Leitprojekt H_2Giga

Dresden, 27.01.2026

Verbundvorhaben H2Giga_TP_SINEWAVE: Serienproduktion und Industrialisierung von integrierten & sektorgekoppelten Elektrolysesystemen für Wasser
Teilvorhaben SINEWAVE/AP3: Optimierung von Phasenseparation und Wärmeübergang in PEM-Elektrolyseuren [OxySepT]

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil I: Kurzbericht

Stand:	31.12.2025
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	10.09.2026
Partnerin/Partner:	Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Autorinnen/Autoren:	Prof. Dr. habil. Kerstin Eckert, Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_TP_SINEWAVE: Serienproduktion und Industrialisierung von integrierten & sektorgekoppelten Elektrolysesystemen für Wasser; Teilvorhaben SINEWAVE/AP3: Optimierung von Phasenseparation und Wärmeübergang in PEM-Elektrolyseuren [OxySepT]
Laufzeit:	01.06.2021 bis 30.09.2025
Förderkennzeichen:	03HY123D
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Teil I – Kurzbericht

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

Häufig ist ein Kontakt der Sauerstoffblasen mit Wänden, z.B. im Wärmetauscher und den Rohrleitungen der Elektrolyseur-Stacks im PEM-Anodenkreislauf, unvermeidbar. Um die Auswirkungen des Blasenkontakts auf dem oben genannten Ort zu minimieren, ist es wichtig, die Mechanismen zu erforschen, die ein schnelles Wachstum und Auflösung der Blasen an der Oberfläche fördern.

Gleichzeitig kommt es im Anodenkreislauf zu dynamischen Wechselwirkungen zwischen den von Reinstwasser transportierten Sauerstoffblasen durch Wandkollisionen. Diese Wechselwirkungen könnten einen erheblichen Einfluss auf den Gas-Flüssigkeits-Massentransfer haben, der durch zwei miteinander verbundene Mechanismen moduliert wird. Der erste Mechanismus ist die Veränderung der effektiven Kontaktfläche zwischen den Phasen, der zweite die Veränderung der Frequenz der Grenzflächenerneuerung an den Blasenoberflächen. Diese dynamischen Veränderungen bestimmen direkt die Prozesse des Blasenwachstums und der Blasenauflösung.

Zur Kühlung des gesamten PEM-Systems wird auf der Anodenseite des Stacks mehr Prozesswasser zugeführt, als für die Reaktion erforderlich ist. Das überschüssige Wasser nimmt die Verlustwärme auf und verlässt zusammen mit dem Sauerstoff den Stack. Ein Teil des Sauerstoffs ist im Wasser gelöst, während sich der Rest gasförmig in der Zweiphasenströmung befindet. Diese Strömung gelangt über Rohrleitungen zum Gasabscheider, wo Gas und Wasser getrennt werden. Zur Kompensation des während der Reaktion verbrauchten Wassers wird anschließend frisches Prozesswasser dosiert; die Gesamtwassermenge passiert eine Pumpe zur Überwindung der Strömungsverluste und schließlich einen Wärmeübertrager, in dem die Verlustwärme abgeführt wird. Das Vorhaben setzte hier an und verfolgte die Optimierung der Sauerstoffabtrennung, die Analyse der Blasenbildung und deren Einfluss auf den Wärmeübergang im Anodenkreislauf moderner PEM-Elektrolyseure. Die Ziele des Projekts umfassten dabei: Entwicklung eines thermo-fluiddynamischen Modellansatzes zur ortsaufgelösten Beschreibung des Blasenverhaltens; Analyse des Einflusses von Gasblasen und deren Bildung aufgrund von Gas-Übersättigung auf die Wärmeübertragung an vereinfachten Referenzgeometrien; Untersuchung der Wirkung funktionalisierter Oberflächen auf die Wärmeübertragung in einer Wasserströmung bei unterschiedlichen Gasübersättigungsgraden; Charakterisierung des Strömungs- und Wärmeübertragungsverhaltens eines von einer Zweiphasenströmung durchströmten Plattenwärmeübertragers; Mehrdimensionaler, zeit- und ortsaufgelöstes Wärmeübertrager-Modell als „Digitaler Zwilling“.

2. Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten zur Blasendynamik umfassten zunächst den Aufbau eines optischen Systems, um ein Messsystem mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu realisieren. Mit diesem optischen System wurden systematische Versuche durchgeführt und quantitativ ausgewertet. Die

erzielten Ergebnisse wurden in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht und auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

Die Arbeiten zum Wärmeübergang umfassten zunächst den Aufbau der Übersättigungsanlage, die Wasser unter definierten Temperatur-, Druck- und Sättigungsbedingungen bereitstellt und über zwei parallele Versuchsstrecken vielfältige Strömungs- und Wärmeübertragungsuntersuchungen mit minimalem Kapitaleinsatz ermöglicht. Darauf aufbauend wurden systematische Versuche durchgeführt und ausgewertet. Parallel dazu erfolgte die Modellierung mithilfe von CFD-Ansätzen sowie analytischer Zellenmodelle, die auf Energie- und Stoffbilanzen, empirischen Korrelationen und mechanistischen Gleichungen basieren. Die erzielten Ergebnisse wurden in zehn wissenschaftlichen Publikationen sowie auf zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt.

