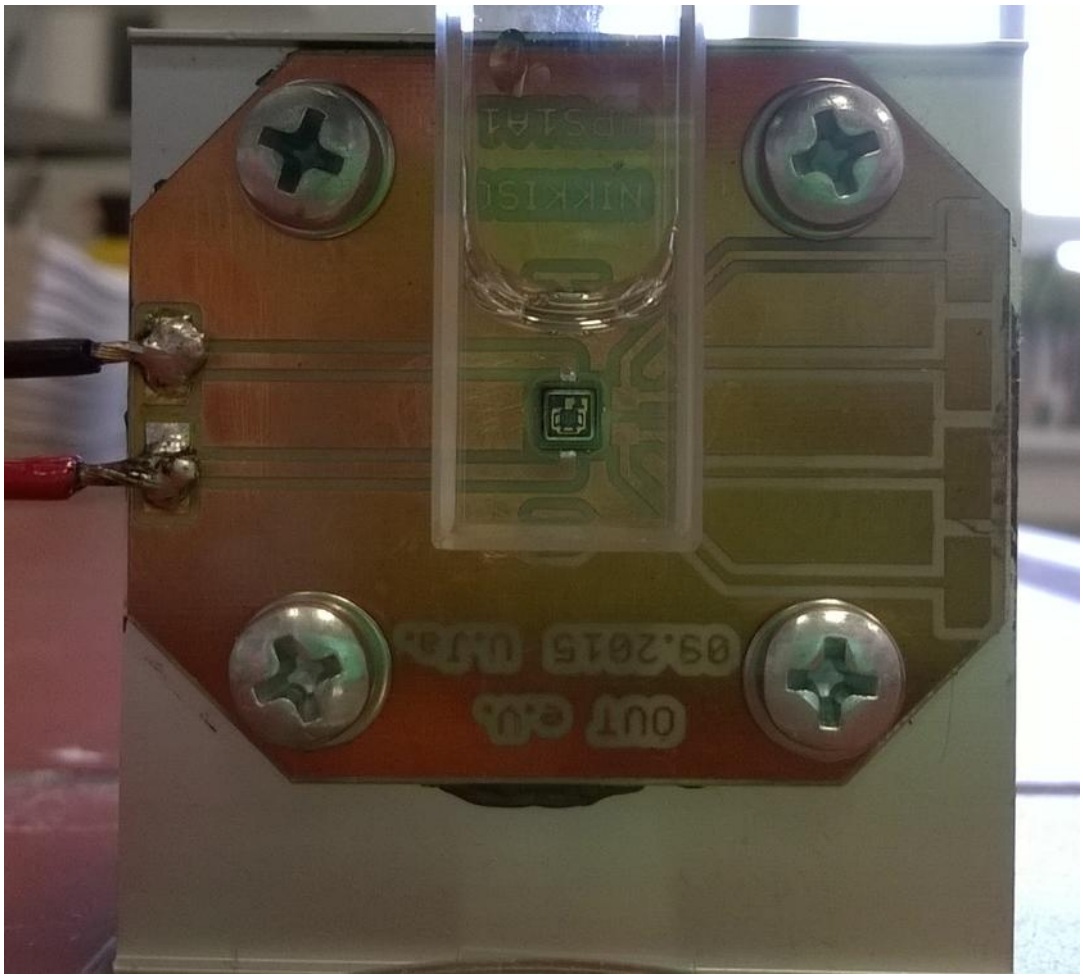

Abb. 3: Laboraufbau (Vorderansicht)

Die Platine wurde speziell für die eingesetzte UVED Nikkiso VPS171 entwickelt, realisiert, mit der UVED bestückt und mit einem Kühlkörper versehen.

Der in der Küvette befindliche Farbstoff Rhodamin 6G wird zur Fluoreszenz angeregt und soll degradieren (Abb. 4).

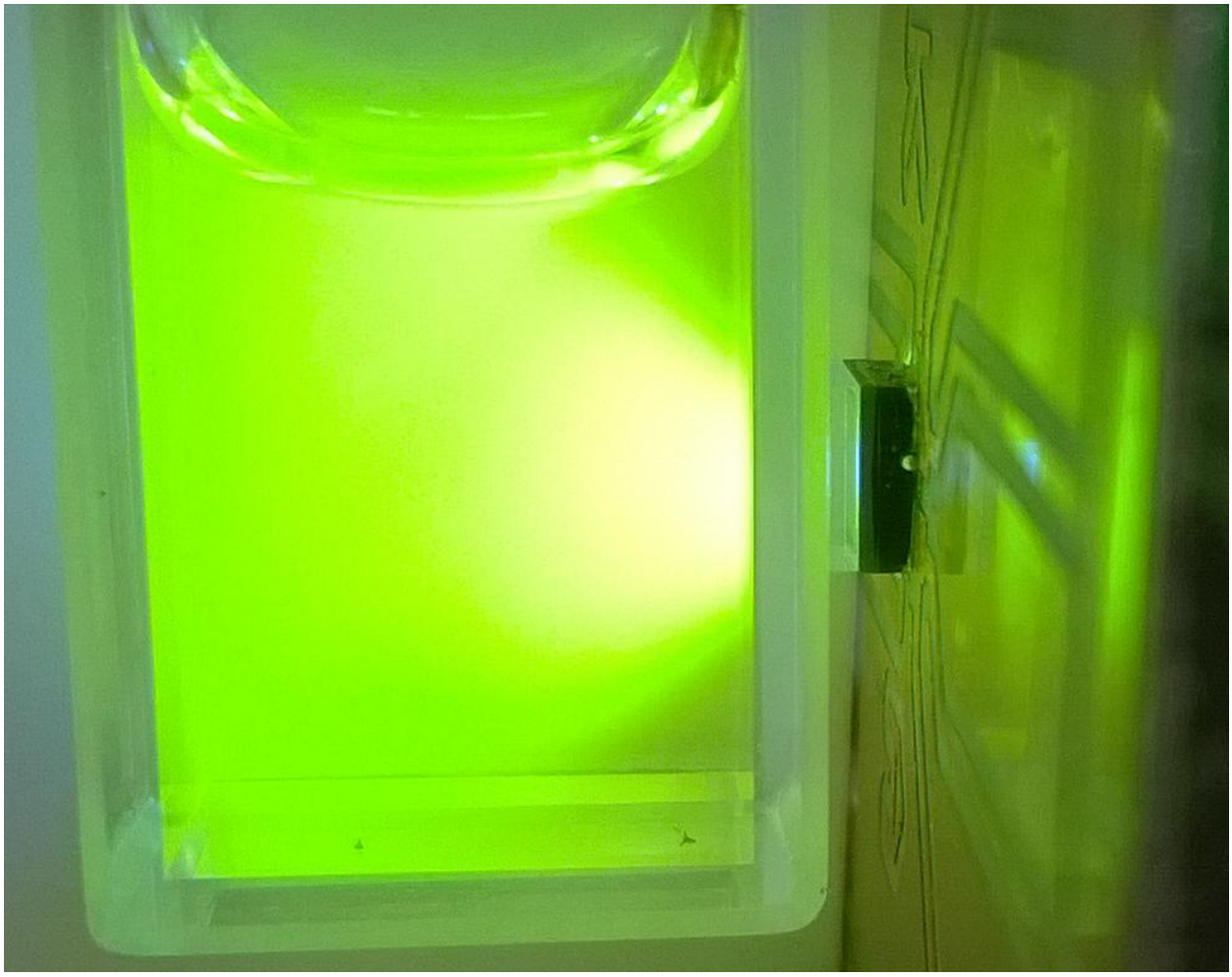

Abb. 4: fluoreszierender Lichtkegel der Strahlung der UVED

Ein Teil der Strahlung wird nicht absorbiert und durchdringt die Farbstofflösung (Abb. 5).

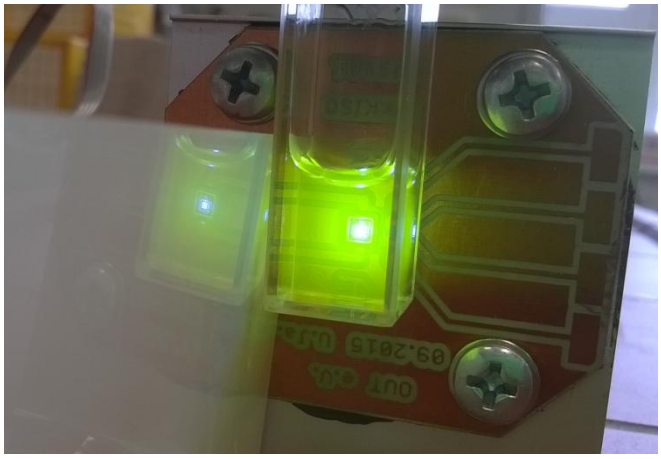

Abb. 5: Fluoreszenz (Vorderansicht)

AP 1.3: Bestrahlungseinheit für den Laboraufbau
Laufzeit: 10/15 - 01/16

Dieser Reaktor und dessen Bestrahlungseinheit müssen so ausgelegt werden, dass die Bestrahlungseinheit ohne großen Aufwand verschiebbar ist. Deren Versorgungseinheit (Spannung, Strom, Kühlung, etc.) sowie die Halterungen müssen fix bleiben können. Es ist die Dispersion zu berücksichtigen und der Reflexionsgrad der eingesetzten Materialien zu beachten, damit stets die gleiche Strahlungsverteilung im Inneren des Reaktormediums herrscht. Die Auslegung erfolgt dabei so, dass die Strahlung maximal ausgenutzt wird. Das Modul soll in der Lage sein, verschiedene Strahlungsleistungen über Pulsvariation definiert zu erzeugen. Eine Vorrichtung zur genauen Verstellung des Abstandes zwischen UVED und Reaktor wird realisiert.

Bei photochemischen Reaktionen auf Oberflächen führt die Erhöhung der Strahlungsleistung dazu, dass die photochemische Reaktion zwar insgesamt schneller verläuft, jedoch in den diffusionskontrollierten Bereich verschoben ist, womit ein immer größerer Anteil der Strahlung nicht genutzt wird, da in die unmittelbare Umgebung noch keine frischen Reaktanden diffundiert sind. Aus Effizienzgründen ist also die maximal einsetzbare Strahlungsleistung begrenzt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, durch Pulsen der Strahlung die Strahlungsleistung einerseits temporär zu erhöhen und dabei andererseits die Diffusionskontrolle zu vermeiden. Der Einsatz von UVED ist für diese Zwecke optimal geeignet, da ein Pulsbetrieb unproblematisch und die Variabilität der Pulse (von µs bis s) nahezu beliebig möglich ist. Für diese weiterreichenden Untersuchungen können die Stromquellen auch für einen Pulsbetrieb ausgelegt werden. Diesen Pulsbetrieb zu etablieren, zielt darauf ab, den Systemwirkungsgrad zu erhöhen und eine spätere Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen.

Es sind derzeit nur wenige, sowie unveröffentlichte Untersuchungen [PolyAn] bekannt, die einen Einfluss von gepulster Strahlung auf die photochemische Reaktion bei einer Oberflächenreaktion zeigen [16], [17]. Es ist zu erwarten, dass gepulste Strahlung wie bei den genannten Untersuchungen auch bei anderen Anwendungen eine größere Effizienz der eingesetzten Energie im Vergleich zu kontinuierlichen Strahlern aufweist. Als Nebeneffekt wird eine Verlängerung der Lebensdauer der UVED erwartet. Der Konstruktion folgt die Simulation für die Optimierung, wobei eine maximale Effizienz der Strahlungsausnutzung erreicht werden soll.

Es wurden bei den Untersuchungen Sauerstoff- und UV-Detektoren eingesetzt.

Die erforderlichen UV-Sensoren wurden konzipiert und realisiert (Abb. 6 rechts und links). Diese bestehen aus der eigentlichen UV-Photodiode und einer im Messkopf vollintegrierten Verstärkerelektronik.

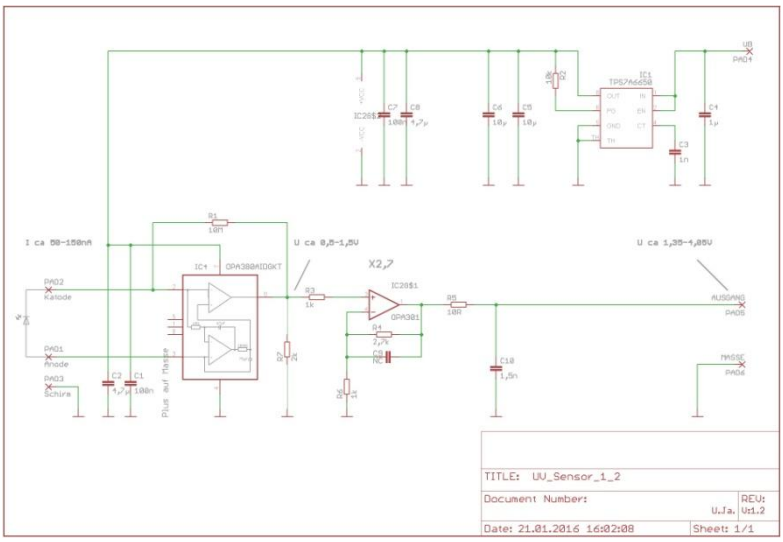

Abb. 6: links: Schaltplan des UV-Sensor rechts: UV-Sensorkopf

Die elektronisch gesteuerte Bestrahlungseinheit wurde konzipiert (Abb. 7) und realisiert. Diese komplette Verstärkerelektronik wurde im Messkopf integriert und gegen äußere Einflüsse geschützt. Dies sind bei den geringen Photoströmen von wenigen Nano-Ampere insbesondere elektromagnetische Einstreuung und Rauschen im Kabel und an allen Kontaktstellen.

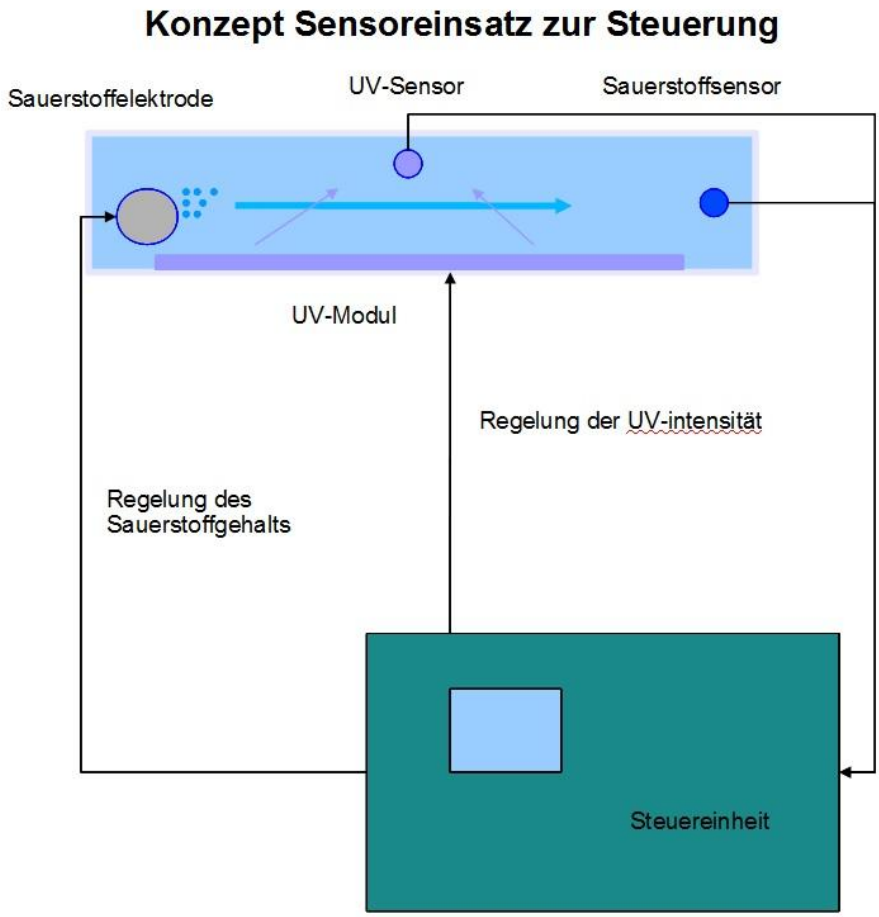

Abb. 7: Konzept des Laborreaktors

Um mehrere Messköpfe an verschiedenen Stellen und mit unterschiedlichen Spektralbereichen im Reaktor platzieren zu können ist eine weitere elektronische Schaltungen (Abb. 6 / Abb. 8) entwickelt und die Platinen dazu realisiert (Abb.9) worden. In Vorbereitung des Einsatzes am fertigen Demonstrator ist diese Karte mit acht Kanälen ausgelegt worden, um einen schnellen Wechsel zwischen den noch zu ermittelnden Lenkungspunkten zu ermöglichen und Konsistenzen und Koinzidenzen zwischen verschiedenen Sensorköpfen durch gleichzeitige Aufzeichnung zu erfahren.

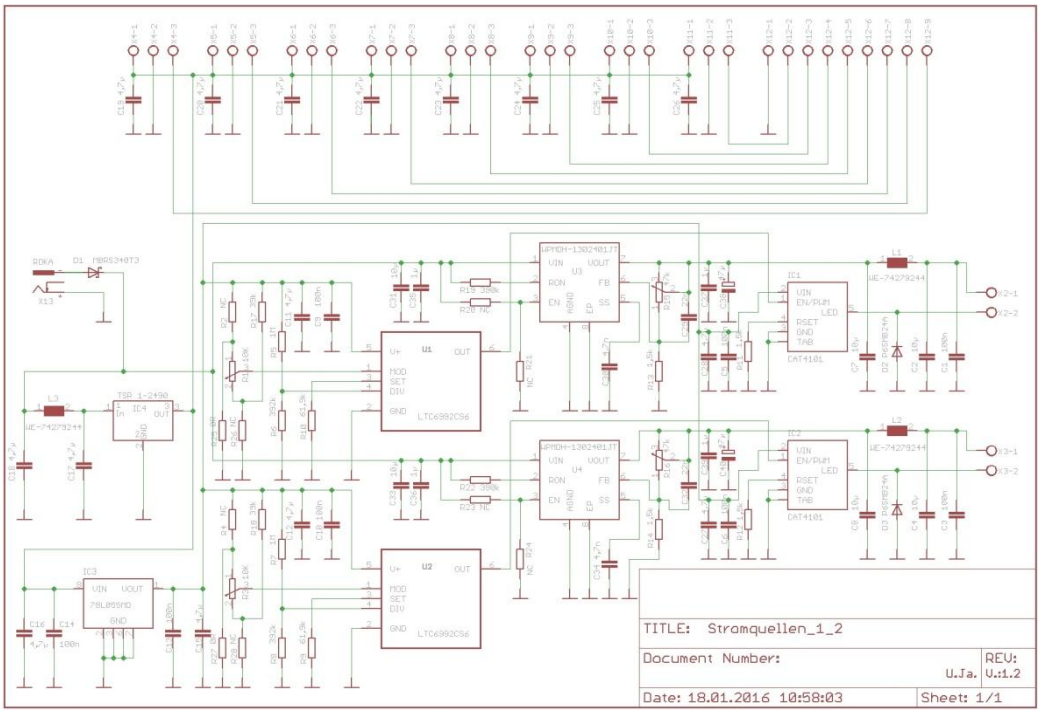

Abb. 8: Schaltplan der Ansteuerplatine für UV Sensoren und UV Dioden

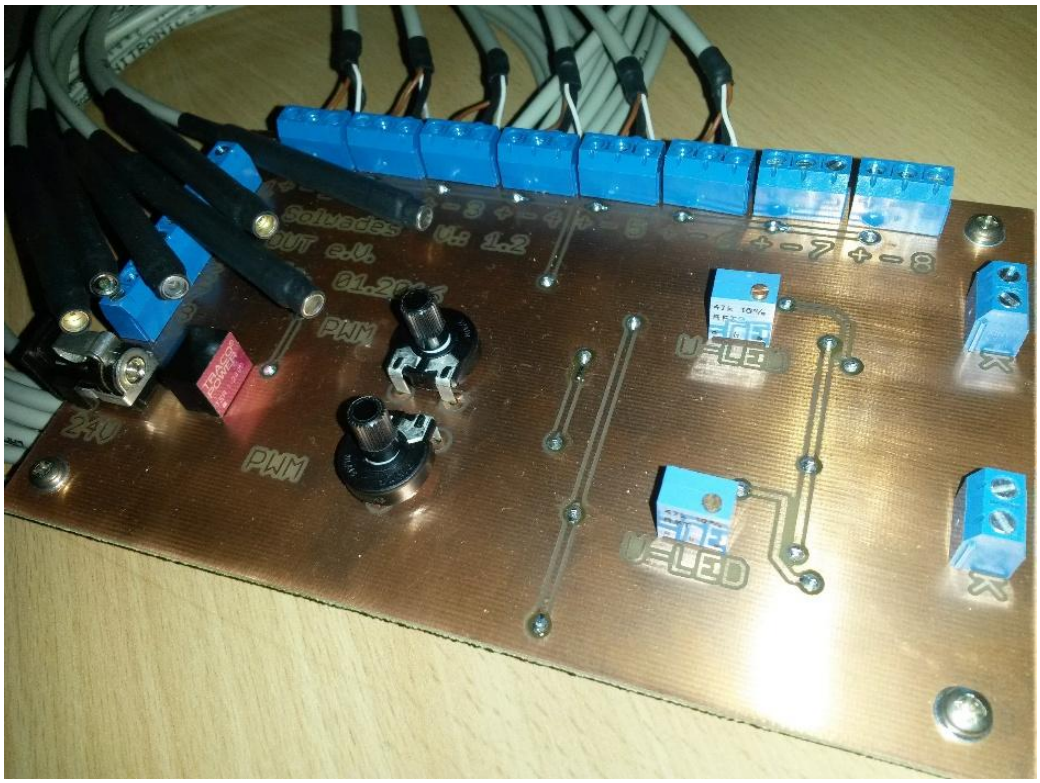

Abb. 9: **Ansteuerplatine (bestückt) inklusive 6 UV (3 UVB / 3 Breitband UV Diode) Sensoren links auf der Platine**

AP 1.4: Dosisuntersuchungen
Laufzeit: 12/15 - 04/16

Heutzutage bedeutet Desinfektion (lt. DVGW-Trinkwasserverordnung) eine Reduktion der in einem Wasser nachzuweisenden pathogenen Keime um 99,999 %. Um diese Desinfektionswirksamkeit zu erreichen, ist eine UV-Dosis von 400 J/m² erforderlich. Am Modellsystem werden die Wirkung unterschiedlicher Dosen UV-Strahlung untersucht.

