

## Solarreaktor

Solarreaktor zur photo-elektrochemischen Gewinnung von Wasserstoff aus Abwasser in oszillierender Strömung

<b>Programm / Ausschreibung</b>	Energieforschung (e!MISSION), Energieforschung, Energieforschung 7. Ausschreibung	<b>Status</b>	abgeschlossen
<b>Projektstart</b>	01.12.2021	<b>Projektende</b>	30.11.2024
<b>Zeitraum</b>	2021 - 2024	<b>Projektlaufzeit</b>	36 Monate
<b>Keywords</b>	photo-elektrochemischer Prozess, Wasserstoff, Abwasserbehandlung, oszillierende Reaktoren, Materialentwicklung, Kollektorentwicklung		

### Projektbeschreibung

Ausgangssituation

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) ist ein wichtiger Energieträger zur Erreichung der gesetzten Klimaziele. Da er derzeit hauptsächlich aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird, werden aktuell große Anstrengungen unternommen, um H<sub>2</sub> mit Hilfe erneuerbarer Ressourcen zu erzeugen. Das Potential erneuerbaren Stroms (PV /Überschussstrom) ist aber begrenzt und reicht bei weitem nicht aus, um die Dekarbonisierung nachhaltig zu erreichen. Innovative Wege zur H<sub>2</sub>-Herstellung sind daher dringend erforderlich.

Hauptziel des Projektes ist die Entwicklung eines Solarreaktors in oszillierender Strömungsführung („Oscillating Flow Solarreaktor“, kurz OFS) zur effizienten photo-elektrochemischen Gewinnung von Wasserstoff und gleichzeitiger Abwasserbehandlung und -reinigung unter direkter Nutzung der Sonneneinstrahlung. Das Abwasser bietet dabei den Vorteil, dass darin gelöste Schadstoffe als Opfersubstanzen und somit „Quelle“ des Wasserstoffes dienen und dabei abgebaut werden. Angestrebt werden dabei folgende Teilziele:

- (1) Proof-of-Concept eines „Oscillating Flow Solarreaktors“ (OFS) durch Design und Betrieb
- (2) Steigerung der Ausbeute an Wasserstoff (H<sub>2</sub> Produktionsraten) um 25 - 30%
- (3) Reinigung von Abwasser durch gleichzeitigen Abbau mehrerer Schadstoffe (Mehrkomponentensystem)
- (4) Steigerung des Systemwirkungsgrades des photo-elektrochemischen Prozesses zur H<sub>2</sub> Produktion und Abwasserbehandlung um mind. 10%

Die Grundlage des Innovationsgehalt ist die Bereitstellung von H<sub>2</sub> durch die neuartige Kombination aus direkter Nutzung des Sonnenlichts und Abwasserbehandlung in einem Solarreaktor mittels photo-elektrochemischer Zellen (PECs) als absolutes Novum in der österreichischen Technologielandschaft. Es wird also erstmalig ein optimierter Solarreaktor zur Verfügung stehen, der komplexe Abwasserzusammensetzungen (Mehrkomponentensysteme) behandelt, nutzt und gleichzeitig Wasserstoff produziert. Eine deutliche Effizienzsteigerung bietet die gezielte Materialentwicklung der PEC durch optimierte Morphologien der Photoanode und Betriebsparameter sowie Prozessintensivierung durch optimiertes Reaktordesign, das erstmalig eine PEC in eine oszillierende Strömungsführung inkorporiert. Durch die Kombination dieser Reaktortechnologie mit der direkten Nutzung der Solarenergie ist es möglich, die Prozessführung auf die Verfügbarkeit, die Nutzung und den

Ertrag der Energiequelle zu optimieren. Damit bekommt die Oxidation der Abbaukomponenten genügend Verweilzeit im Reaktor und wird durch und trotz intensiver Turbulenz eine gute Durchdringung der Strahlung in die Reaktionsröhren erreicht. Der produzierte Wasserstoff kann direkt eingesetzt, zwischengespeichert sowie ggf. auch ins Netz eingespeist werden.