3. Wesentliche Ergebnisse

- Die Kombination aus Shadowgraphie und planarer laserinduzierter Fluoreszenz (PLIF) ermöglichte synchrone und gekoppelte Messungen einer Sauerstoffblase an unbeschichteten (hydrophil) oder beschichteten (hydrophob) Ti64 Oberflächen.
- Die Konzentrationsgradienten entlang der Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche sind nicht gleichmäßig; die schwächsten Gradienten treten in der Nähe der Substratgrenzfläche auf und werden mit zunehmendem Polarwinkel immer steiler und steigen zum unteren Pol der Blase hin an.
- Der kleinere Kontaktwinkel auf der unbeschichteten (hydrophil) Ti64-Oberfläche bewirkt eine größere Oberfläche, die für den Stoffaustausch zur Verfügung steht, wodurch eine schnellere, durch Auflösung bedingte Blasenentfernung erfolgt.
- Die Wirbelstruktur an einer abprallenden Blase sorgt nicht nur für eine Umverteilung der Grenzschicht aus gelöstem Sauerstoff, die die Blasenoberfläche umgibt, sondern transportiert auch Teile in den Bulk des hochreinen Wassers. Diese Bedingungen sind günstig für einen verbesserten Stoffaustausch. Es trägt zur Bildung größerer Blasen bei, was die Trennung der Blasen von der Flüssigkeit im Anodenkreislauf begünstigt.
- Das Aufreißen des Flüssigkeitsfilms zwischen der Blase und dem Substrat fördert eine verstärkte Konvektion innerhalb der Dreiphasen-Kontaktzone und erleichtert dadurch den Stoffaustausch.
- Entwicklung und Validierung eines zellbasierten thermo-fluiddynamischen 1D-Modells zur ortsaufgelösten Vorhersage von Blasenwachstum, Ablösung und Desorption in Rohrströmungen; Validierung anhand von Desorptionsversuchen und Übertragung auf den Kühlkreislauf einer 20-MW-PEM-Elektrolyse.
- Modelltechnische Vorhersage von Gas-Flüssig-Strömungsregimen mittels mechanistischem Modell und Machine-Learning-Ansätzen; Erstellung einer Strömungskarte, die für typische Betriebspunkte primär Slug-Strömung prognostiziert.
- Entwicklung und Validierung eines Zellenmodells sowie ergänzender CFD-Simulationen zur Vorhersage von Wärmeübergang und Druckverlust in zweiphasigen Rohrströmungen; Ergebnisse zeigen bis zu 5 % Verbesserung des Wärmeübergangs durch Gasblasen.

- Experimentelle Untersuchungen im Rechteckkanal belegen bei moderaten Reynolds-Zahlen (Re < 12.000) eine Erhöhung der Nusselt-Zahl um bis zu 22 % durch Gasübersättigung, während Untersättigung den Wärmeübergang schwächt.
- Untersuchung funktionalisierter Oberflächen (laserstrukturiert, hydrophob beschichtet) zeigte, dass besonders die Kombination aus Strukturierung und Hydrophobisierung die Blasenbildung fördert, Gasfilme verhindert und den Wärmeübergang im Übersättigungsfall um bis zu 50 % verbessert.
- An einem Plattenwärmeübertrager mit Fischgrätenprägung (30°, 45°, 60°) wurden die auftretenden Strömungsregime qualitativ und quantitativ für verschiedene Reynoldszahlen und Gasanteile mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und automatisierter Bildauswertung untersucht. Es zeigte sich, dass mit steigender Reynoldszahl der Wärmeübergang verbessert wird, da große Slugs in kleinere, homogenisierte Blasen übergehen und isolierende Effekte vermindert werden.
- Entwicklung eines mehrdimensionalen, zeit- und ortsaufgelösten CFD-Modells als „Digitaler Zwilling“ eines Plattenwärmeübertragers mit Fischgrätenprägung, das reale Strömungs- und Wärmeübertragungsbedingungen abbildet. Das instationäre, ortsaufgelöste Modell verwendet VOF für die Zweiphasenströmung, k-ω SST-Turbulenzmodellierung und ermöglicht die Analyse der Gasblasenwirkung auf den Wärmeübergang für unterschiedliche Gasanteile (0–20 %) und Reynolds-Zahlen (800–5000).

4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Mit dem Projektpartner Linde wurde intensiv zu den Parametern der Wärmeübertrager zusammengearbeitet. Weitere Zusammenarbeit erfolgte mit dem Lehrstuhl für laserbasierte Fertigung der TU Dresden zu laserbasierter Funktionalisierung von Modelloberflächen für die PEM-Peripherie.