Es wird erwartet, dass der photokatalytische Abbau des Farbstoffs in Analogie zur Desinfektionsleistung steht und somit aus diesem Modellsystem auch Rückschlüsse auf die Desinfektionsleistung gezogen werden können. In jedem Falle ist davon auszugehen, dass das spezifische Design zusammen mit den Bedingungen, die ein Maximum an ADR nach sich ziehen, auch eine maximale Desinfektionsleistung erreichen wird.

Die Desinfektionsleistung soll über ein weiteres Modellsystem mit E.coli brilliance in enger Zusammenarbeit mit einem Unterauftragnehmer erfolgen. Diese Proben werden dort mikrobiologisch quantifiziert. Aus dem Verhältnis der Keimzahlen ergibt sich dann die Desinfektionsleistung. Die bei gleichen Versuchsparametern erhaltenen Daten für Farbstoffausbleichung und Desinfektionsleistung werden korreliert, um über das Farbstoffsystem bei den folgenden Versuchen Aussagen über die Desinfektionsleistung zu erhalten, ohne stets Lebendorganismen dazu einsetzen zu müssen. An dieser Stelle muss untersucht werden, in-

wieweit die Performance der leistungsfähigeren UVAED an die der UVCED heranreicht. Kriterium ist die Desinfektionsleistung (D) bezogen auf den Anschaffungspreis der jeweiligen Bauelemente, also D/EUR.

Zunächst wurde die Degradation der Farbstoffe Methylenblau und Rhodamin 6G bei Bestrahlung mit UVC (285 nm) untersucht. Dabei ergab sich, dass die Farbstoffe nur zu einem sehr geringen Teil abgebaut werden. Als nächstes fiel die Wahl auf das empfindlichere Fluorescein, dessen Degradationsgeschwindigkeit ermittelt wurde.

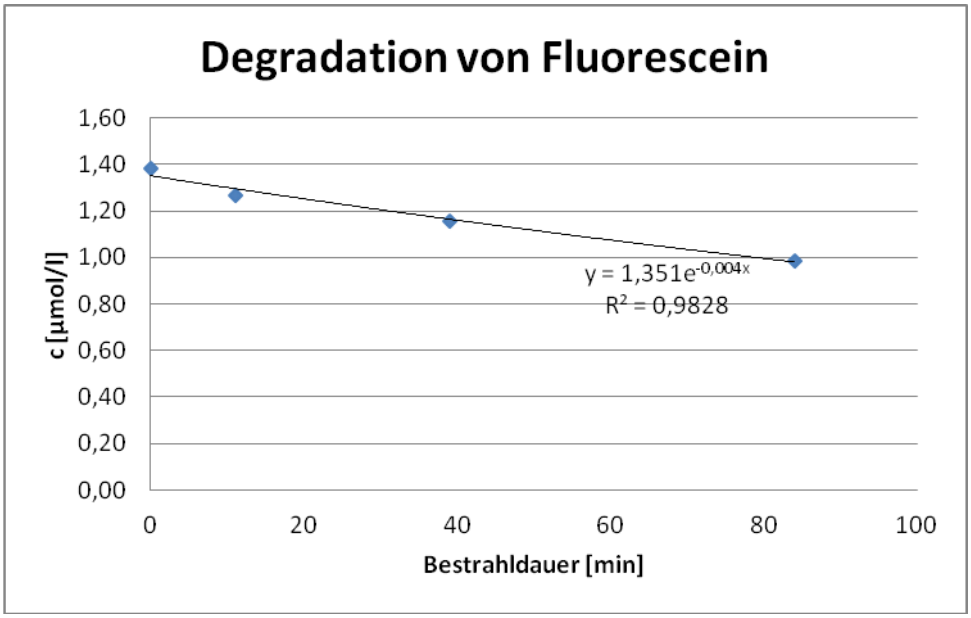

Abb. 10: Degradation von Fluorescein

Es war notwendig, einen weiteren Farbstoff einzusetzen, weil das Fluorescein häufig nicht reproduzierbare Ergebnisse lieferte. Aufgrund der starken pH-Abhängigkeit der Absorption kann hier vermutet werden, dass bereits geringe Änderungen der Temperatur und des CO_2-Gehaltes der Lösungen einen großen Einfluss ausübten. Daher wurde alternativ auf L-Tryptophan zurückgegriffen, welches ähnliche Absorptionseigenschaften wie DNA aufweist. Es wurde noch zusätzlich eine Analytik dieses Stoffes in geringer Konzentration (Fluoreszenzmessung), realisiert, was im Projekt bisher nicht eingeplant war.

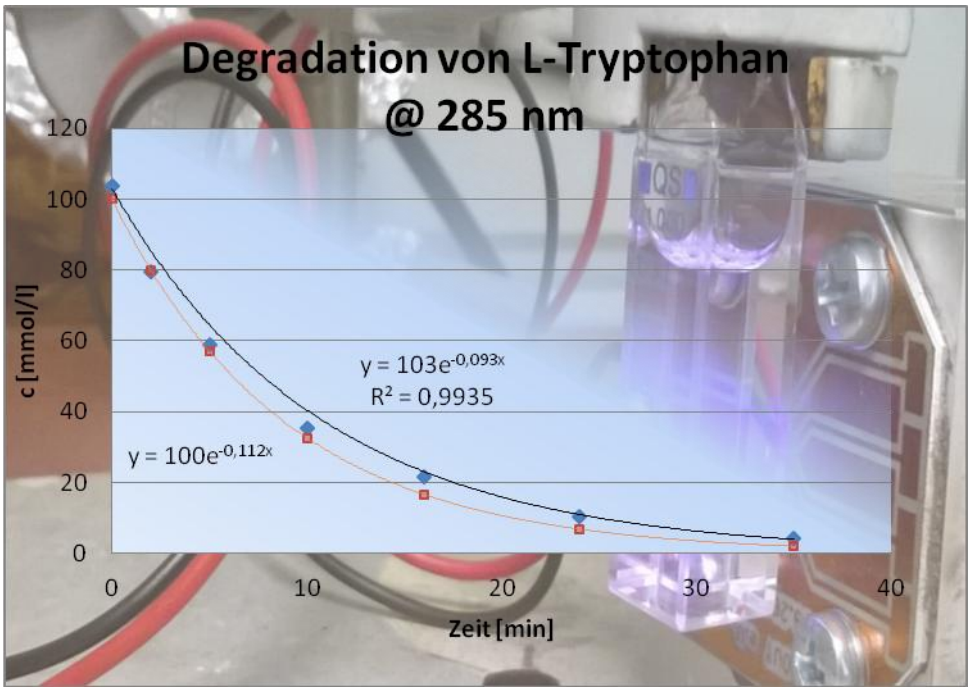

Abb. 11: Degradation von L-Tryptophan bei 285 nm

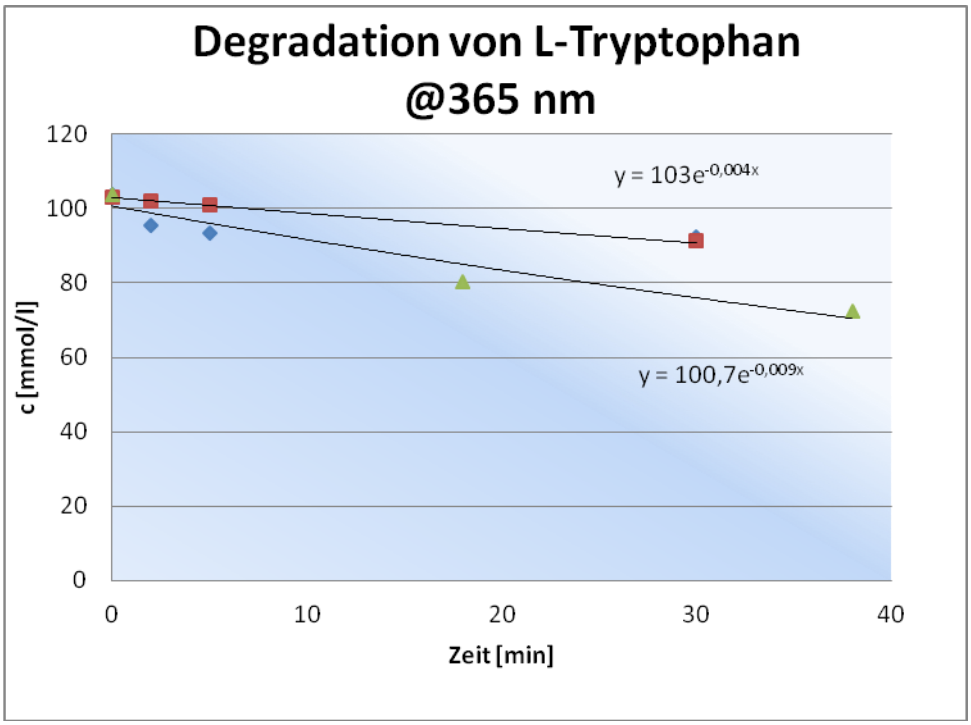

Abb. 12 Degradation von L-Tryptophan bei 365 nm ohne sowie mit Photokatalysator

Die Untersuchungen bei 365 nm ergaben, dass L-Tryptophan sich ohne Zusatz von Photokatalysator bereits abbaut. Dieser Abbau ist zwar um den Faktor 25 langsamer, als bei 285 nm, es muss jedoch berücksichtigt werden, da sonst der Einfluss des Photokatalysators falsch dargestellt würde. Unter Einfluss des Photokatalysators wird der Abbau beschleunigt.

Am Ende wurde L-Tyrosin verwendet, weil dieses im Vergleich bei 365 nm weniger degradiert als L-Tryptophan aber ähnlich gut detektierbar ist.

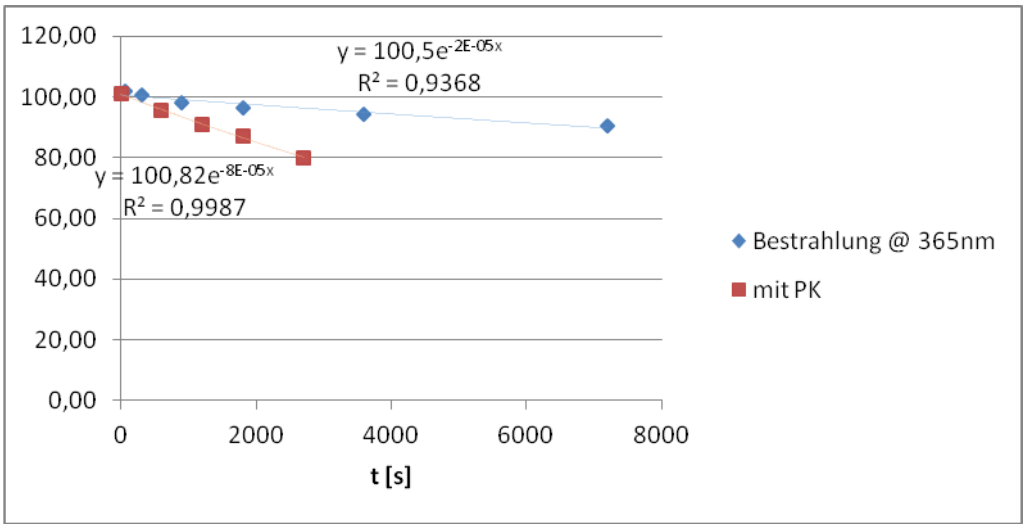

Abb. 13: Degradation von L-Tyrosin bei 365 nm ohne sowie mit Photokatalysator

Die Untersuchungen des Effekts der Strahlungsdosis auf den Desinfektionserfolg wurden im Rahmen des geplanten Unterauftrages bei der Firma BlueBioLabs durchgeführt.

Der Versuchsaufbau dort bestand aus einer Bakteriensuspension in einer Petrischale, welche bei aseptischen Bedingungen in ständiger Bewegung gehalten wurde. Es bestanden 5 cm Abstand zwischen der UVED mit Kühlkörper bei 285 nm und Petrischale, so dass eine Bestrahlungsstärke von 0,26 mW / cm^2 herrschte.

Abb.: 14: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Desinfektionsleistung (bluebiolabs)

Die Schalen mit der Bakteriensuspension des nicht pathogenen Laborstammes Escherichia coli K12 wurden bestrahlt, inkubiert und nach 72 Stunden die Kolonie bildenden Einheiten (KBE) ausgezählt. Je Bestrahlungsdauer wurden vier parallele Tests durchgeführt.

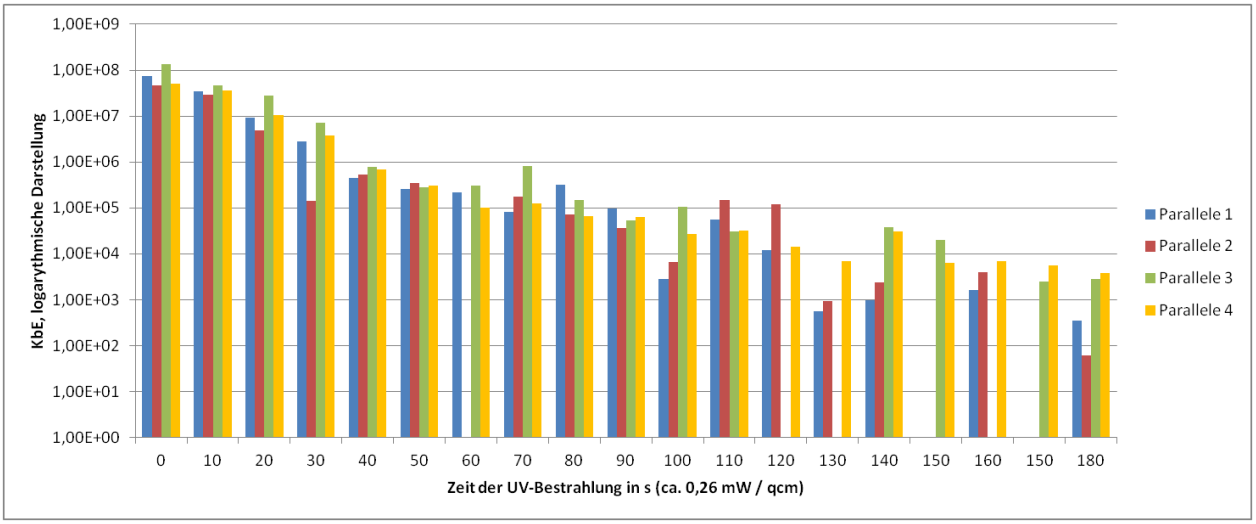

Abb. 15 Darstellung der gesamten Versuchsreihe Biodosimetrie (bluebiolabs)

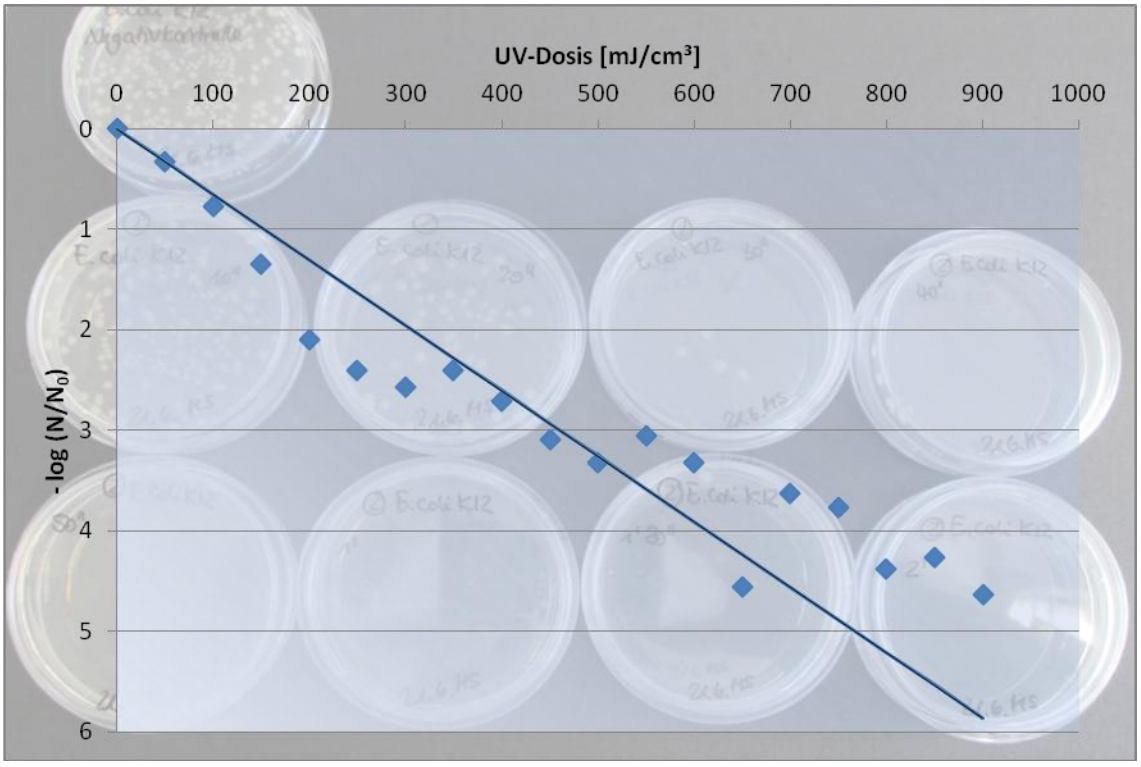

Abb. 16 Ermittlung der Desinfektionsleistung mit E.coli K12 bei 285 nm

Es wurde eine sehr gute Performance von 5 Log-Stufen bei einer Bestrahlungsdauer von 180 s (entspricht 900 mJ/cm³) gefunden.

Nach Auswertung der Ergebnisse ergibt sich Proportionalität der Degradation des Farbstoffs L-Tyrosin mit der Desinfektionsleistung nach folgender Formel:

$$D(log) = -log_{10} (e \wedge 901 * \ln (c/c_0))$$

Der Faktor 901 ergibt sich aus dem Quotienten der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten der Biodosimetrie sowie der Farbstoffdegradation.

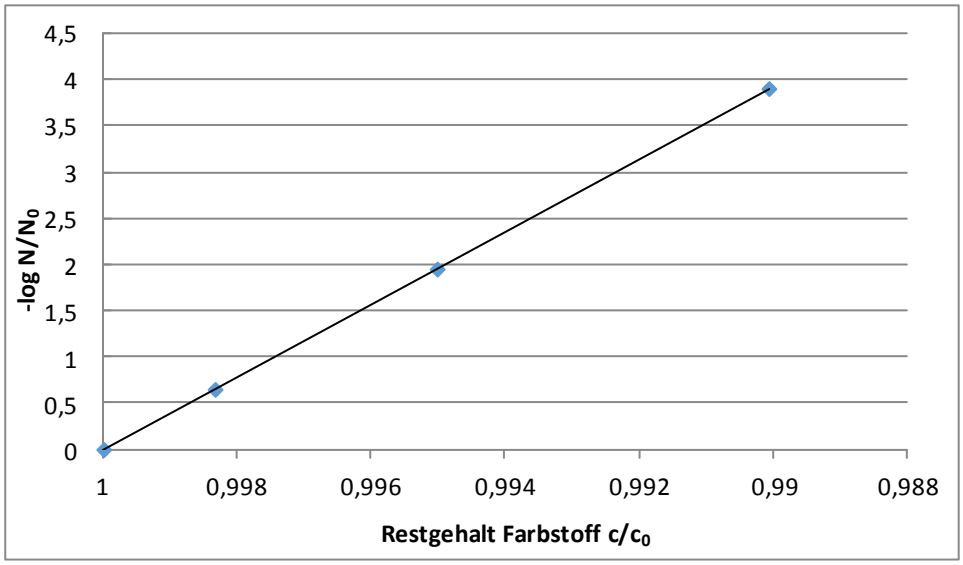

Abb.17: Nomogramm der Proportionalität von Farbstoffabbau und Desinfektionsleistung in log-Stufen

Aus diesem Nomogramm wird ersichtlich, dass bereits bei einem relativ geringen Farbstoffabbau von ca. 1% bereits mehrere Logstufen an Bakterien inaktiviert werden. Dies zeigt einerseits die sehr große Empfindlichkeit der Bakterien auf die UV-Strahlung, andererseits die Schwierigkeit, einen brauchbaren Farbstoff zu finden, dessen geringe Abbauraten sicher messbar sind.