Als Ergebnis des Projektes steht ein Proof-of-Concept eines real getesteten Solarreaktors (reales Abwasser, reale Einstrahlbedingungen) zur Verfügung, dessen Potentialanalyse sowie holistisches Gesamtkonzept unter Betrachtung kombinierter Ressourcen- und Energieeffizienz sowie Nutzungsstrategien für den Wasserstoff den Weg für die nächsten Entwicklungsschritte hin zu einem marktfähigen Produkt ebnet.

## **Abstract**

### Initial situation

Hydrogen (H<sub>2</sub>) is an important energy carrier for achieving the climate targets. As it is currently mainly produced from fossil fuels, great efforts are being made to produce H<sub>2</sub> using renewable resources. However, the potential of renewable electricity (PV /surplus electricity) is limited and their availability not sufficient to achieve decarbonization in a sustainable way. Innovative ways for H<sub>2</sub> production are urgently needed.

The main objective of the project is to develop an oscillating flow solar reactor ("Oscillating Flow Solar Reactor", OFS for short) for the efficient photo-electrochemical production of hydrogen and simultaneous wastewater treatment and purification using direct solar radiation. Pollutants in the wastewater serve as sacrificial agents and thus "source" of the hydrogen and being degraded in the process.

The following sub-objectives are aimed:

- (1) Proof-of-concept of an "Oscillating Flow Solar Reactor" (OFS) by design and operation.
- (2) Increase of hydrogen yield (H<sub>2</sub> production rates) by 25 - 30%.
- (3) Purification of wastewater by simultaneous degradation of multiple pollutants (multi-component system).
- (4) Increasing the system efficiency of the photo-electrochemical process for H<sub>2</sub> production and wastewater treatment by at least 10%.

The innovation of the project lies in providing H<sub>2</sub> by the novel combination of direct use of sunlight and wastewater treatment in a solar reactor by means of photo-electrochemical cells (PECs) as an absolute novelty in the Austrian technology landscape. Thus, for the first time, an optimized solar reactor will be available to treat complex wastewater compositions (multi-component systems) and simultaneously produce hydrogen. A significant increase in efficiency is offered by the targeted material development of the PEC through optimized morphologies of the photoanode and operating parameters, as well as process intensification through optimized reactor design, which for the first time incorporates a PEC into an oscillating flow. By combining this reactor technology with the direct use of solar energy, it is possible to optimize the process control for availability, utilization and yield of H<sub>2</sub>. Thus, the oxidation of the degradation components has enough residence time in the reactor and a good penetration of the radiation into the reaction tubes is achieved by intense turbulences. The hydrogen produced can be used directly, stored temporarily and, if necessary, fed into the grid.

As a result of the project, a proof-of-concept of a real tested solar reactor (real wastewater, real irradiation conditions) is available, whose potential analysis as well as holistic overall concept considering combined resource and energy efficiency as well as utilization strategies for the hydrogen pave the way for the next development steps towards a marketable product.

## **Endberichtkurzfassung**

Für eine nachhaltige Dekarbonisierung spielt die Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen eine zentrale Rolle. Ein vielversprechender Ansatz ist die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Wasserstoff durch photochemische Prozesse wie Photokatalyse (PC) und Photoelektrochemie (PEC). Die direkte Nutzung von Sonnenenergie zur Herstellung von Wasserstoff, Treibstoffen und Chemikalien aus Wasser – auch aus Abwasser und Salzwasser – sowie CO<sub>2</sub> gilt als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft.

Im Projekt Solarreaktor, dem ersten österreichischen Forschungsprojekt in diesem Bereich, konnte die kombinierte Abwasserbehandlung und grüne Wasserstoffproduktion sowohl im Labormaßstab (unter künstlichem Licht) als auch unter realer Sonneneinstrahlung erfolgreich demonstriert werden.