AP 2.1: UVED- unterstützter solarbetriebener photokatalytischer Laborreaktor Laufzeit: 02/16 - 06/16

Basierend auf den Ergebnissen der AP bis einschließlich AP 1.4 wurde der Laborreaktor unter Berücksichtigung verschiedener fest geplanter Ausbaustufen designt:

- Laborreaktor für Desinfektion mit UVED
- Laborreaktor für Solardesinfektion
- Laborreaktor für Solardesinfektion mit UVED- Unterstützung

Dabei wurden verschiedene Geometrien des Packungsaufbaus mit Strahlungsquellen kombiniert und optimiert. Als Bewertungsmaßstab diente der Parameter „average mass destruction rate“ (AMR), welchen es unter Berücksichtigung der ständig wechselnden Strahlungsverhältnisse zu maximieren galt.
Es wurden zunächst Art und Anordnung des Photokatalysators, die Zusammensetzung, die Einkopplung und Mehrfachnutzung der Strahlung sowie die Konfiguration des Reaktors anhand der erarbeiteten Designkriterien festgeschrieben und simuliert. Anschließend wurden die Komponenten schrittweise realisiert und getestet. Dabei wurden Einflussfaktoren wie Materialeigenschaften, Trübungen, Färbungen, Temperatur sowie Feststoffgehalt berücksichtigt. Weitere wichtige, zu beachtende Nebenbedingungen sind Reinigungsmöglichkeiten, Austauschbarkeit von defekten Komponenten, Fettfreiheit, Ölfreiheit und die Vermeidung von Gasbildung.
Im Ergebnis dieses AP standen Designempfehlungen zu den mechanischen, elektrischen, optischen Randbedingungen und Betriebsparameter für einen funktionierenden Puls- oder Dauerbetrieb zur Verfügung.

Die Simulationen ergaben, dass ein relativ hoher UV-Anteil in der Strahlung zur Aufrechterhaltung der Desinfektionsleistung erforderlich ist. Jedoch ergibt sich in unseren Breiten, dass dies nur in Zeiten von direkter Sonneneinstrahlung auf das Modul gewährleistet ist. Unter den Bedingungen unserer durchschnittlichen Sonneneinstrahlung kann somit eine permanente Desinfektionsleistung nur erreicht werden, wenn immer zusätzlich auch mit UVED bestrahlt wird.

Der UV-Gefahrenindex des Deutschen Wetterdienstes ist ein bewertetes Integral des aktinischen Balus und entspricht somit fast der Absorptionsfunktion des Photokatalysators. Lediglich in den Sommermonaten tritt ein nennenswerter UV-Anteil (Index >6) in Deutschland auf.

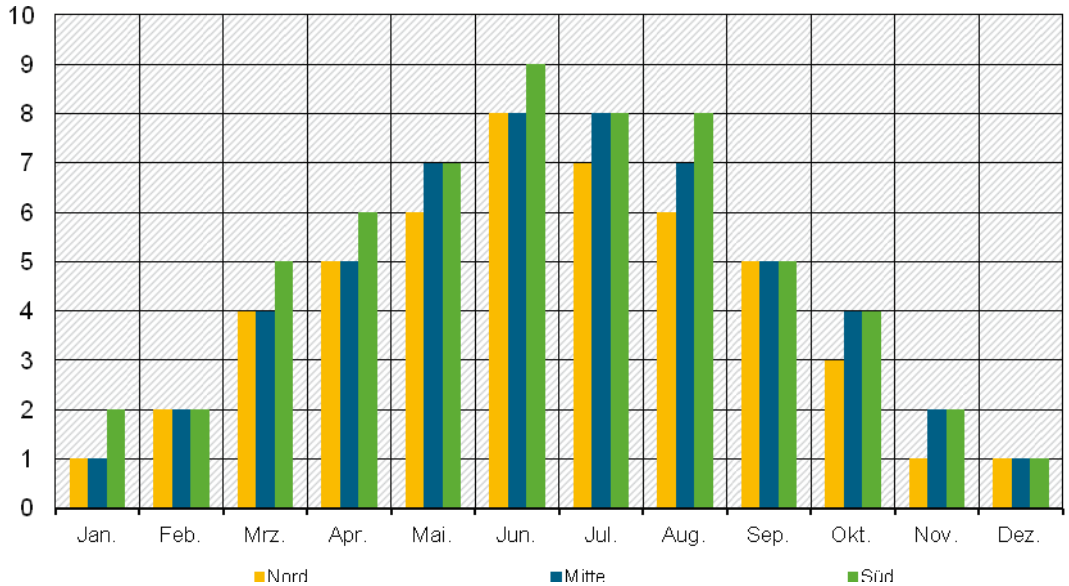

Abb. 18: Jahresverlauf der maximalen UV-Indexwerte für Deutschland Nord, Mitte und Süd für 2016

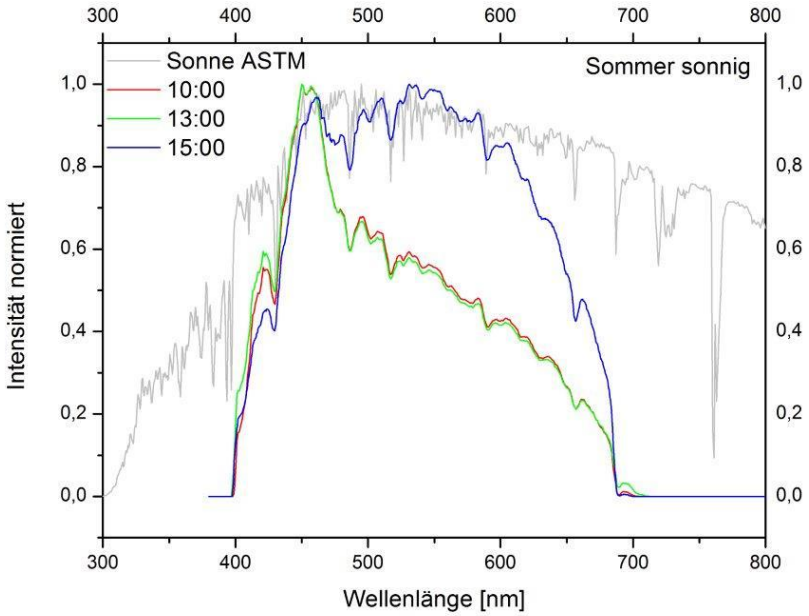

Abb. 19 Spektralverteilung der Sonnenstrahlung an einem Sommertag, Berlin

AP 2.2: Simulationen der Strömung, des Strahlungsfeldes und der Reaktionskinetik Laufzeit: 02/ 2016 – 05/ 2016

Zunächst werden für verschiedene in Frage kommende Materialien (Eignung, optische Eigenschaften, UV-Beständigkeit u.s.w.) die Flüsse über verschiedene Packungsarten mit Photokatalysatoren (Fasern, Partikel, etc.) in COMSOL (porous flow) sowie freie Partikel in Suspension mit COMSOL (single phase flow) simuliert, um Anhaltspunkte für die durchschnittliche Verweildauer einzelner Volumenelemente oder Partikel sowie deren Verteilung zu gewinnen. Das Teilvolumen, das die geringste Dosis erhält, bestimmt die Desinfektionswirksamkeit (breakdown). Anders ausgedrückt ergibt sich aus der kürzesten Verweildauer die einzusetzende Menge an Strahlung, um sicher alle Erreger abzutöten oder zu inaktivieren.

Die ausgewählten UVED sind in der Regel nicht mit einem kompletten Datensatz für optische Simulation versehen. Dieses Datenfeld wird durch eine Messung im Labor des OUT e.V. ermittelt und in das Software-Paket „Light Tools“ eingepflegt. Damit ist es dann möglich, ein komplett funktionsfähiges Abbild der verwendeten UVED in ein virtuelles Modell eines Reaktors einzusetzen. Bevor die reellen Untersuchungen (als Gegenstand des AP 2.5) durchgeführt werden, wird in einfachen Modellen mit linearer Strömung und senkrechter Bestrahlung die chemische Reaktionskinetik im Rechner nachgebildet. Für reale Gemische müssen Konzentrationen ermittelt und in die Simulationsvorgaben eingearbeitet werden. Darüber hinaus können optische Parameter, wie insbesondere die Streuung und die Eindringtiefe der Strahlung in die Gemische modelliert und ggf. gemessen als effektives Modell eingearbeitet werden. In diesem einfachsten Modell werden erste Simulationen zu den einstellbaren Reynoldszahlen durchgeführt, um Hinweise zu bekommen, inwieweit turbulente Strömungen erreichbar sind. Gleichzeitig ergeben sich Hinweise auf Totvolumina und Bypassströmungen, welche auf jeden Fall vermieden werden sollen.

Diese Simulationen zeigen, dass eine besondere Abhängigkeit von den Eigenschaften der eingesetzten Photokatalysatoren besteht. Sind diese wenig performant, so bestehen zwar Abhängigkeiten, jedoch fallen diese im Gesamtprozess nur marginal ins Gewicht. Unsere Aktivitäten richteten sich auf höher performante Materialien, welche z.T. noch erforscht werden. Potentielle Anbieter, welche wir kontaktieren, stellten uns jedoch leider keines dieser effizienteren Materialien zur Verfügung.

AP 2.3: Konstruktion/ Design der Solarkomponenten des photokatalytischen Laborreaktors Laufzeit: 06/ 2016 – 08/ 2016

Der Umsatz einer mit TiO_2 -betriebenen solaren Photokatalyse hängt im Wesentlichen vom tatsächlich vorhandenen UVA-Anteil ab. Dieser Anteil im Sonnenspektrum ist orts- und zeitabhängig. In Meereshöhe ohne Wolkendecke setzt sich der Anteil des UVA-Spektrums aus ca. 60% direkter und 40% diffuser Strahlung zusammen. Deshalb besitzen Sammelsysteme, die auf nichtabbildender Optik basieren, an dieser Stelle das höhere Einsatzpotential. Der Hauptvorteil dieser favorisierten Technik besteht darin, dass der Sammelfaktor für alle akzeptablen Zenitwinkel der Sonnenstrahlung gleich bleibt. Damit ist diese Art Kollektor geeignet, größere photokatalytische Systeme auch in entfernteren Gegenden zu betreiben. Für unsere gemäßigten Breitengrade ist bei Bewölkung besonders wichtig, dass das Streulicht ebenfalls effizient gesammelt wird.

Photokatalysator

Solarbetriebene photokatalytische Reaktoren können mit suspendiertem Pulver eines Photokatalysators betrieben werden, was jedoch eine Rückgewinnung des Katalysators in einem weiteren Verfahrensschritt erfordert. Alternativ kann der Photokatalysator auf einem Stützsubstrat (Glasgewebe, Titandioxidgitter oder Keramik) immobilisiert eingesetzt werden. Solch ein eingesetzter Photokatalysator weist hauptsächlich wegen der geringeren aktiven Obefläche im Vergleich zu den Suspensionsvarianten eine geringere Performance auf. Diese Reaktoren mit immobilisiertem Photokatalysator erfordern eine längere Verweildauer der Reaktanten oder eine größere Auslegung, um die gleiche Performance zu erzielen. Dieser Nachteil wird jedoch dadurch ausgeglichen, dass die notwendige Separation des Photokatalysators entfallen kann. So wird daraus ein besonderer Verfahrensvorteil, speziell dann, wenn nanoskalige Materialien eingesetzt und optimiert werden.

Besonderer Wert wird auf Anwendung des immobilisierten Photokatalysators gelegt, welcher in verschiedenen Konfigurationen auf seine Performance getestet werden soll, um Daten für ein Scale-up sowie für den geplanten Solar/UVED-Kombireaktor zu erhalten. Die besondere Herausforderung dieser Aufgabe besteht darin, sowohl möglichst viel Sonnenstrahlung für den Prozess auszunutzen, als auch eine hohe Effizienz des immobilisierten Photokatalysators im Vergleich zum suspendierten Material zu erreichen. Es kommt darauf an, die Wechselwirkung der im Wasser enthaltenen Substanzen mit der nutzbaren Oberfläche des Photokatalysators trotz Immobilisierung zu maximieren und mit der für den Maximalumsatz erforderlichen Menge an Strahlung zu versorgen.

Der Reaktor soll in der folgenden Ausbaustufe mit UVED kombiniert werden, um die geplanten Untersuchungen unter diesen Bedingungen durchzuführen.

Zunächst wurde ein Laborreaktor mit folgenden Parametern realisiert:
Länge: 20 cm, Durchmesser: 16 mm.

Abb.20: Laborreaktor mit Schlauchanschlüssen

Als Photokatalysator wurde immobilisiertes Kronoclean 7000 (KRONOS) eingesetzt.

Wie bereits bei den Simulationen ermittelt wurde, ergibt dieser Ansatz nur unter den Bedingungen von mindestens 66% direkter Solareinstrahlung in den Monaten April bis September in unseren Breiten für die PK Sinn. Somit muss in den Wintermonaten der angedachte erweiterte Ansatz mit Sammlung der Solarstrahlung mittels hocheffizienter Solarzellen und dem Betrieb der UVED über Pufferakkus Anwendung finden. Somit empfiehlt sich der generelle Ansatz von „solar powered“ verstärkt im europäischen Raum.

AP 2.4: UVED-Bestrahlungseinheit für den photokatalytischen Laborreaktor
Laufzeit: 03/ 2016 – 05/ 2016

Um die Entwicklungszeit des Reaktors deutlich zu reduzieren, wurden die verfügbaren Strahlungsquellen in ein virtuelles Modell des Reaktionsgefäßes eingebaut und die Bestrahlungskinetik simuliert werden. Über das vorhandene Softwarepaket COMSOL mit dem Modul „particle trace“ konnten einzelne Volumenelemente in einem Strömungsfeld verfolgt und damit die Verteilung von deren Verweildauer.

Wegen der momentan immer noch sehr hohen Preise für UVED wird nur ein einzelnes Labormodul mit optimierter Wellenlänge realisiert. Es ist aber zu beachten, dass die zu Beantragung gültigen Werte von über 15.000 Euro/W für UVC (280 nm) und 60 Euro/W für UVA (365 nm) bereits auf unter 2500 €/W für 280 nm gefallen sind und sich durch starke Konkurrenz sich dieser Trend fortsetzt. Dieses System basiert auf den in AP 1 gewonnenen Erkenntnissen sowie der gefundenen Parameter optische Leistung, Effizienz der Strahlenquelle, effiziente Einkopplung in den Reaktor und Gestalt der Strahlenquelle.

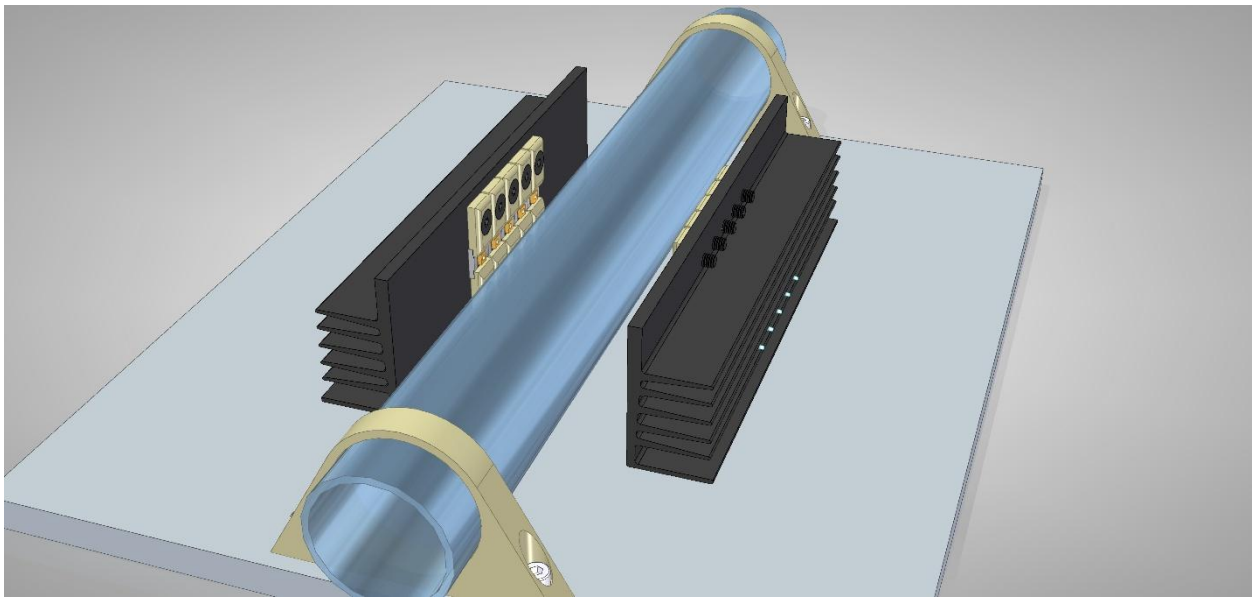

Abb. 21: Konstruktion der Bestrahlungseinheit für Laborreaktor mit Kühlkörpern

AP 2.5: Untersuchungen am Laborreaktor Laufzeit: 07/ 2016 – 01/ 2017

Im Folgenden fanden die Untersuchungen für die verschiedenen Betriebsmodi zunächst einzeln und dann kombiniert statt. Es wurden verschiedene Bestrahlungsregime sowohl mit suspendierten als auch mit immobilisierten Photokatalysatoren angewandt, um herauszufinden, welches sich als optimal für die Inaktivierung der Keime herausstellt. Der Unterschied der Wirksamkeit von intensiver Strahlung zu der mit geringerer Intensität bei gleicher Dosis sowie gepulste Strahlung wurde untersucht.

UVED- basiertes System

Am Modellsystem wurde die Wirkung unterschiedlicher Dosen von UVA- und UVC- Strahlung untersucht.

Dabei wurde kurzes, intensives Bestrahlen mit UVC, gefolgt von längerem Bestrahlen mit UVA, über die Länge des Reaktors verteilt, sowie weitere Variationen getestet. Die Variante mit gepulster Strahlung unterschiedlicher Frequenz und Duty-cycle wurde ebenfalls untersucht.

UVED-unterstützter Solarbetrieb

Am Modellsystem wurden die Wirkung unterschiedlicher Dosen von UV-Strahlung verschiedener Zusammensetzung zwischen Sonnen- und UVED-Strahlung untersucht. Dabei wurde auch gepulstes Bestrahlen sowohl mit UVC, als auch von UVA, sowie von weiteren Variationen getestet.

Für suspendierte Photokatalysatoren ergab sich, dass die Partikel nur durch den Einsatz einer Ultrazentrifuge rückgewinnbar sind, was für einen praktischen Einsatz einen nicht rechtfertigbaren Aufwand bedeutet. Somit wurde die Untersuchung der PK im suspendierten Regime aus Gründen der offensichtlichen Nichtrückgewinnbarkeit der nanoskaligen Titandioxidpartikeln ersetzt durch den Einsatz diverser immobilisierter Photokatalysatoren. Dabei wurde auf die Durchdringbarkeit der Substrate für UV- Strahlung Wert gelegt. Es kamen quarzhaltige Materialien sowie spezielle Glasfasern mit niedrigem UV-Index zum Einsatz.

Am Ende wurde ein Material eingesetzt, welches auf einem POREX-Glasfaserflies basierte. Dieses wurde durch Coating ca. 1 cm² großer Schnipsel des Materials mit suspendiertem Titandioxid hergestellt.

Abb. 22: Photokatalysator auf Basis eines POREX- Glasflieses

Die Reaktortests wurden mit dem Laboraufbau, bestehend aus Schlauchpumpe, dem mit Photokatalysator gefüllten Reaktor sowie der Bestrahlungseinheit durchgeführt.

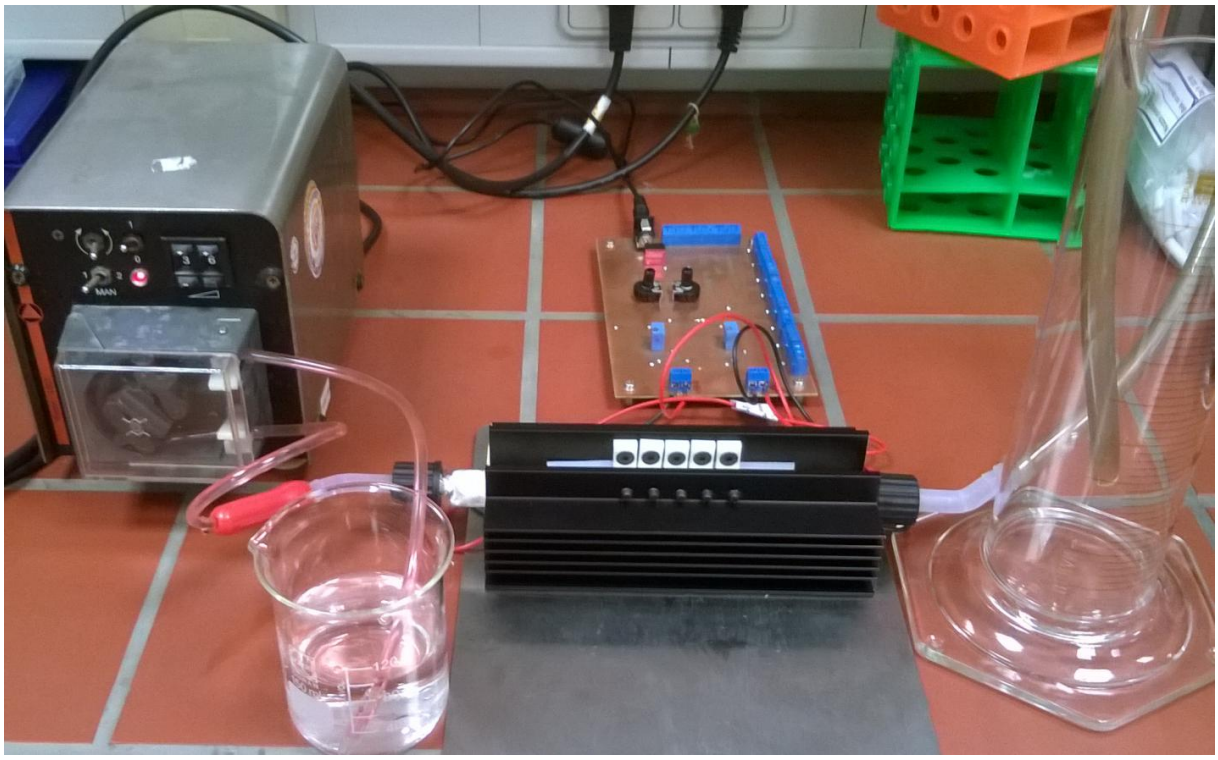

Abb. 23: Aufbau des Laborreaktors mit Bestrahlungseinheit, Schlauchpumpe und Gefäßen (ohne Strahlenschutzvorrichtung)

Dabei wurde die Farbstofflösung mit einem definierten Volumenstrom durch den Reaktor unter Bestrahlung gepumpt. Die bestrahlte Lösung wurde aufgefangen und es wurden zu bestimmten Zeiten Proben genommen und im Fluoreszenzmessplatz der Restgehalt an Farbstoff bestimmt.

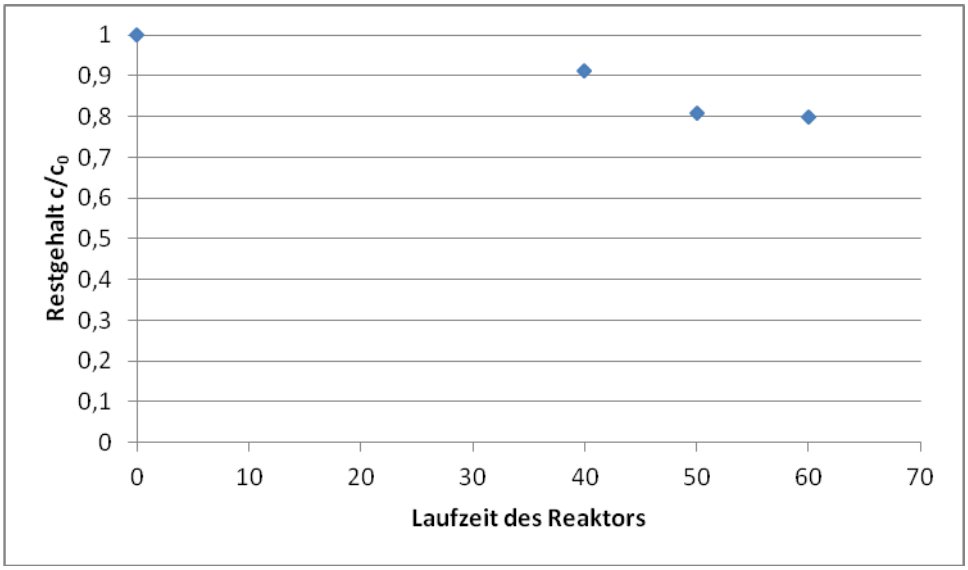

Abb. 24: Degradation von L-Tyrosin im Laborreaktor bei 365 nm und 1 ml/min

Der Restgehalt an Farbstoff stellt sich nach 50 Minuten bei ca. 80% ein, was bedeutet, dass unter den gewählten Bedingungen Fluss: 1 ml/min und einer Bestrahlungsleistung von 154 mW/cm³ eine Desinfektionsleistung von erforderlichen 4 Logstufen (siehe Nomogramm Abb. 17) überschritten wird. Je nach Strahlungsintensität und Strömungsgeschwindigkeit kann dies im Reaktorregime noch variiert werden. Wird beispielsweise der Fluss erhöht, so sinkt zwar die Desinfektionsleistung, erreicht jedoch bis zu einem bestimmten Fluss immer noch die erforderlichen 4 Logstufen; alternativ kann die Strahlungsintensität auf ein Mindestmaß verringert werden. Auch ist unklar, warum der Reaktor die angestrebte Performance nicht sofort, wie zu erwarten wäre, sondern erst nach 50 Minuten erreicht. Dies ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Optimierung des Aufbaus zur Messung des Farbstoffabbaus.

Der Einbau des Kantenfilters AHF F39-375 diente zur Unterdrückung der Anregungswellenlänge sowie der unspezifischen Fluoreszenz.

Der Bereich zur Integration der Emissionswellenlängen wurde von (312…370 nm) auf zwischen 312 und 320 nm reduziert, da für diesen Bereich die geringste Standardabweichung ermittelt wurde. Am Ende wurde so die Standardabweichung der Methode auf 45% reduziert.

Veränderung des Spektrums durch die Bestrahlung mit der Anregungslichtquelle bei 285 nm wurde als kritisch für die Genauigkeit der Messungen ermittelt. Daher wird mit kürzest möglicher Integrationsdauer gemessen.

Die Temperatur der Anregungs-UVED und damit die Strahlungsintensität wurde durch Dauerbetrieb konstant gehalten. Der alternative Betrieb: einschalten, nur wenn benötigt, führte zu größeren Abweichungen aufgrund schwankender Emissionen im relevanten Meßbereich zwischen 312 und 320 nm.

Die Untersuchungen der Wellenlängenabhängigkeit bei 365, 385 und 395 nm mit NICHIA NVSU233A sowie des geregelten Pulsbetriebes führten zu dem Ergebnis, dass die kürzeste Wellenlänge am effektivsten wirkt und der Pulsbetrieb wider Erwarten keinen meßbaren Einfluß aufweist.

AP 3: Design eines UV- unterstützten solarbetriebenen photokatalytischen Pilotreaktors (Demonstrator) Laufzeit: 12/ 2016 – 03/ 2017

Aufgrund zu erwartender hoher thermischer Belastungen der UVED bei Solarbetrieb im Konzentrator wurde von dem ursprünglich angedachten Design eines Einzelreaktors mit LED-unterstütztem Solarbetrieb Abstand genommen. Stattdessen wurde nun der Reaktor zweigeteilt: Der erste Teilreaktor beinhaltet die Solarkomponenten, der zweite den mit der UVED-Bestrahlungseinheit.

Wegen der Berücksichtigung unterschiedlich kontinuierlicher bis hin zu diskontinuierlicher, u.U. nur sporadischer Wasserverfügbarkeit wird der Rohwassertank in der selben Größe wie der Reinwassertank ausgelegt.

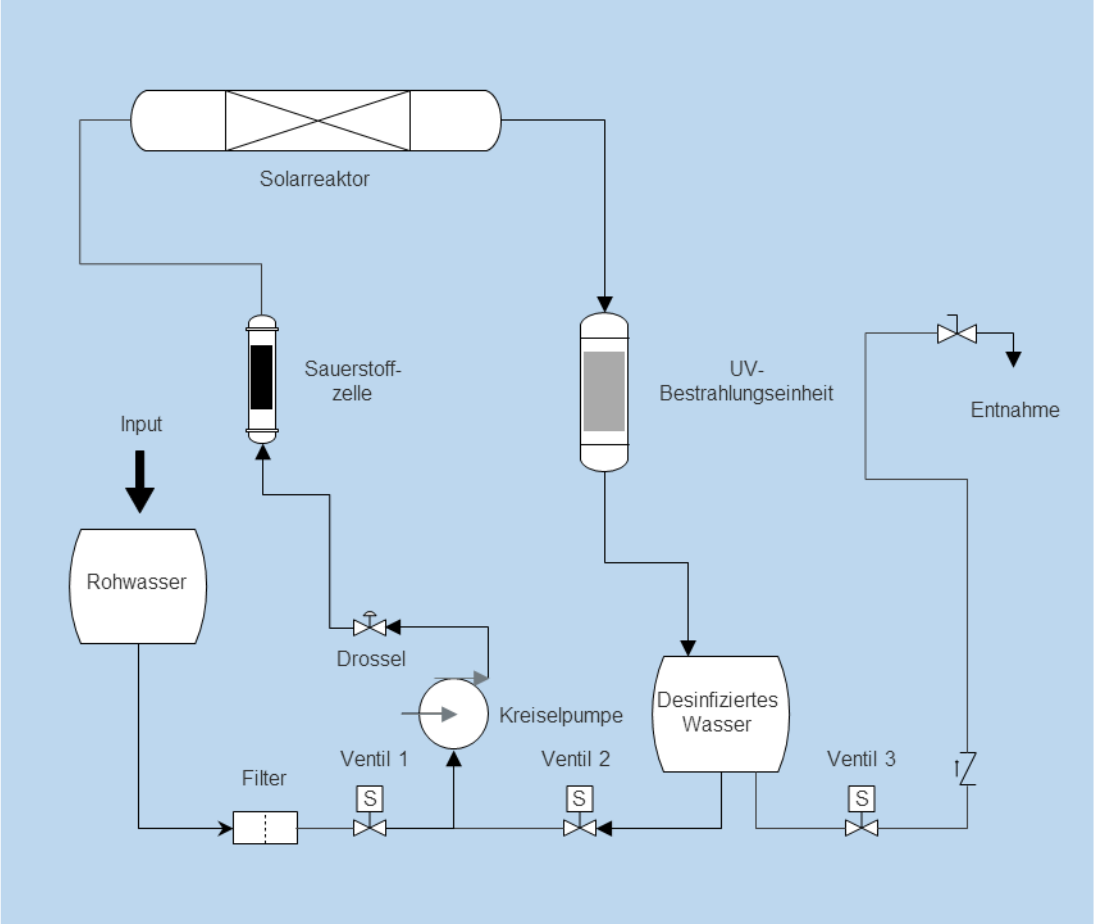

Abb.25: Demonstrator F&I-Schema.

Als wichtige Komponente wurde die Sauerstoffelektrolysezelle integriert, welche den gelösten Sauerstoff mit einem gewissen Ozonanteil für die Reaktoren zur Verfügung stellt.

Über Magnetventile werden die Flüsse in den verschiedenen Betriebszuständen des Systems eingestellt. Die Ansteuerung erfolgt über Arduino Controller.

Betrieb:

Über den Filter, welcher das Rohwasser von Fest- und Schwebstoffen befreit, gelangt es in den in den Rohwassertank. Gepumpt durch die Kreiselpumpe gelangt das Wasser aus diesem Tank über Ventil 1 und die Sauerstoffzelle in den Solarreaktor. Dort findet eine erste, durch die Solarstrahlung initiierte, photokatalytische Desinfektion des sauerstoffangereicherten Wassers statt. Anschließend wird im Reaktor mit den UV-LED weiter desinfiziert.

Betriebszustände:

Aus.

Kein Fluss. Alle Ventile geschlossen.

Solardesinfektion.

Zulaufventil (Ventil 1) offen, Umlaufventil (Ventil 2) geschlossen.

Erhaltungsdesinfektion.

Zulaufventil geschlossen. Umlaufventil offen.

Im Betriebszustand 1 **„Aus“** ruht das System. Durch die geschlossenen Ventile wird vermieden, dass Wasser unkontrolliert strömt.

Bei Betriebszustand 2 **„Desinfektion“** wird das Frischwasser durch das Zulaufventil in die Desinfektionsreaktoren gepumpt und dort desinfiziert. Anschließend gelangt das desinfizierte Wasser in den Vorratstank. In diesem sind Füllstandssensoren eingebaut, welche bei vollem Tank die Pumpe abschalten sollen.

Bei Betriebszustand 3 **„Erhaltungsdesinfektion“** rezirkuliert das bereits desinfizierte Wasser aus dem Vorratstank durch die Reaktoren und wird durch diese erneut desinfiziert, so dass die Desinfektion im Tank erhalten bleibt. Dieser Betriebszustand ist für Zeiten gedacht, in denen wenig oder kein Wasser aus dem Tank entnommen wird.

AP 3.1: "State of the Art"- Materialauswahl für den Photokatalytischen Reaktor Laufzeit: 12/ 2016 – 01/ 2017

Entsprechend der Auswahlkriterien wurden die Materialien wie folgt ausgewählt:

Photokatalysator: PARDAM Fasern, Vlies

Es handelt sich dabei um ein Material aus wenige Mikrometer dicken, langen Fasern aus reinem Titandioxyd in photokatalytisch aktiver Modifikation. Dies ist besonders einfach zu konfektionieren; für die Befüllung der Reaktoren sind keine zusätzlichen Einbauten erforderlich.

Solarreflektor: Solarofen (gosun)

Diese besonders kostengünstige Variante wurde gewählt, da selbst optimale Reflektoren nur etwa 8% mehr UV-Strahlung in den Reaktor reflektieren würden, jedoch ein mehrfaches kosten; vor allem an Arbeitsaufwand. Wie bereits bei früheren Tests (AP 2.1) festgestellt wurde, ist die Wirkung der solaren UV-Strahlung nur bei direkter Einstrahlung während der Sommermonate für die angestrebte Performance ausreichend, so dass diese wenigen Prozente Mehrleistung über den Nutzungszeitraum nicht ins Gewicht fallen würden. Somit ist statt `State of the Art` die Kostenreduktion an dieser Stelle sinnvoll.

Die Prüfung und Auswahl Komponenten für den Aufbau der Bestrahlungseinheit wurden in diesem AP mit dem Kauf im Juli 2017 endgültig beendet. Die Auswahl der optoelektronischen Komponenten ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

UVC Quelle	LG Innotec LEUVA66H70HF000 (285nm)
UVB Quelle	Nichia NCSU 275A (365 nm)
Breitband Fotodiode	SG01 D – 18ISO90
UVB Fotodiode	SG01 D B 18ISO90

Tabelle 4: endgültige Auswahl der optoelektronischen Komponenten

Aus dem Vergleich aktueller Produkte verschiedener Anbieter von UVEDs mit einem Emissionsmaximum bei ca. 280 nm folgte die Auswahl der LED LEUVA66H70HF000 des Herstellers LG Innotec statt der bisher favorisierten Nikkiso.

AP 3.2: Bestrahlungseinheit für den Demonstrator Laufzeit: 03/ 2017 – 05/ 2017

Folgende Komponenten der Strahlungsquelle auf UVED-Basis wurden realisiert:

- Strahlerplatine mit UVED, Kühlung und Befestigung
- Stromversorgung der UVEDs mit Kühlung und Ansteuerelektronik
- Streuende Reflektoren aus photokatalytischem Material
- Regelung der Strahlungsleistung

Die wechselnden Strahlungsverhältnisse sollten ursprünglich über einen Sensor für verschiedene Spektralbereiche erfasst und über eine Regelung an die Steuerung der UVED weitergegeben werden, um durch Parameteranpassung an die Gegebenheiten optimale Ergebnisse zu erzielen und gleichzeitig zu dokumentieren. Diese Zielstellung wurde für den Demonstrator wegen der Designänderungen verworfen.
Das Reflektorsystem wird auf die ähnliche Weise wie der Laboraufbau realisiert. Zusätzlich wird zur Fixierung des photokatalytischen Materials ein Drahtgitter, welches ebenfalls mit Titandioxid beschichtet ist, eingesetzt.
Anstelle des ursprünglich vorgesehenen Kombimoduls mit Reaktor wurden jeweils ein Solarmodul und ein LED-Bestrahlungsmodul mit Reaktor realisiert; also ein Solarreaktor und ein UV-Reaktor. Das Solarmodul wurde über die Anpassung und den Einbau des aus Quarz gefertigten Solarreaktors in den Reflektor eines kommerziellen Solarkochers (GoSun Sport von GoSun Inc.) realisiert.

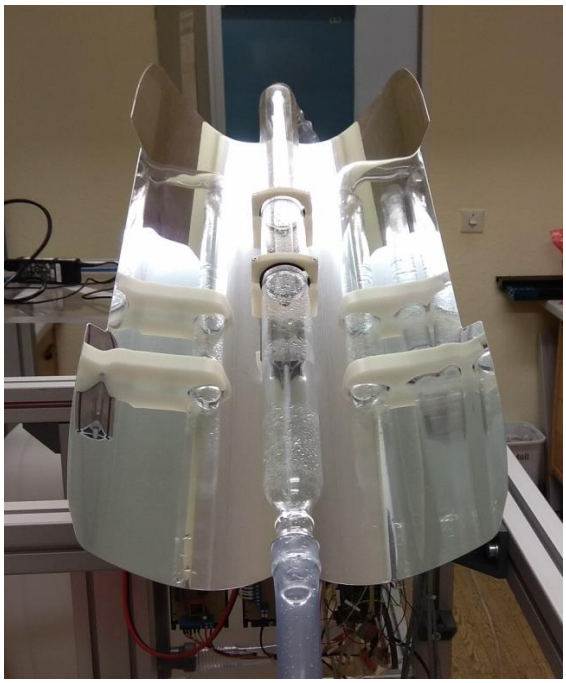

Abb. 26: Solarreaktor ohne Photokatalysator

Das LED-Bestrahlungsmodul wurde so ausgelegt, dass es in den Quarzfinger der Bitron-Oase-Einheit passte. Diese ist auf einfache Weise demontierbar.

Die Strahlungsleistung wurde mit 16 W 365nm und 600 mW 285nm festgelegt. Daraus ergibt sich der erforderliche Strom für das Modul sowie die Kühlungsleistung von ca. 65W.

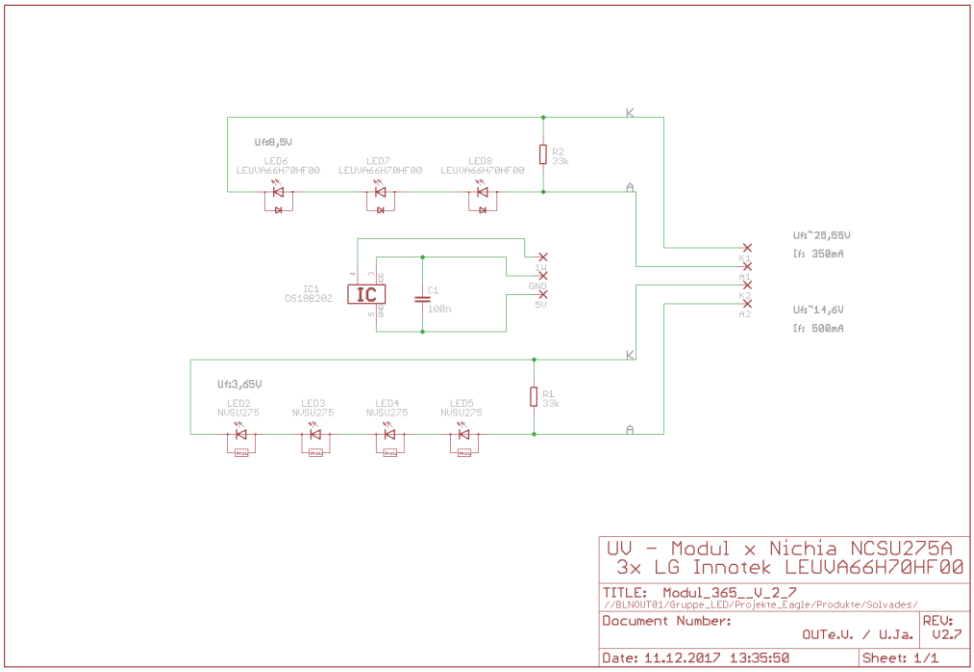

Abb.27: Schaltplan der UVED

Abb.28: Platine für die HL-UVED

Die Platinen des Bestrahlungsmoduls wurden in 90°-Anordnung auf einen Kupferstab mit 18 mm Kantenlänge montiert, in dessen Inneren eine Heatpipe mit 10 mm Durchmesser integriert wurde.