Ein Ziel des Projektes war die Entwicklung stabiler Katalysatoren mit hoher Lichtausbeute im sichtbaren Bereich. Dies gelang mit der Herstellung von Bismuthvanadat-Elektroden, die für die Oxidation von Abwasserkomponenten und gleichzeitige Wasserstoffproduktion eingesetzt wurden. Während der Fokus im Projekt auf der Entwicklung einer leistungsfähigen Photoanode lag, könnte zukünftig eine zusätzliche photoaktive Kathode die Wasserstoffausbeute deutlich erhöhen. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass für eine stabile und effiziente Prozessführung das Zusammenspiel von Schadstoffabbau, Wasserspaltung und photoelektrochemischer Stabilität entscheidend ist. Die geringe Reduktion des chemischen Sauerstoffbedarfs – dieser diente zur Evaluierung des Schadstoffabbaus im Abwasser – weist jedoch auf unvollständige Oxidationsprozesse oder Rückreaktionen bzw. die Entstehung von Zwischenprodukten hin, was in Folgeprojekten weiter adressiert werden muss.

Ein zentraler Aspekt bleibt die Stabilität der Photoelektroden, insbesondere bei Langzeitanwendungen. Die Entwicklung robuster Systeme und geeigneter Benchmarking-Parameter ist essenziell für den künftigen Einsatz im großtechnischen Maßstab. Zudem stellt die Flächenwirksamkeit solarer Photoreaktoren weiterhin eine wesentliche Herausforderung dar. Auch in der Literatur liegen vergleichbare direkte photochemische Prozesse bei einer Ausnutzung bei hauptsächlich 1 bis 3% (Song u. a. 2022) und bei maximal 3-4% (Tembhurne, Nandjou, und Haussener 2019) des Lichtes zur Wasserstofferzeugung (für PC bzw. PEC), meist unter Laborbedingungen. Kritisch ist dabei die Photoaktivität der gewählten Katalysatoren. Im Projekt Solarreaktor wurde mittels Bismutvanadat der möglichen Nutzungsbereich der Einstrahlung an der Photoanode auf bis 10% erweitert (viele andere UV-Katalysatoren arbeiten nur im UV-Bereich, Ausnutzung 1% des Sonnenlichts). Neben der nutzbaren Wellenlänge, sind allerdings Faktoren wie der Faraday'sche Wirkungsgrad, Photoneneffizienz und Photonentransport im Reaktor entscheidend um eine hohe Prozesseffizienz zu gewährleisten. Die Erreichung eines insgesamten STH von > 2% aus Abwasser unter realen Sonnenlicht Zeitraum von mehreren Stunden kann für das erste österreichische Forschungsprojekt daher schon als vielversprechendes Ergebnis für die weiteren Optimierungen gesehen werden.

Ein besonderer Erfolg war die Entwicklung und Patentierung eines oszillierenden solareren Photoreaktors. Durch die neuartige

Strömungsführung konnte die Wasserstoffausbeute um bis zu 58 % erhöht werden. In Kombination mit einem stabilen Versuchsaufbau gelang erstmals ein Proof-of-Concept unter realer Sonneneinstrahlung mit einer Solar-to-Hydrogen-Effizienz (STH) von über 2 % über mehrere Stunden – ein vielversprechender Meilenstein für die weitere Optimierung. Die Erkenntnisse zum Reaktordesign und zur Oszillationsströmung werden aktiv in der wissenschaftlichen Community verbreitet und weiterentwickelt. Langfristig gilt es STH-Effizienzen von > 10% nachweisen zu können, um einen sinnvollen Beitrag zu flächenwirksamer Energieproduktion erreichen zu können. Einerseits gilt es weiter neue stabile und skalierbare Katalysatoren zu entwickeln, die ein breiteres Spektrum des Wellenlängenspektrums des Sonnenlichts ausnutzen können. Andererseits können auf der optischen Seite Strategien zur Wellenlängenmodifikation angewandt werden. Eine Möglichkeit ist dabei, die Prozesse nicht nur in Richtung breitere Wellenlängenausnutzung weiterzuentwickeln, sondern auch in integrierten Systemen zu kombinieren, in welchen unterschiedliche Wellenlängenbereichen von unterschiedlichen Prozessen genutzt werden – zur Treibstoff- bzw. Chemikalien-, Strom- und Wärmeproduktion.

### **Projektkoordinator**

- AEE - Institut für Nachhaltige Technologien (kurz: AEE INTEC)

### **Projektpartner**

- ASFINAG Alpenstraßen GmbH
- Technische Universität Wien
- GREENoneTEC Solarindustrie GmbH