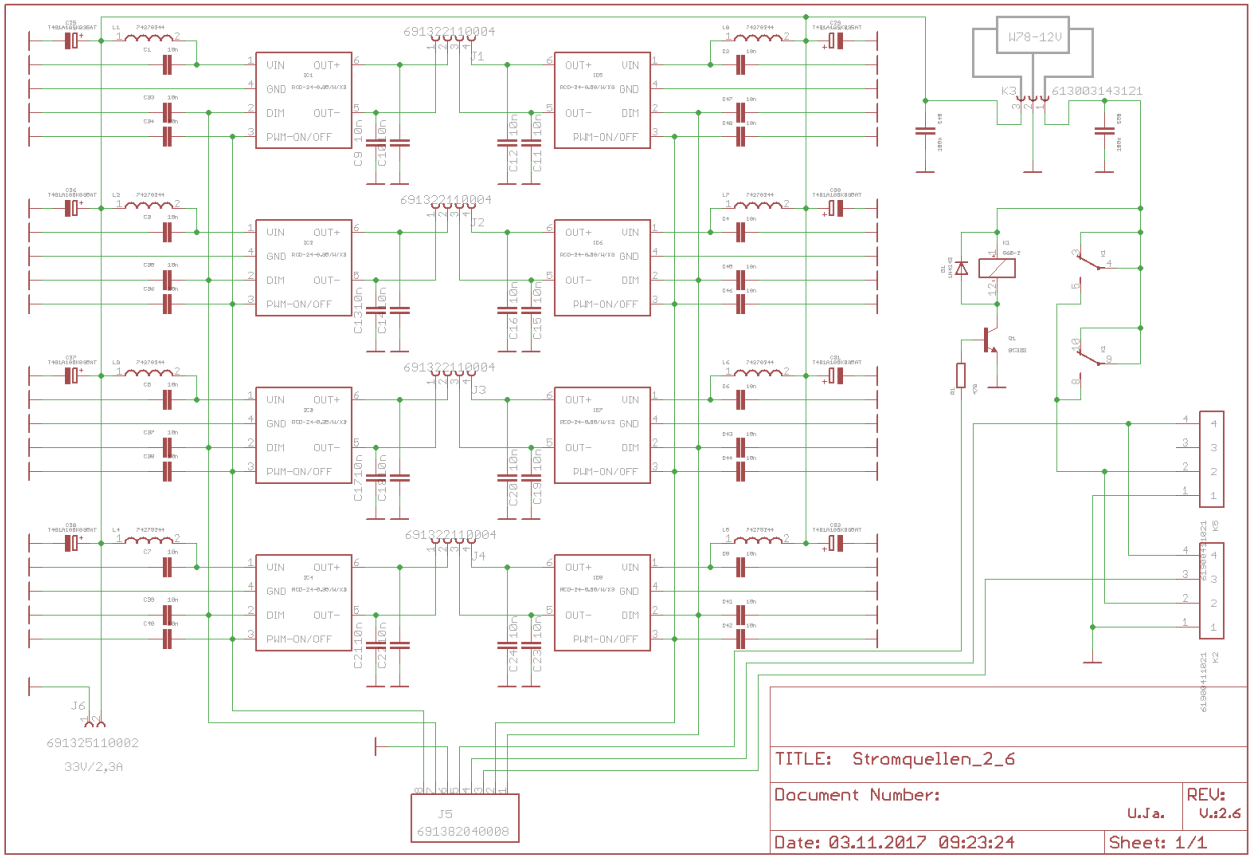

Abb.29: Schaltplan der Stromquellen für die UVED

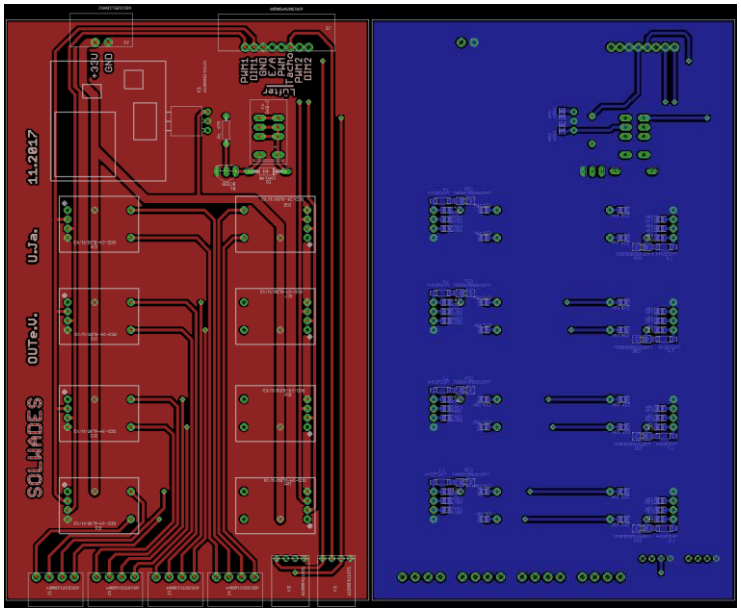

Abb.30: Platinen für die Stromquellen RS und VS

Die Heatpipe wurde erforderlich, da der Kupferstab allein die Wärmemenge nicht in ausreichendem Maße abführen kann (siehe Simulation)

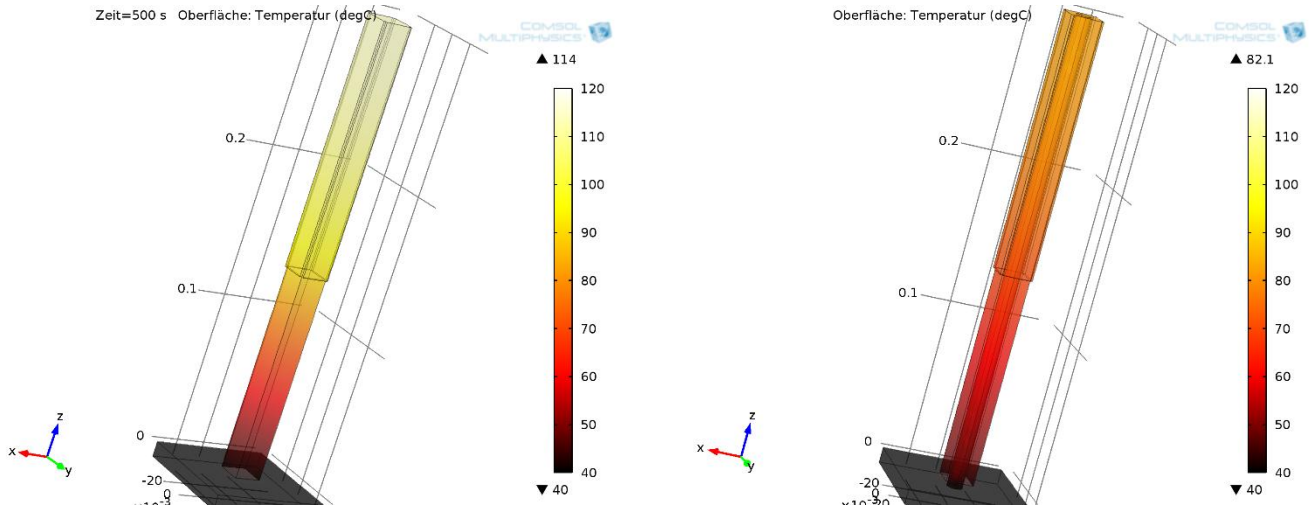

Abb.31 Simulation der Wärmeverteilung im Kühlkörper ohne und mit Heatpipe (re.)

Auf diese Weise wird die zulässige Betriebstemperatur der LED nicht überschritten. Dieses Modul wurde in eine als Halterung dienende eingegossene Schiene montiert. Dadurch bleibt die Einheit einfach demontierbar. Die aktive Kühlung wird durch einen handelsüblichen CPU-Kühler mit Lüfter realisiert, welcher am Ende der Heatpipe arbeitet.

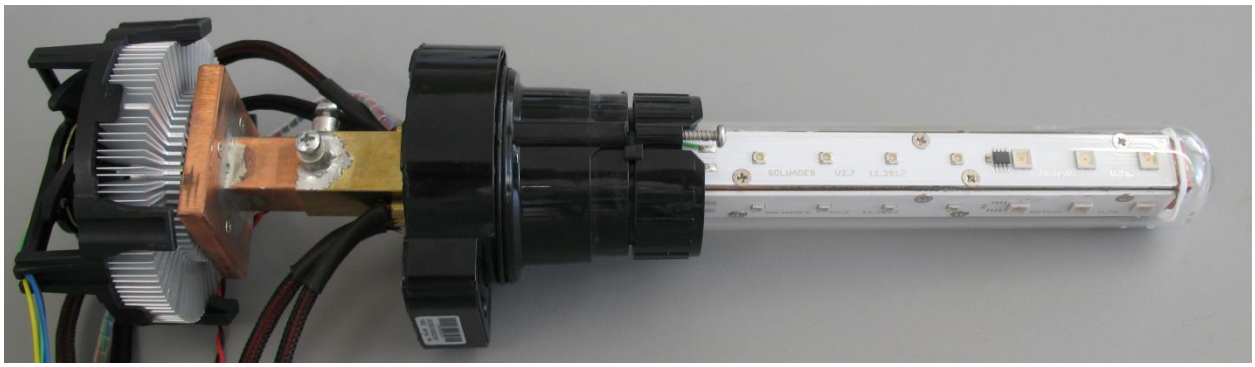

Abb. 32: Bestrahlungseinheit mit Quarzfinger und Kühler in Halterung eingebaut (Bild)

Die Regelung der UV-Strahlung beider Wellenlängen erfolgt über die Pulsweitensteuerung der Konstantstromquellen. Aus der Anordnung der LED in Blöcken zu je 4 LED in Serie ergibt sich die erforderliche Spannung. Die Stromversorgung wurde letztendlich mit 2x36V/ 2A realisiert.

AP 3.3: Demonstrator Laufzeit: 06/ 2017 – 08/ 2017

Dieser Demonstrator wurde von Vornherein als mobiles Gerät mit allen Optionen ausgelegt, um dessen Funktion an verschiedenen Orten zu testen. Folgende Komponenten des Demonstrators wurden realisiert:

- Steuereinheit zur Regelung der Strahlungsleistung
- Einbau der Bestrahlungseinheit sowie Einkopplung der Strahlung über Quarzfenster
- Stromversorgung des Gesamtsystems mit Kühlung und Ansteuerelektronik
- Pumpen und Ventile zur Flusssteuerung.

Die Steuereinheit ermöglicht, alle relevanten Parameter abhängig von Sensorsignalen variabel zu steuern.

Der gesamte Demonstrator wurde in ein eigens dafür konstruiertes Gestell 160x80x160 cm auf der Basis des MINITEC-Systems aus Aluminiumprofilen aufgebaut.

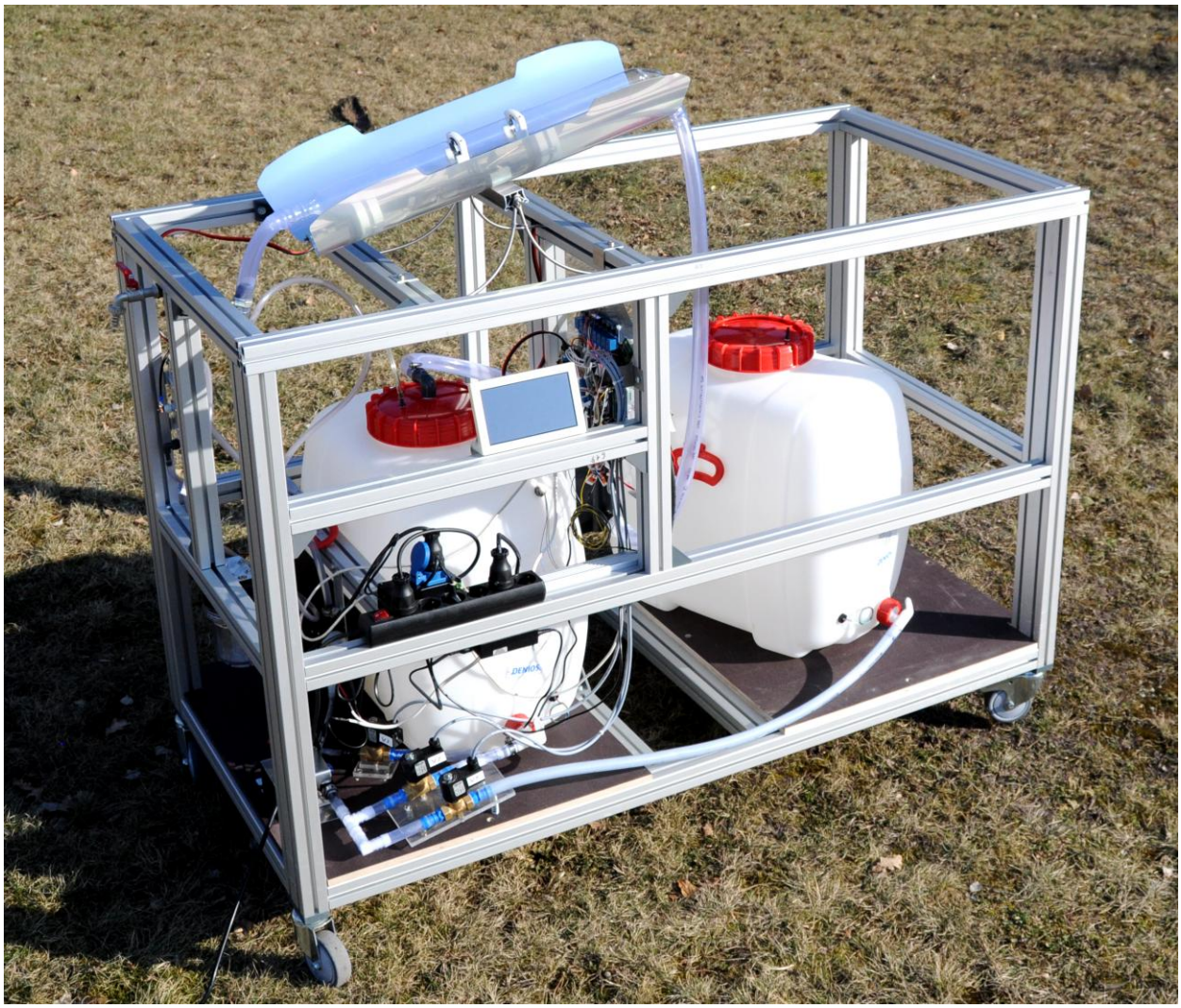

Abb. 33: Demonstrator Gesamtaufbau in Schrägansicht

Die Steuereinheit wurde auf der Basis eines Arduino-Embedded-Systems realisiert und diese über einen Mini-PC auf Windows-Basis (LATTEPANDA) gesteuert. Diese Einheit dient zur Steuerung der Betriebszustände respektive der Regelung der Strahlungsleistung. Als Bedienteil und Anzeige dient ein dazugehöriger Mini-Touchscreen.

Sowohl für das Embedded-System als auch für den Mini-PC wurde jeweils eine Software entwickelt und angepaßt, welche die einzelnen Funktionen sowie die Gesamtsteuerung ermöglicht.

Die Bestrahlungseinheit wurde in ein Bitron-Oase 11 –Gerät anstelle der dort verwendeten Hg-UV-Leuchtstofflampe eingesetzt. Auf diese Weise konnte das vorhandene Quarzfenster (in Fingerform) verwendet werden.

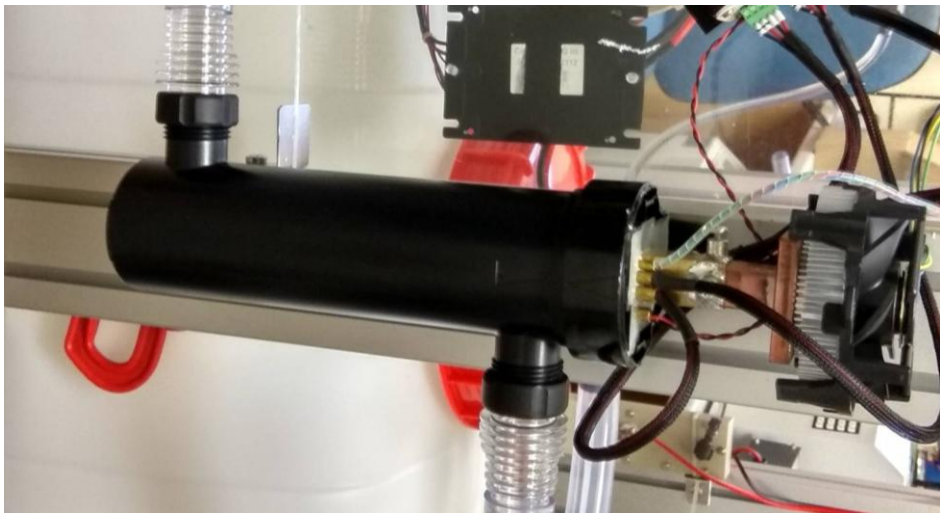

Abb. 34: Reaktor mit eingebauter Bestrahlungseinheit (liegende Darstellung)

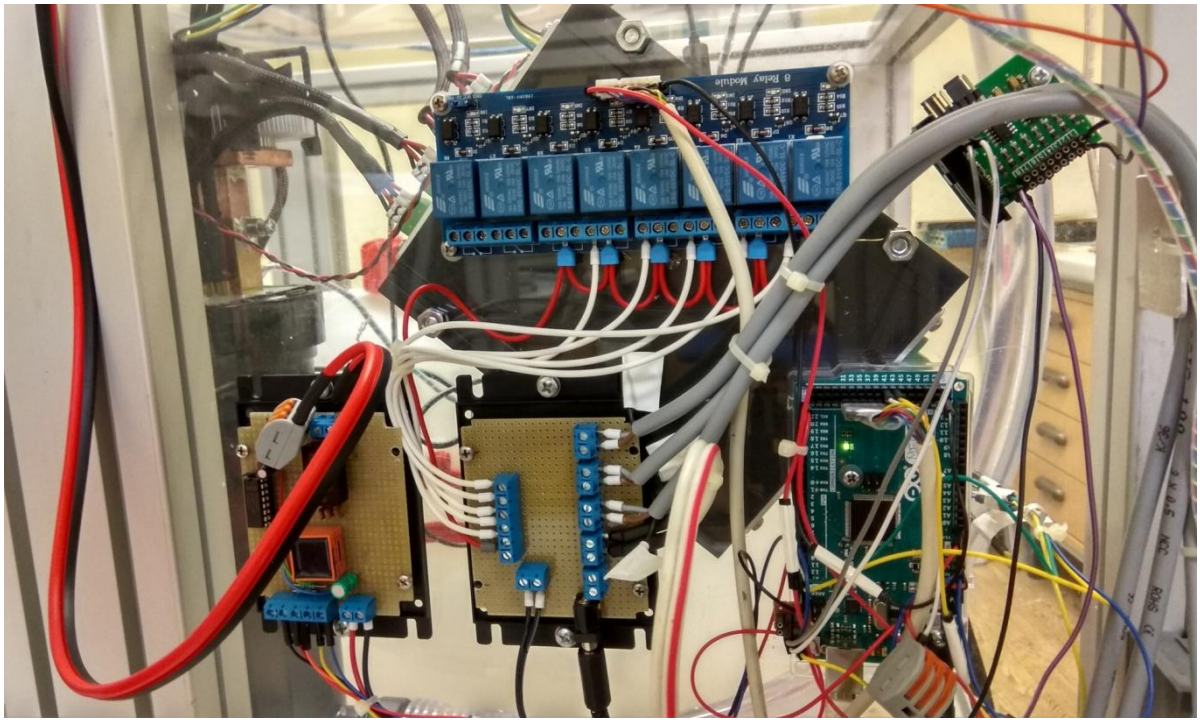

Abb. 35: Komponenten der Steuereinheit mit Relayarray (o.), Stromregler (li.) sowie Arduino (re.)

Stromversorgung:

Zur Stromversorgung wurde ein Netzteil der Fa. Meanwell mit 36V und 12 A eingesetzt, welches mit den passenden Verteiladaptern versehen und mit der Steuereinheit sowie der Stromregelung für den Sauerstoffgenerator verbunden wurde.

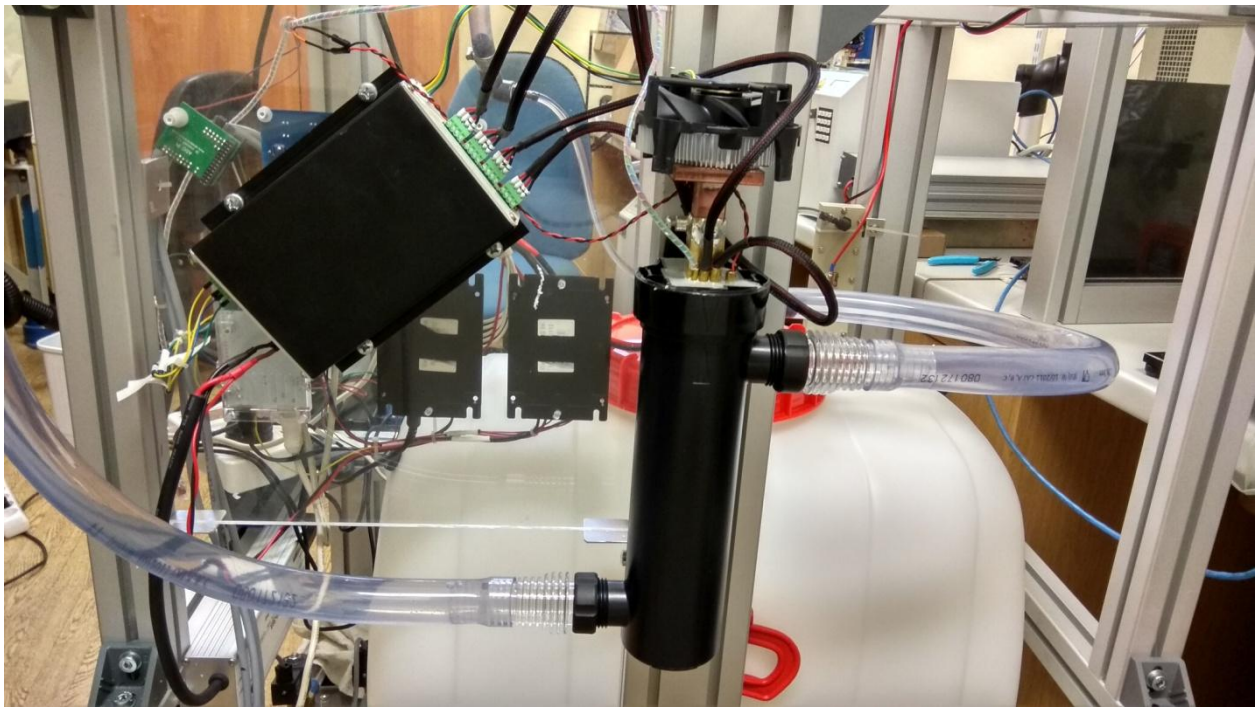

Abb. 36: Stromversorgungseinheit und Bestrahlungseinheit (eingebaut)

Die vereinfachte Geometrie des Reaktors zusammen mit dem stark streuenden Material des mit Photokatalysator beschichteten Vlieses bewirkt eine homogene Strahlungsverteilung in dessen Innerem.

Die verschiedenen Flüsse werden über drei Magnetventile sowie den Pumpenmotor geregelt, welche über Relais angesteuert werden.

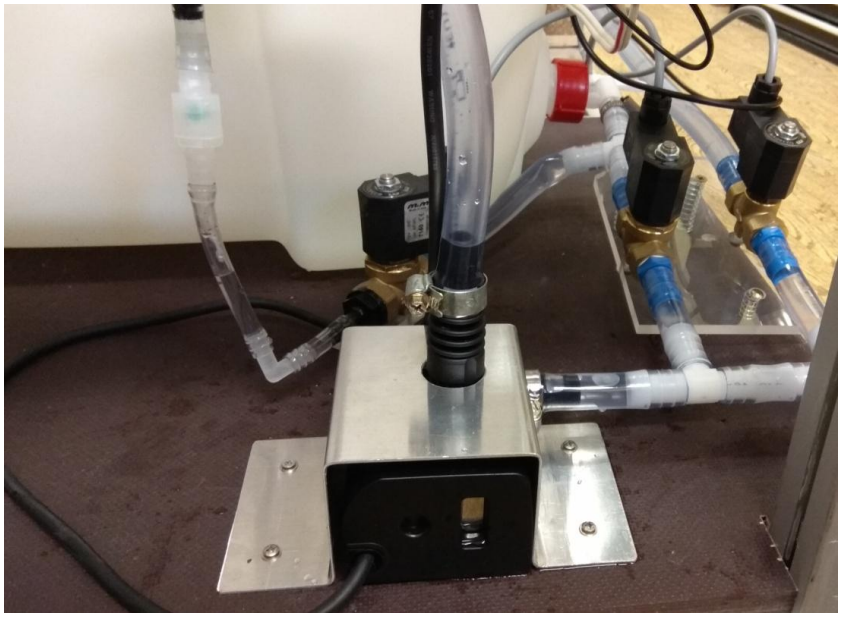

Abb. 37: Ventile und Hauptpumpe

Auf die Messung des pH-Wertes wurde verzichtet. Der Sauerstoffgehalt wird nicht geregelt, sondern über das Verhältnis von Stromfluss zu Volumenstrom durch die Ozonzelle eingestellt. Ein höherer Sauerstoffgehalt bewirkt in jedem Falle eine höhere Desinfektionsleistung des Systems.

Abb. 37: eingebaute Sauerstoffzelle

Der UV-Reaktor ist durch seinen Aufbau selbst für UV-Strahlung nach außen undurchlässig und erfüllt damit die Anforderungen an den Strahlenschutz.

AP 3.4: Untersuchungen mit dem Demonstrator Laufzeit: 09/ 2017 – 10/ 2017

Es wurden verschiedene Bestrahlungsregime mit immobilisierten Photokatalysatoren angewandt, um herauszufinden, welches sich als optimal für die Inaktivierung der Keime herausstellt. Dabei wurde durch Bestrahlen sowohl mit UVC, als auch von UVA sowie weiteren Variationen mit Solarer Bestrahlung getestet.

Mit Hilfe des innovativen Ansatzes gepulster Strahlung sollte eigentlich eine Performancesteigerung bei allen Betriebszuständen erreicht werden. Diese konnte bereits bei den Untersuchungen mit dem Laborreaktor (AP 2.5) nicht gefunden werden und wurde deshalb in diesem AP nicht durchgeführt.

Am Ende wurde die Desinfektionsleistung des Gesamtaufbaus über repräsentative Modellorganismen E.coli K12 in Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer bluebiolabs bestimmt. Zuletzt wurde die Performance auch unter realistischen Bedingungen mit einem natürlichen Flußwasser aus der Spree bzw. dem Landwehrkanal bestimmt.

Dabei ergaben sich durch das analytische Verfahren bedingte Schwierigkeiten. Beispielsweise erwiesen sich die vorhandenen Totvolumina an verschiedenen Stellen des Demonstrators als nachteilig. Ebenso wurde bei den Tests die Möglichkeit einer einfachen, vollständigen Entleerung des Gesamtsystems vermißt. Dies war leider bei der Konzeptionierung noch nicht bedacht worden.

Probleme durch Desinfektionsmittel

Als Hauptproblem erwies sich erst nach etlichen, schwer erklärlichen Testresultaten, dass sich offenbar noch Reste des eingesetzten Desinfektionsmittels Natriumhypochlorit (oder gar freies Chlor) befanden, welche in Teile der Anlage eindiffundiert waren und langsam wieder freigesetzt wurden. Da das Budget für diese Testreihen feststand, konnten nur einige wiederholt werden, sodass aus den Testergebnissen nicht alle geplanten Fragestellungen beantwortet werden können.

Der Einsatz des Desinfektionsmittels für die Grunddesinfektion der Anlage, die für die Arbeit mit dem Modellsystem unabdingbar war, wurde notwendig, um die Anlage für die Tests mit den Bakteriensuspensionen vor dem Start in einen definierten, reproduzierbaren Anfangszustand zu versetzen.

Bei der gesamten Meßkampagne erwies sich die große Hilfsbereitschaft des Auftragnehmers bluebiolabs sowie eine hohe Flexibilität bei der Versuchsvorbereitung und Betreuung in deren Laboren als sehr hilfreich.

Nach Teilumbauten und Anpassung der Anlage an diesen Testbetrieb konnten danach ausgewählte Tests mit Einschränkungen gefahren werden.

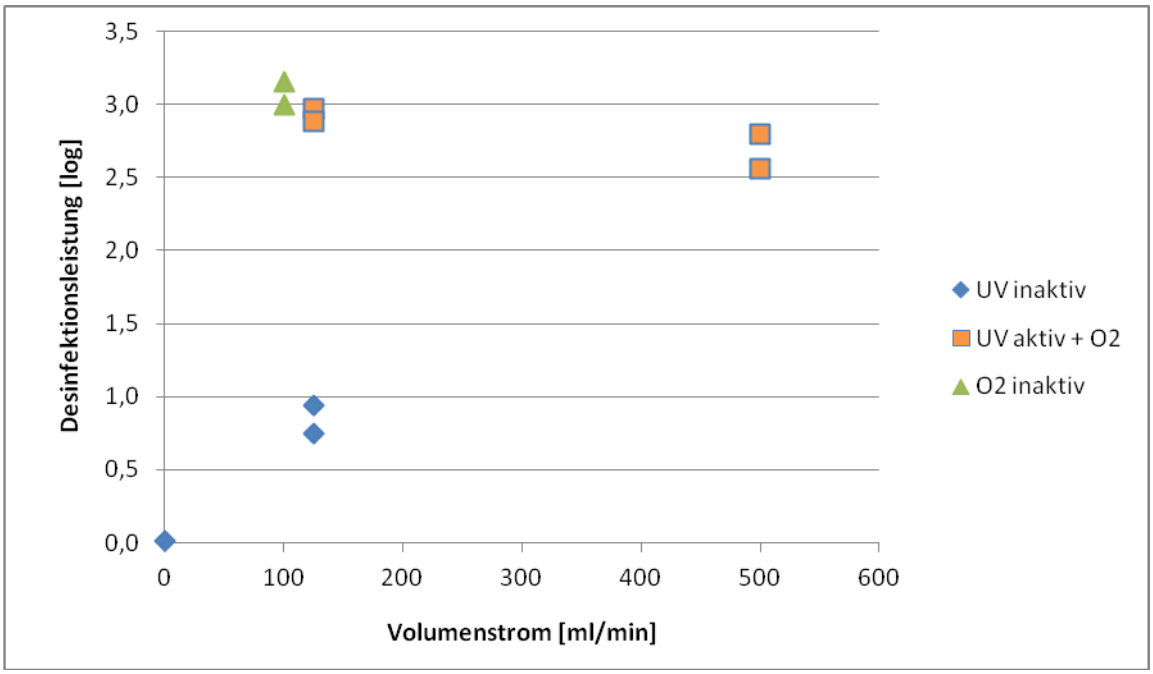

Abb. 38: Volumenstromabhängige Desinfektionsleistung

Die geringe Desinfektionsleistung des photokatalytischen Regimes im Vergleich zu den Ergebnissen mit Farbstoff unter UVC-Bestrahlung allein kann auf die unterschiedliche Verteilung der reaktiven Spezies beruhen. Es wird als wahrscheinlich erachtet, dass die Modellannahme inkorrekt ist, nach der die Desinfektionsleistung mit dem Farbstoffabbau unter den gewählten Bedingungen immer gleichermaßen korreliert. Dies betrifft das photokatalytische Regime verglichen mit der reinen UVC-Bestrahlung. Desweiteren kommen Inhomogenitäten im Katalysatorbett als Ursache in Frage, die eine Kanalbildung verursachen und somit stark unterschiedliche Desinfektionsleistungen unterschiedlicher Flüssigkeitsanteile.

Rezirkulationsmodus

Dabei wird Wasser aus dem Tank mit dem desinfizierten Wasser über die Desinfektionsstufen im Kreislauf gefahren (Erhaltungsdesinfektion). Zur Ermittlung der Desinfektionsleistung wurde mit Bakterien versetztes Spreewasser eingesetzt.

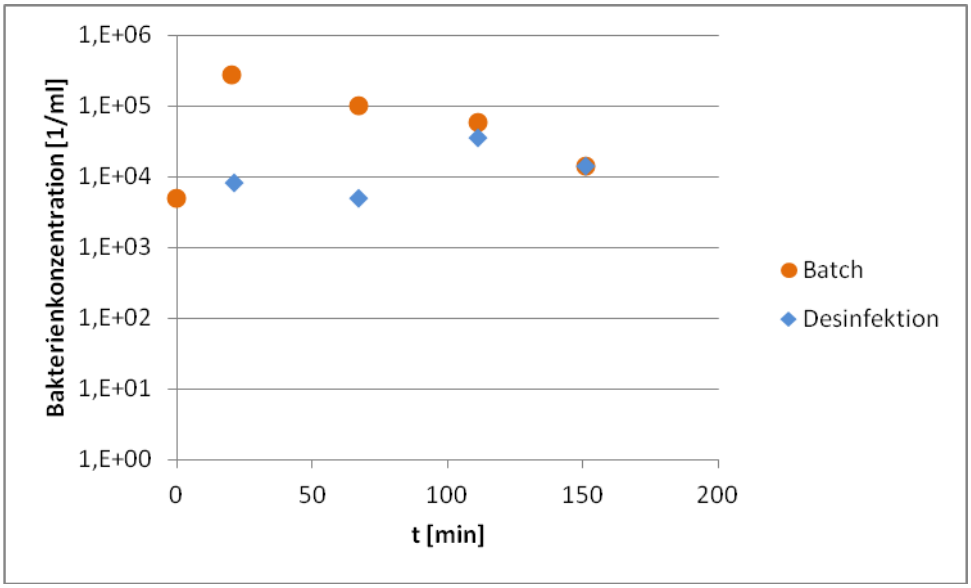

Abb. 39: Bakterienkonzentrationsverlauf im Betriebszustand „Rezirkulation“

In einem abschließenden Testlauf wurde bei einer elektrischen Gesamtleistung von 42,8 W für UVC und Sauerstofferzeugung (3,5 W) im Batch von 25 Litern eine Reduktion der KBE von einer Log-Stufe innerhalb von zwei Stunden erreicht. Dies ist im Vergleich zu herkömmlichen UV-Desinfektionsanlagen natürlich sehr wenig; jedoch beträgt die eingestrahlte UVC-Leistung bei 280nm hier eben nur max. 600 mW und es geht um Erhalt der Qualität des desinfizierten Wassers, welches normalerweise im Tank vorliegt.

Schwer erklärlich ist der Befund, dass aus der Desinfektionsstufe kommendes Wasser mit der Zeit keine höhere Qualität aufweist, als aus dem Tank direkt entnommenes. Eine Möglichkeit der Erklärung besteht darin, dass es sich bei diesen nachgewiesenen Spezies um Kolonien oder Aggregationen von Bakterien handelte, welche prinzipiell schwerer abzutöten sind und deren Widerstandfähigkeiten im Rahmen der durchgeführten Tests nicht extra betrachtet wurden.

Bei der geringen Effizienz des Desinfektionsprozesses mit Photokatalysator konnte im Untersuchungszeitraum kein alternatives Material dafür gefunden werden. So blieb nur die

Erhöhung der Verweildauern im Reaktor.

Die Gesamt-Desinfektionsleistung setzt sich aus den Leistungen der einzelnen Komponenten sowie einer Synergieleistung zusammen, welche davon herrührt, dass im ersten Prozeßschritt vorgeschädigte Mikroorganismen, welche ansonsten weiter pathogen bleiben würden, im Folgeprozeß endgültig inaktiviert werden. Der wichtigste Schritt dabei ist die elektrolytische Anreicherung des Wassers mit Sauerstoff, welche bereits selbst eine gewisse Desinfektionsleistung bewirkt. Die Abweichungen von dem erwarteten Verhalten können über durchaus vorkommende Adsorption/ Desorption von Mikroorganismen in Anlagenteilen erklärt werden.

AP 4: Bewertung Laufzeit: 11/ 2017

Das Hauptproblem dieses Systems stellt der Photokatalytische Prozeß sowie dessen Aufrechterhaltung dar. Dabei spielt die Kontaktdauer der reaktiven Spezies zum Photokatalysator eine entscheidende Rolle. Als Nebenbedingung ist eine ständige Bestrahlung der gesamten (also auch der inneren) Oberfläche mit Strahlung geeigneter Energie einzuhalten.

Der photokatalytische Prozeß der Desinfektion führt nur unter optimalen Bedingungen zu einer akzeptablen Desinfektionsleistung. Diese sind unter solaren Bedingungen nur sehr aufwändig zu realisieren. Damit ist die Verfügbarkeit einer Mindestdesinfektionsleistung stark von der Witterung abhängig, was dessen Einsatzbereich erheblich einschränkt.
Im Betrieb sinkt die Effizienz des photokatalytischen Prozesses und eine Regeneration kann nur durch Austausch des Katalysators erfolgen. Es entstehen irreversible Performanceverluste bei Nichtbetrieb oder Havarie (z.B. Verunreinigungen). Im behandelten Wasser vorhandene Titandioxidpartikel vom Abrieb des Photokatalysators.

Der Aufbau einer solchen immobilisierten photokatalytischen Schicht ähnelt dem einer Filterkartusche mit ebensolchen Anforderungen an die Präzision. Wird diese nicht erfüllt, kommt es zu Flussinhomogenitäten einhergehend mit einem starken Abfall der Desinfektionsleistung. Außerdem müßte noch ein Hersteller gefunden werden, der bereit und in der Lage ist, mit dem neuen Material einen oder mehrere Kartuschenarten zu entwickeln und deren Markteinführung zu riskieren.

Durch diese Nachteile wird das gesamte System sehr wartungsintensiv, was gegen eine Verwendung in abgelegenen Gegenden spricht.

Ausgehend vom apparativen Mindestaufwand für diese Art der Desinfektionsanlage mit Pumpe und Lagertank, sollte im Gesamtdesign, welches auf Kompaktheit abzielt, auf die voluminöse solare photokatalytische Komponente verzichtet werden. Es erscheint aus technologischer Sicht viel sinnvoller, die Solarenergie in einem kompakten Konzentrator in eine Hochleistungssolarzelle zu bündeln und damit die ebenso kompakte UVED-basierte Anlage mit Energie zu versorgen. Damit wäre eine mobile, autarke Lösung verfügbar. Dieser Ansatz wird bei der Dissemination der Projektergebnisse eine wichtige Rolle spielen.

Totvolumen

Mit steigender Größe des Photokatalytischen Reaktors, welche zum Erreichen einer nennenswerten Effizienz erforderlich ist, steigt neben dem Preis für die UV-transparente Wandung und dem Konzentrator auch das Volumen der ganzen Anlage insgesamt. Dies führt neben erhöhten Anforderungen an die Festigkeit und Tragfähigkeit der betreffenden Komponenten sowie der Befestigungselemente auch zu praktischen Problemen bei Befüllung, Entleerung und dem Transport der Anlage. Das große Totvolumen wirkt sich ungünstig im Zusammenhang mit angestrebter Keimfreiheit aus, da solche Anlagenbereiche mit ruhender Flüssigkeit gerade im Zusammenhang mit einer großen Oberfläche, wie sie das photokatalytische Material zwingend aufweist, ungewollt als Quelle von Verkeimung wirken können. (Nicht immer werden 100% des PK von Sonne beschienen und somit desinfiziert. Und: gerade bei Aufstellung in abgelegenen Gebieten steht eine dann erforderliche alternative Desinfektionsmöglichkeit für die Gesamtanlage eher nicht zur Verfügung.)

Kälteanfälligkeit

Es besteht die Gefahr von Frostschäden an der Anlage, sodass diese nur unter frostfreien Bedingungen betrieben werden sollte. Bei Frostgefahr muss die Anlage entleert werden.

Der erfolgreiche Test des Demonstrators bei der Desinfektion ausschließlich mit UVED zeigt, dass der Einsatz von UV-LED zur Desinfektion einen geeigneten Ansatz zur Substitution von HG-UV-Strahlern darstellt und praktikabel ist. Derzeit ist die Anschaffung und der Betrieb einer solchen Anlage noch unwirtschaftlich.

AP 5: Festlegung der Machbarkeitsbedingungen für den Demonstrator Laufzeit: 12/ 2017

Für die Wasserdesinfektion ist ein direkt solar getriebener photokatalytischer Prozess nur unter folgenden Umständen sinnvoll:

- die Qualität des zu behandelnden Wassers sollte Mindestanforderungen genügen; also keine Partikel, Gele und wenig Schwermetallionen beinhalten, welche den Photokatalysator dauerhaft verunreinigen oder vergiften könnten.
- Die Desinfektionsleistung sollte nur zusätzlich zu bestehenden Prozessen erbracht werden, um diese energetisch zu entlasten. Dazu ist jedoch die Qualität des desinfizierten Wassers zu prüfen.
- Der Flächenverbrauch sollte unkritisch sein.
- Die Flächenbelastung der Konstruktion durch Wind muss berücksichtigt werden.
- Frostbelastung muss ausgeschlossen werden können.

Dabei spielen der Umwelt- und Standorteinfluss eine wichtige Rolle:

- Verfügbarkeit von Wasser ausreichender Qualität ist entscheidend.
- Solarenergie Eigenversorgung (warum) oder
- Solarenergie Mitversorgung durch Objekt (höhere Flexibilität bei geringerem Preis)

Vergleich zu bestehenden Systemen:

Verfahren	Betriebsart	P [W]	V [l/h]	Perf. [l/kJ]	Perf-Vergl. [%]
SOLWADES	UV	72	9	0,035	0,20
SOLWADES	UV-Rezirkulation	42	7,5	0,050	0,29
Purion	UV	17	1000	16,3	94,1
UST Pure	UV	21	1200	15,9	91,4
REDO WaterSystems	Cl_2 -Elektrolyse	16	1000	17,4	100,0
SODIS [2]	rein solar	10	0,17	0,005	0,027

Tabelle 5: Desinfektionsleistungsvergleich verschiedener Anbieter und Verfahren

Dieser Vergleich zeigt, dass das SOLWADES-System von der Größenordnung der Performance noch sehr weit von bestehenden Systemen entfernt einzuordnen ist. Dies ist hauptsächlich mit dem noch sehr niedrigen Wirkungsgrad der UVED zu erklären. Eine Vorhersage, wann die Weiterentwicklung der UVED zu einer ähnlichen Performance, wie aktuelle Hg-Strahler führt, ergibt sich wie bereits für die Investitionskosten aus dem sog. „Haizschen Gesetz“: wenn sich demnach die Lichtausbeute bei LEDs alle 18-24 Monate verdoppelt, so wird eine akzeptable Größenordnung erst in ca. 10 Jahren erreicht.

Aus all dem folgt, dass die auf dem Demonstrator basierende Technologie erst in 5-7 Jahren zu einem konkurrenzfähigen Produkt weiterentwickelt werden und erst danach vermarktet werden kann.

Im autarken Betrieb (solar powered) spiegelt sich der höhere Stromverbrauch über steigende Investitionskosten wider. Unter diesen Umständen konkurriert man auch immer mit dem preiswertesten aller Systeme, dem SODIS-System, welches praktisch kostenlos betreibbar ist.

3. Bewertung der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen des Antrages, Bezugnahme auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, Bezugnahme auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Es wurden Photodetektoren für die interessierenden Wellenlängenbereiche 285 nm sowie 365 nm zur Messung der Strahlungsleistung realisiert. Es wurden Bestrahlungseinheiten sowie die erforderliche Steuereinheit zur Pulssteuerung für die Wellenlängen 285 nm, 365 nm, 385 nm realisiert.
Bei den Dosisuntersuchungen wurde eine sehr gute Performance der UVC-ED gefunden.

Es wurde ein Verfahren zur Abschätzung der Desinfektionsleistung von UV-Strahlung auf der Basis der Degradation von Tyrosin etabliert. Diese Verbindung verhält sich unter UV-Strahlung ähnlich wie die DNA der Mikroorganismen, welche durch die Behandlung ja geschädigt oder an der Vermehrung gehindert werden sollen.

Es wurde ein Demonstrator aufgebaut, dessen Performance im Bereich UV-Desinfektion mittels UV-LEDs und solarbetrieben untersucht wurde.

Das Konzept der UVED-unterstützten solarbetriebenen photokatalytischen Anlage erwies sich in allen untersuchten Wellenlängenbereichen und Betriebszuständen als wenig performant. Die Tests des mit UVED betriebenen, mit immobilisiertem Photokatalysator gefüllten Reaktors ergaben, dass mit Farbstoff eine äquivalente Desinfektionsleistung von erforderlichen 4 Logstufen erreicht wird. Weitere Tests mit dem Demonstrator mit realen Bakteriensuspensionen ergaben, dass jedoch nur 3 Logstufen erreicht werden.

Die Maße zum Transport gedachter Geräte ist auf die Maße einer Europalette zu beschränken, da sonst transportbedingte Probleme v.a. bei Türen und Fahrstühlen auftreten.

Die gesteckten Ziele konnten wegen der letztendlich zu geringen Performance des Photokatalytischen Prozesses nicht erreicht werden. Jedoch wurde dabei die Wirksamkeit der UVC-LED in einer Anlage mit einem kontinuierlich betriebenen Prozeß gezeigt.

Einschätzung der Erfolgsaussichten des Vorhabens

Aufgrund der bisher erreichten Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die entwickelte Technologie noch nicht marktreif ist. Wesentlich für die Erfolgsaussichten werden sich Entwicklungen auf den Märkten der UVED auswirken. Hier haben bereits die meisten Anbieter von UV-Desinfektionstechnik konkrete Projekte der Produktentwicklung und Markteinführung, die in diesem Zusammenhang nur auf den Produktrelease der neusten UVC-Produkte warten, welche diese dann zu exklusiven Konditionen erwerben können. Dies führt dazu, dass Akteure wie wir erst später oder zu weniger guten Konditionen mit solchen Bauteilen versorgt werden und erst später oder nach längerer Entwicklungs- und Optimierungsdauer in den Markt eintreten. Damit bleiben prinzipiell wahrscheinlich nur Nischenanwendungen übrig.
Anhand der Performance der UV-ED im Zusammenhang mit aktuellen Entwicklungen im Bereich breitbandiger Photokatalysatoren kann hier die Anwendung einer Desinfektion bei gleichzeitigem Abbau organischer Schadstoffe ins Auge gefasst werden, welches kein Strahler allein ohne Katalysator leisten kann.

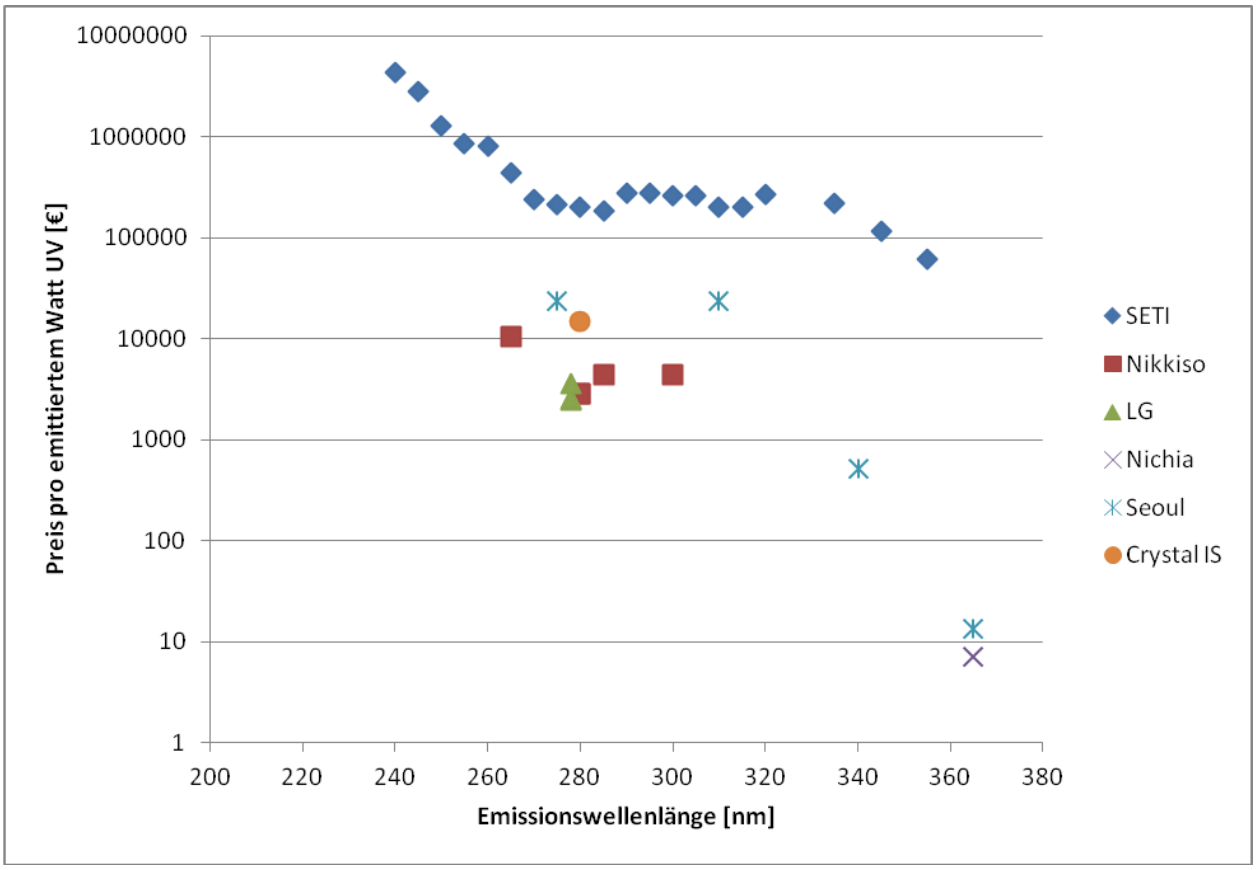

Abb. 40: aktuelle Preise (Stand: 10/2017) von UVED verschiedener Hersteller

Die exponentielle Zunahme der Investitionskosten mit kürzerer Wellenlänge bzw.die Nicht-verfügbarkeit brauchbarer Strahler im interessierenden Bereich unterhalb 265 nm führt dazu, dass derzeit nur vereinzelte Nischenanwendungen im Bereich UV-Desinfektion mit UVED existieren.

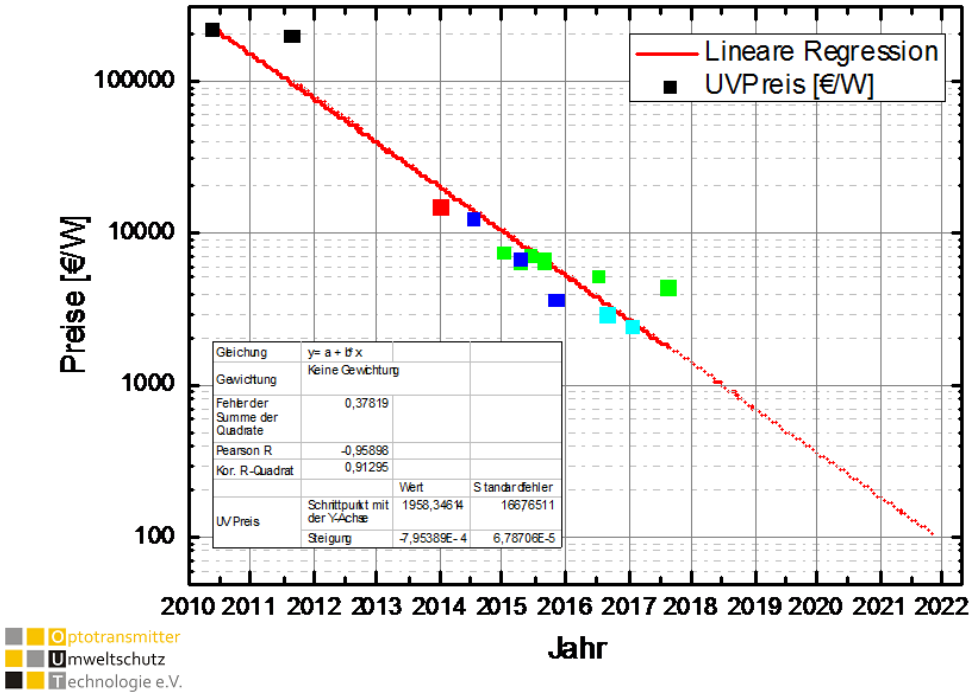

Abb. 41: Preisentwicklung von UVC-LED verschiedener Hersteller mit Prognose

Dies könnte sich in Zukunft ändern, wenn sich die Preise nach dem Haizschen „Gesetz“ entwickeln, wonach sich die Lichtausbeute bei LEDs alle 18-24 Monate verdoppelt, während der Preis innerhalb von 10 Jahren auf ca. 10% schrumpft. Die aus der eigenen Recherche abgeleitete Regression führt über die erfolgte Extrapolation auf eine optimistische Prognose eines Preises von ca. 100 €/W im Jahre 2022 für die Halbleiter.

Zusätzlich wird diese Entwicklung durch gezielte Fördermaßnahmen weiter forciert:

Beispielsweise durch das aktuelle Förderprojekt UNIQUE, das vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Medien, Energie und Technologie zur Entwicklung einer massenmarktfähigen UVC LED für die Entkeimung gefördert wird. [1]

Für eine am Bedarf orientierte Weiterentwicklung muß das ursprüngliche Konzept für das SOLWADES- System durch ein flexibles ersetzt und im Rahmen der Dissemination realisiert werden:

Ursprüngliches Konzept:

- UVED-Desinfektion mit Sauerstoffanreicherung
- doppelte Ausnutzung des Konzentrators
- UV-Anteil der Sonnenstrahlung wird im Reaktor zur Desinfektion ausgenutzt
- Der im Reaktor nicht absorbierte Teil der Strahlung wird über hocheffiziente moderne Tandem-Solarzellen, welche große Anteile des Sonnenspektrums nutzen, in Strom umgewandelt, welcher gepuffert über Akkumulatoren die autarke Stromversorgung der Anlage gewährleistet.

Flexibles Design:

- UVED-Desinfektion mit Sauerstoffanreicherung
- Solarteil mit oder ohne Konzentrator als Option für autarken Betrieb
- spezifisch zugeschnittene, kompakte Anlagen
- Biooptischer Sensor als Option

Optional (wenn die Sonne nicht scheint) kann die Anlage ausschließlich mit Akku betrieben werden.

Dissemination:

Weiterhin bedarf es einer Weiterentwicklung: UVC-Tauchlampen auf LED-Basis, welche am besten durch die Hersteller selbst zu realisieren sind, sollen die bisherigen Lösungen ersetzen. Leider war die Entwicklung einer solchen Innovation im Rahmen dieses Projekts nicht möglich. Die UVC-LED- Tauchlampen sind deutlich preisgünstiger zu realisieren, da deren Kühlsysteme sowie die großen Quarzfenster eingespart werden können. Sind diese solar powered, steht als weitere Option ein Akkupuffer zur Verfügung. Dies alles gewährleistet die größtmögliche Flexibilität bei den Nutzungsszenarien.

Schutzrechte:

Für die Ergebnisse des Projekts sind derzeit keine Schutzrechte beansprucht.

4. Wirtschaftliche Verwertung der Vorhabensergebnisse, aktualisierter Verwertungsplan

4.1 Zielgruppen für die wirtschaftliche Verwertung des FuE-Ergebnisses, Anwendungsbereiche

Die Identifizierung der Zielgruppen entspricht abweichend von den ursprünglich avisierten nur noch Anwender autarker Wasserdesinfektion wie Hütten in abgelegenen Gebieten oder POU-Anwendungen sowie durch besondere Umstände bedingte, speziell designte Anlagen mit besonderen Anforderungen abweichend vom Standard, wo die Kostensensibilität weniger gegeben ist.

Damit ist ganz klar ein Nischenmarkt im Fokus, da zukünftig Innovationen auch im Bereich existierender Verfahren zu erwarten sind.

4.2 Schilderung der Markt- und Wettbewerbssituation

Durch die besondere Technologie mit UV-Bestrahlung und Photokatalyse ergibt sich ein Zielmarkt, auf dem man einerseits offen für Erweiterungen der Technologielandschaft ist und man andererseits viele Unternehmen findet, die hier aktiv sind und Produkte vermarkten.

Durch die autarke, solarbetriebene Wasserdesinfektion kommt eine Verwendung in Frage, in der Autonomie gefordert ist. Durch den Einsatz der UVED ohne Solarreaktor ist man zusätzlich unabhängig von der aktuellen Sonnenintensität. Die kontinuierliche Desinfektion arbeitet durch sensorische Kontrolle und Regelung der Reaktorparameter äußerst effizient. Als Größenordnung wird ein Durchlauf bis >400 l / h möglich sein.

Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften ist ein Einsatz in der dezentralen Wasserversorgung sinnvoll.

Hiermit ergeben sich vielfältige Möglichkeiten der Anwendung.

Als wohl relevanteste Möglichkeit wird der Einsatz in Berghütten gesehen. So können die meisten Berghütten lediglich auf Oberflächenwasser und Schmelzwasser zugreifen. Alternativ bleibt die Versorgung via Kanister aus dem Tal. Eine Wasserdesinfektion vor Ort spielt eine entscheidende Rolle, wie auch das Interesse des Deutschen Alpenvereins (DAV) wiederspiegelt. Die Möglichkeit, eine Anlage in kompakter Form herzustellen, stieß seitens der Anbieter sowie des Vereins auf Zustimmung. Hier muss berücksichtigt werden, dass ein Aufbau einer größeren Anlage meist nur mit Hilfe eines Helikopters oder per Gondel möglich ist. Hier zählt dann jedes Kilogramm, welches transportiert werden muss. Man sucht seitens des DAV immer nach innovativen Möglichkeiten, seine Hütten mit sauberem Wasser zu versorgen. Als Bestätigung dieses Marktes hat der Verein Ende 2015 auch einen LOI beigebracht. Das Interesse geht jedoch noch weit darüber hinaus. Innovationen zum Thema Verbesserung der Hüttentechnik erhalten durch den DAV mit diversen Symposien einen professionel-

len Rahmen. Auch hier gibt es die Anfrage, die Fortschritte und Ergebnisse der Forschung vorzustellen. Letztlich gipfelte das Interesse des Vereins in der Anfrage, einen Demonstrator auch unter Praxisbedingungen auf einer Referenzhütte zu erforschen.

Auf die Frage hin, welcher Markt sich allein durch die Verwendung in Berghütten des Deutschen Alpenvereins ergibt, wurde dadurch abgeschätzt, wie viele Hütten unter der Ägide des DAV stehen. So betreut der DAV 323 Hütten mit Übernachtungszahlen in Höhe von rund 833.900 p.a. (Stand März 2017 [3]) in Deutschland. Nimmt man allein die Alpenanrainer im deutschsprachigen Raum hinzu, erhält man geschätzte 970 Hütten sowie vergleichbare Objekte.

Als eine erste Einsatzmöglichkeit kommen natürlich auch abgelegene Liegenschaften in Frage. Egal ob im australischen Outback, in amerikanischen Nationalparks oder der afrikanischen Steppe: Sobald die Anbindung an die Wasserversorgung schwierig oder unmöglich wird, kann eine auf der SOLWADES-Technologie basierte Aufbereitungsanlage zum Einsatz kommen. Ein schwer zugängliches Gelände oder schlicht die Abgelegenheit qualifiziert bereits eine autarke Wasserdesinfektionsmöglichkeit. Die weiterentwickelte SOLWADES-Technologie kann hier mit seiner kompakten Bauart einen weiteren Vorteil mitbringen.

Im Gegensatz zu den Berghütten, die wirklich nur unter schwierigen Umständen erreicht werden können, kann eine abgelegene Liegenschaft weitaus kostengünstiger angefahren werden. Eine kompakte Bauart der Anlage ist an dieser Stelle nicht mehr zwingend erforderlich, also besteht kostentechnisch dabei Spielraum nach unten.

Weitere Einsatzmöglichkeiten für die zu erforschende Technologie sollten bei Anwendern liegen, die auf eine konstante Wasserqualität angewiesen sind.

Für diese Anwendungsfälle existieren bereits optimal angepasste, zertifizierte Systeme, bei denen es v.a. auf die Konformität mit dem Qualitätsmanagementsystem (QMS) ankommt. Hier kommt das SOLWADES – System nicht in Frage, da praktisch noch keine Erfahrungen vorliegen und somit eine erhebliche Markteintrittsbarriere vorliegt.

Zukünftige Anwendungen:

Als wichtiges Ergebnis dieses Projektes ist der Zugewinn an Know-How herauszustellen, welcher erst mittel- und langfristig zu wirtschaftlich verwertbaren Produkten führt. So konnten aus den gesammelten Erfahrungen Lösungsansätze und Vorgehensweisen für die aktuell laufenden Projekte „TOCSens“ und „EARNINGS“ erarbeitet werden. Bei „TOCSens“ wird der erfolgreiche Ansatz des Abbaus organischer Stoffe mittels UVC-LED verfolgt, in „EARNINGS“ fließen die Erfahrungen aus dem erfolgten Betrieb des Demonstrators mit ein.

Erweiterte Anforderungen:

Die Regelbarkeit des Reaktors kann hier die gleichbleibende Qualität messen und gewährleisten.

Bei kommerziellen Anlagen erfolgt die Regelbarkeit einer Desinfektionsleistung derzeit über Sensoren, welche die erforderliche Dosis nach DVGW 294 [5] gewährleisten. Dabei erfolgt jedoch nur die Kontrolle der verabreichten Dosis und nicht des Ergebnisses der Desinfektion, also der Keimkonzentration (KBE). Um diese Art von Regelung zu ermöglichen, wäre der Einsatz eines Sensors, welcher die Wasserqualität online erfasst, zwingend erforderlich. Die Verfügbarkeit eines solchen Sensors würde die Effizienz jeglicher Wasserdesinfektion deutlich erhöhen, da eben nur die (wirklich) objektiv erforderliche Dosis eingesetzt werden müsste. Zusätzlich besteht die Option der Dokumentation durch Aufzeichnung der Messwerte.

Auch private Haushalte, Campingresorts oder private Boote mit erhöhten Ansprüchen an die Wasserqualität oder eingeschränkter Verfügbarkeit von Rohwasser können Anwendungsgebiete sein. In wenig genutzten Anlagen und Leitungssystemen bilden sich aufgrund einer Stagnation von Wasser Biofilme und im Verkeimungsfall würde bei eintretenden Schäden der Betreiber der Leitungsanlage haften, was durch den Einsatz dieser Technologie vermeidbar wäre.

Im aktuell laufenden Projekt „EARNINGS“ soll ein solcher Sensor entwickelt werden.

4.3 Charakterisierung der Marktgröße, der Marktentwicklung und des angestrebten Marktanteils

Der Bedarf an gutem Trinkwasser wird ständig weiter weltweit steigen. Für diesen Fakt wird ein gewaltiges Investitionsvolumen prognostiziert, an dem auch viele Hersteller von Desinfektionstechnologie profitieren werden.

„Weltweit steigt zwar der Anteil der Menschen, die Zugang zu sauberem Trinkwasser haben. Allerdings sind die Fortschritte zwischen den Weltregionen, aber auch innerhalb der Länder sehr ungleich verteilt. So ist beispielsweise der Zugang zu Trinkwasser und sanitären Einrichtungen in ländlichen Regionen von Schwellenländern deutlich schlechter als in den Städten.“ [4]

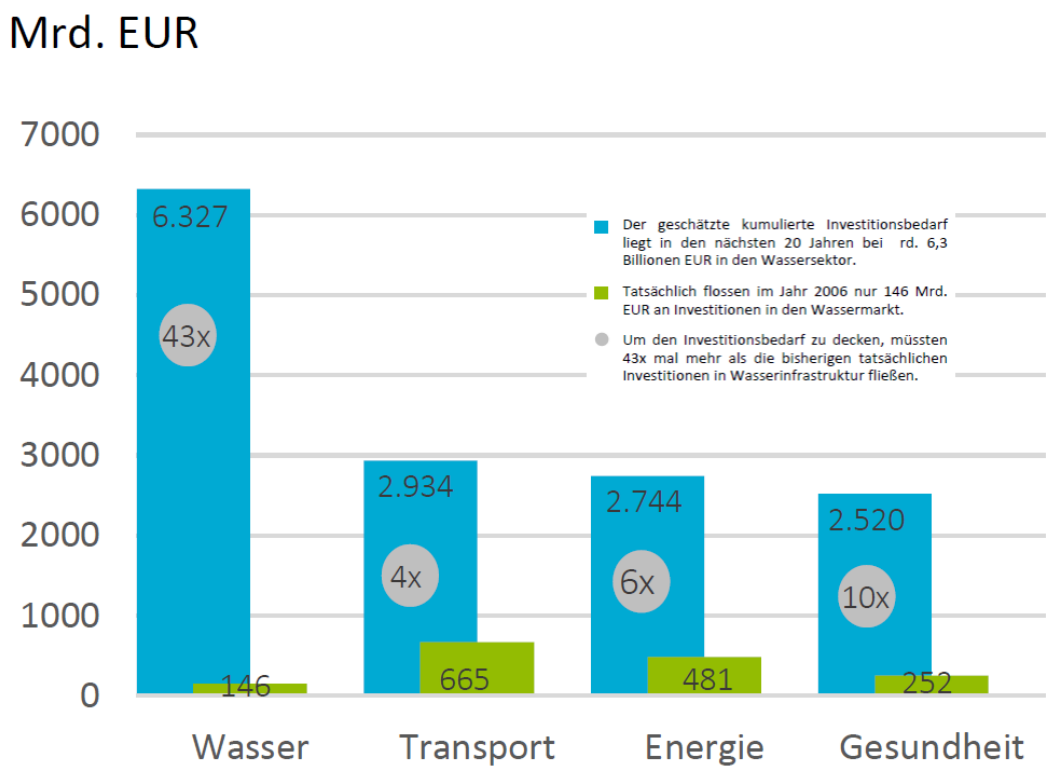

Abb. 42: Prognostizierte weltweite Infrastrukturausgaben über die nächsten 17 Jahre

Die Entwicklung wird in mehr Desinfektion und mehr Anlagen mit Kreislaufführung (also mehr POU) gesehen. Die Verteilung der verschiedenen Technologien geht zulasten der Verfahren unter Verwendung von Chlor. Das heißt nicht, dass dessen Anwendung in anderer Form ausgeschlossen wird. In chlordesinfiziertem Wasser entfaltet das Chlor seine bewährte Depotwirkung über ganze drei Tage, was kein anderes Verfahren erreicht.

So finden beispielsweise Desinfektionsanlagen des Herstellers von REDO WaterSystems, dessen Verfahren darin besteht, das Chlor als gelösten Bestandteil elektrolytisch direkt aus dem Rohwasser zu erzeugen, reißenden Absatz.

Die steigende Nachfrage nach Wasser- und Abwasseraufbereitung sowie Konsolidierung und tiefgreifende strukturelle Veränderungen innerhalb der Branche lassen eine überdurchschnittliche Entwicklung für die nächste Zukunft in diesem Sektor erwarten.

Finanzierungslücke

Neben dem Mangel an finanziellen Mitteln, herrscht auch ein Mangel an alternativen Finanzierungsmöglichkeiten, obgleich in vielen Ländern der Welt eine hohe Nachfrage nach Lösungen für die Finanzierung von dringend notwendigen Investitionen in die Wasserinfrastruktur besteht.

Im ursprünglich angestrebten Bereich der Lebensmittelindustrie kann SOLWADES den Anforderungen leider nicht genügen.

Angepeilter Nischenmarkt

Aufgrund der im AP 5 erarbeiteten Machbarkeitskriterien ist neben dieser generellen Sicht auf die Branche ist im speziellen auf den potentiellen Markt im Bereich der Berghütten sowie von abgelegenen Liegenschaften zu zielen. Einerseits ist man vor dem Hintergrund von schwierigen Zugangswegen sehr an einer kompakten Bauweise interessiert, andererseits besteht das Interesse auch an der Möglichkeit, Wasser autark vom Stromnetz zu desinfizieren.

Da der Deutsche Alpenverein auch ein Förderer von Innovationen ist, wurde neben dem LOI auch ein Symposium angesprochen, auf dem die Forschungen sowie aktuelle Ergebnisse in einen würdigen Rahmen präsentiert werden können. Außerdem – ebenfalls bereits angesprochen – besteht die Bereitschaft, für die praxisnahe Erprobung des Demonstrators eine Referenzhütte zur Verfügung zu stellen.

Mit seinen bereits erwähnten 323 Hütten Deutschland ergibt sich ein klares Bild des zunächst angestrebten Marktes. Betrachtet man allein den deutschsprachigen Alpenraum mit seinen diversen verantwortlichen Alpenvereinen, kann man von ca. 970 solcher Berghütten ausgehen.

4.4 Marketing- und Vertriebskonzeption für das neue Erzeugnis / Verfahren, ggf. Erzeugniskalkulation

Bevor konkurrenzfähige Desinfektionssysteme außerhalb von Nischenanwendungen (i.d.R. POU) auf dem Markt akzeptiert werden können, bedarf es bei den UVC-LED zunächst sowohl einer deutlichen Performancesteigerung verbunden mit einer Preissenkung. Im Speziellen muss der Demonstrator im Rahmen der Dissemination unter den o.g. Voraussetzungen weiterentwickelt werden.

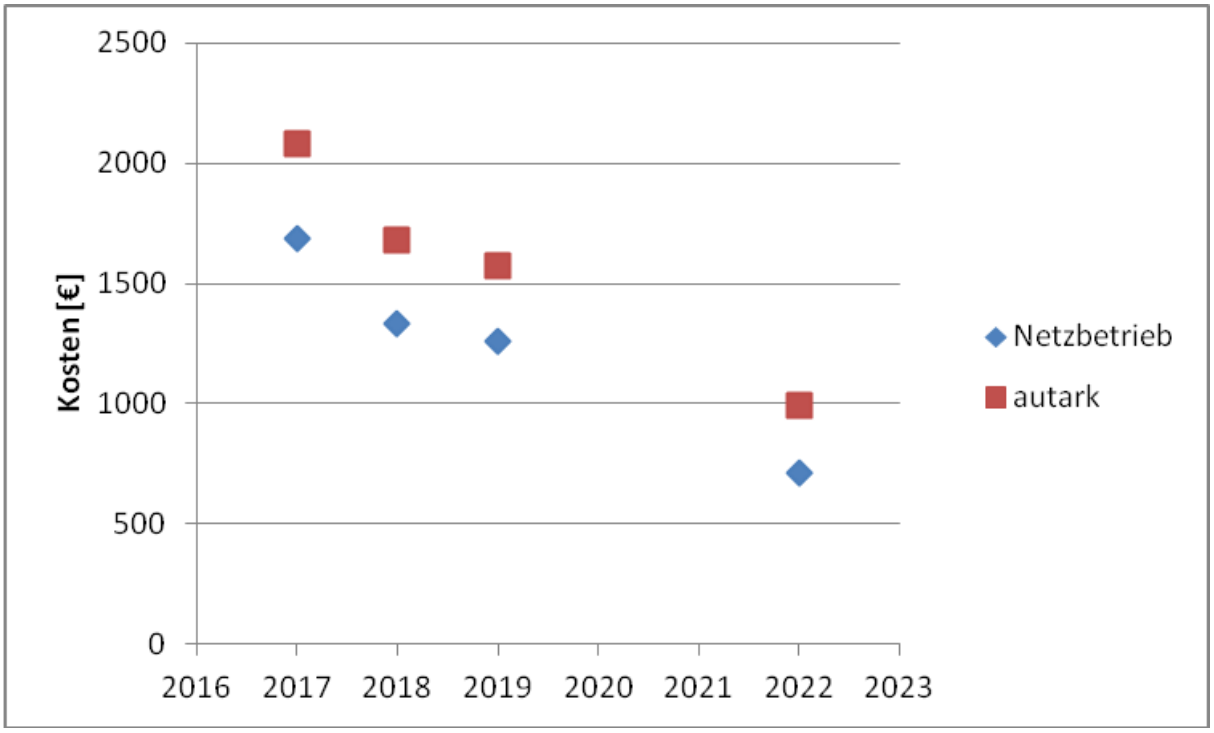

Abb. 43: Erzeugniskosten unter Berücksichtigung der Preisentwicklung der UVC-LED

Bei einem Aufbau mit 8 LED unter Beibehaltung der jetzigen Konstruktion sinken die Erzeugniskosten in fünf Jahren um die Hälfte bei steigender Leistungsfähigkeit. Unter Einsatz von noch zu entwickelnden Tauchlampen sinken diese Kosten nochmals um ca. 100 Euro.

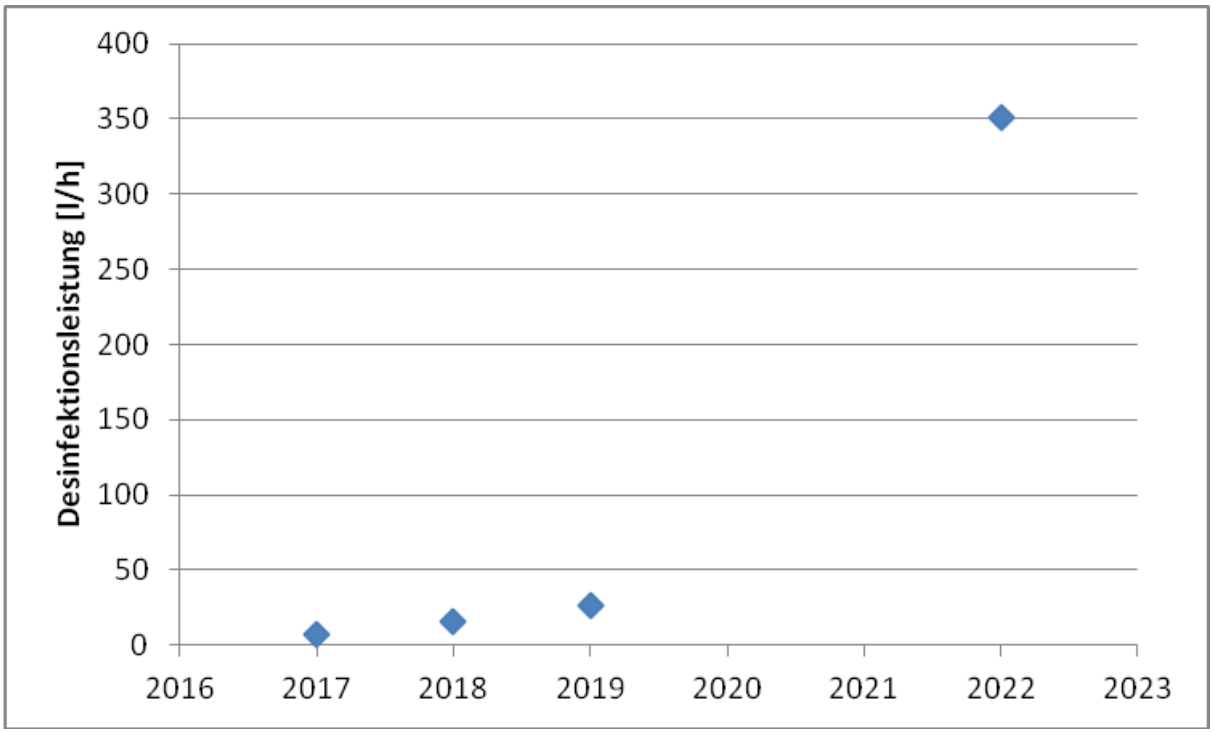

Abb. 44: Entwicklung der Performance des weiterentwickelten Systems

Vertriebsstrategie

Wenn nach der Dissemination das profitabel vermarktbare Produkt verfügbar ist, wird seitens des OUT e.V. der Vertrieb über einen Partner aus der Wirtschaft priorisiert. Die Möglichkeit der Ausgründung einer eigenen GmbH sowie die Option eines Wissenstransfers zu einem Wirtschaftspartner in Verbindung mit einer Ausgründung besteht als weitere Möglichkeit.

Vertrieb über einen wirtschaftlichen Partner

Es ergeben sich über diese durch den OUT e.V. priorisierte Vertriebsvariante diverse Vorteile. Wie bereits erläutert stellen vor allem auf Wasserdesinfektion ausgerichtete Anlagenhersteller das Feld der potentiellen Anbieter.

Bei erfolgreicher Erforschung der SOLWADES-Technologie soll es zu einem reinen Wissenstransfer zum wirtschaftlichen Partner kommen. Dieser sollte auf dem Markt der Wasserdesinfektion gut positioniert sein. So wird die Vertriebsstruktur des Wirtschaftspartners genutzt, um eine mit SOLWADES-Technologie arbeitende Anlage zu vermarkten und zu vertreiben.

Natürlich ist die Erfahrung, die ein Anlagenhersteller in seinem Kernsegment – der Konstruktion und Herstellung von Anlagen – mitbringt, von großem Nutzen. Das praktische Know-How des Herstellers mit den Erkenntnissen aus der Forschung an der SOLWADES-Technologie zu verbinden, stellt die Symbiose der Kernkompetenzen der beiden Parteien dar. Zum einen der Anlagenhersteller mit seinem bestehenden Vertriebsnetz sowie seinen

Erfahrungen im Anlagenbau, zum anderen der OUT e.V. mit den Forschungsergebnissen einer neuen Technologie.

Da wie bereits erläutert eingangs eher mit der Anlagenherstellung für Berghütten und Liegenschaften gerechnet wird, ist hier nicht entscheidend, einen großen Konzern als wirtschaftlichen Partner zu gewinnen, sondern eher ein kleines oder mittelständisches Unternehmen. Was als Nischenanbieter beginnen kann, kann sich vergrößern und weitere Anwendungsgebiete erschließen. Ein gesundes Wachstum schließt ein, dass der Anbieter beispielsweise ein umfassendes Dienstleistungskonzept für die hergestellten Anlagen bieten kann. Je mehr Anlagen verbaut werden, desto mehr Wartung etc. wird schließlich erforderlich werden.

Vertrieb über die Ausgründung einer GmbH

Neben dem reinen Wissenstransfer hin zu einem industriellen Partner, der mit der Herstellung von Anlagen betraut wird, ist außerdem eine zweite Variante zu betrachten. Hier wird der OUT e.V. durch eine Ausgründung einer GmbH selbst im Vertrieb der SOLWADES-Technologie aktiv.

Jedoch stellt eine Ausgründung ohne besondere Schutzrechte ein hohes Risiko dar.

Die Nachhaltigkeit einer Weiterentwicklung muss gegeben sein.

Die Entscheidung über eine Vertriebsstrategie kann durch den OUT e.V. mit Bezug auf den jeweilig angesprochenen Markt erfolgen. Handelt man einerseits mit einer ausgegründeten GmbH auf einem Nischenmarkt, auf dem die Anbieter die Nachfrage nicht decken können, oder andererseits durch ein am Markt etabliertes Unternehmen in einem Markt mit industriellem Charakter. Beides ist nebeneinander oder auch separat denkbar.

4.5 Eigene Umsatzerwartung aus der Verwertung der FuE-Ergebnisse nach Art und Umfang für fünf Jahre nach Projektabschluss mit Ausweis der anteiligen FuE-Kosten und Gewinne

Unter der Voraussetzung, dass sich die Kostenstruktur in der prognostizierten Weise entwickelt, kann mit der Entwicklung erst in fünf Jahren begonnen werden, damit dann in 6-7 Jahren ein konkurrenzfähiges Produkt auf den Markt gebracht werden kann.

Als wichtiges Ergebnis dieses Projektes ist der Zugewinn an Know-How herauszustellen, welcher erst mittel- und langfristig zu wirtschaftlich verwertbaren Produkten führt. Immerhin konnten aus den gesammelten Erfahrungen Lösungsansätze und Vorgehensweisen für die aktuell laufenden Projekte „TOCSens“ und „EARNINGS“ erarbeitet werden. Damit kann eine Summe von ca. 32.000 Euro als Kosteneinsparung betrachtet werden.

Weitere Projekte befinden sich in Anbahnung. Beispielsweise gibt es eine belastbare Kooperationsanfrage für ein Kooperationsprojekt zur Reinigung von Wässern der Firma Kemia aus Brasilien im Rahmen des „Santa Catarina & Berlin Program“ (weitere Kooperationspartner: CERTI, OptecBB).

In Zukunft sehen wir weiteren Kooperationen und Forschungsaufträgen auf diesem Gebiet freudig entgegen.

4.6 Ggf. in Drittunternehmen durch die Nutzung des FuE-Ergebnisses entstehende Umsätze (fünf Jahre)

Da der Demonstrator in den durchgeführten Tests klar gezeigt hat, dass dessen Performance derzeit in keiner Weise konkurrenzfähig ist, erwarten wir keine direkten Umsätze in Relation der direkten Vermarktung.

4.7 Transferkonzeption

Der Wissenstransfer aus dem SOLWADES-Projekt findet über diverse, im Folgenden aufgeführte Wege statt:

Transfer über bestehende Netzwerke

Zum Transfer der FuE-Ergebnisse kann der OUT e.V. seine umfangreiche Netzwerktätigkeit nutzen. So ist er Mitglied in diversen Verbänden (z.B. VIU e.V.) und Branchenvereinigungen (z.B. OptecBB e.V., EFDS e.V.). Außerdem tritt der OUT e.V. selbst als Netzwerkkoordinator sowie als Mitglied von mehreren Kooperationsnetzwerken auf, die sich in der Zwischenzeit frei finanzieren oder zum Teil durch das BMWi im Rahmen der ZIM-Kooperationsnetzwerke gefördert sind.

Über diese aktive Netzwerktätigkeit verfügt der OUT e.V. über zahlreiche Kontakte und Kontaktmöglichkeiten zu Unternehmen, um die Forschungsergebnisse bekannt zu machen und

nach entsprechenden Kooperationspartnern zu suchen bzw. diese zielgerichtet anzusprechen.

Transfer über bestehende und angebahnte Kooperationsbeziehungen

Die FuE-Ergebnisse des OUT e.V. werden Kooperationspartnern zur Nutzung angeboten und sind darüber hinaus Grundlage zur Einwerbung von Forschungsaufträgen. Der OUT e.V. unterstützt potentielle Hersteller bei Maßnahmen zur Markteinführung des Produkts. Insbesondere leistet der OUT e.V. Beiträge zur Erstellung technischer Publikationen für Fachzeitschriften und zu Vorträgen im Rahmen von Konferenzen und Messeauftritten.

Potentielle Anwender sind wie bereits beschrieben Anlagenhersteller, die bereits auf dem Markt der Wasserdesinfektion positioniert sind. Hier ist schlussendlich als priorisierte Variante der reine Wissenstransfer angedacht. Die Produktion, Vermarktung und der Vertrieb eines entstehenden Produktes soll hierbei komplett in die Hand des wirtschaftlichen Partners übergehen. Mögliche Nutzer der FuE-Ergebnisse und potentielle Hersteller werden vom OUT e.V. seitens der Forschung begleitet.

Transfer über bestehende Institutionen des Technologietransfers

Es werden Technologie- und Gründerzentren sowie Innovations- und Technologieparks – zunächst vorrangig im deutschen Raum – über die Ergebnisse und die Möglichkeiten der Nutzung von SOLWADES gezielt informiert.

Außerdem soll die Präsentation der Ergebnisse und Angebote zur Nachnutzung im Rahmen des monatlichen Stammtisches im Innovationspark Wuhlheide (IPW) in Berlin-Köpenick (Sitz des OUT e.V.) angeboten werden.

Transfer im Rahmen des OUT e.V.

Im externen Transfer werden die FuE-Ergebnisse den Mitgliedsunternehmen des OUT e.V. zur Nutzung angeboten und sind darüber hinaus Grundlage zur Einwerbung von Forschungsaufträgen (weitere Maßnahmen sind unter dem Punkt „Transfer über bestehende und angebahnte Kooperationsbeziehungen“ aufgeführt).

Die Erarbeitung von Preisvorschlägen für die aus dem Projekt resultierenden Dienstleistungen stellt eine weitere Maßnahme dar. Die Aufnahme der Ergebnisse in das Leistungsangebot des OUT e.V. kommt nur sekundär in Frage, da vorrangig der Wissenstransfer zu einem Wirtschaftspartner angestrebt wird.

Die FuE-Ergebnisse werden in den regelmäßig erscheinenden Forschungs- und Tätigkeitsberichten des OUT e.V. sowie in der Internetpräsenz des Vereins dargestellt.

Im internen Transfer werden die FuE-Ergebnisse allen Fachbereichen des OUT e.V. mit dem Ziel präsentiert, neue FuE-Projekte zu kreieren sowie neue Aufträge zu akquirieren.

5. Bewertung des aktualisierten Verwertungsplanes im Vergleich zum ursprünglichen Verwertungskonzept

Aufgrund des zu hohen Preises des Erzeugnisses sowie der hohen Markteintrittsbarrieren sehen wir keine Möglichkeit einer sinnvollen Vermarktung des Demonstrators und konzentrieren uns daher vermehrt auf die Verwertung der erzielten Forschungsergebnisse.

6. Angaben zu erworbenen bzw. angemeldeten Schutzrechten für Vorhabensergebnisse

Es wurden keine Ergebnisse erzielt, welche schutzrechtlich verwertbar erscheinen. Deshalb und aufgrund der aktuellen Nichtvermarktung des Demonstrators haben wir auf die Anmeldung von Schutzrechten verzichtet.

7. Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen

Projektergebnisse konnten u.a. bei folgenden Veranstaltungen präsentiert werden:

- Fachseminar „LED Produktentwicklung“, HdT in Essen am 6.3.2018
- BioPhotonic-Workshop „Water Treatment“, WISTA Berlin, 19.10.2017
- Clusterkonferenz Optik, Villa Bergmann in Potsdam am 16.10.2017 Zuse-Tag, Haus des DIHK am 9.10.2017

Quellen:

1 http://www.osram-group.de/de-de/media/press-releases/pr-2017/11-05-2017
2 https://de.wikipedia.org/wiki/SODIS
3 https://www.alpenverein.de/chameleon/public/03cb087f-9b7d-45cf-dcbf-f0144af2f9d1/Jahresbericht-2016-Broschuere_OL_28412.pdf
4 http://www.rw-capital-invest.de/sites/default/files/fonds_downloads/grasshopperinvestments_direktinvestwasser_broschuere_1.pdf
5 https://www.dvgw.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=291&token=2c0a3a5cecfea73d878495e5ef2260dad7255bb3

DVGW W 290: Trinkwasserdesinfektion - Einsatz- und Anforderungskriterien. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn (2/2005)

DVGW W 294-1: UV-Geräte zur Desinfektion in der Wasserversorgung; Teil 1: Anforderungen an Beschaffenheit, Funktion und Betrieb. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn (6/2006)

DVGW W 294-2: UV-Geräte zur Desinfektion in der Wasserversorgung; Teil 2: Prüfung von Beschaffenheit, Funktion und Desinfektionswirksamkeit. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn (6/2006).

DVGW W 294-3: UV-Geräte zur Desinfektion in der Wasserversorgung; Teil 3: Messfenster und Sensoren zur radiometrischen Überwachung von UV-Desinfektionsgeräten; Anforderungen, Prüfung und Kalibrierung. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn (6/2006).