

Abschlussbericht

DFG-Geschäftszeichen: TU 89/18-1

„Experimentelle und theoretische Untersuchung der Gasreinheit in der druckbetriebenen alkalischen Wasserelektrolyse“

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek

Projektbearbeiter: Jörn Brauns, M.Sc.

Berichtszeitraum:

01.03.2018 – 31.08.2021

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Allgemeine Angaben..... | 2 |
| 1.1 | Allgemeine Angaben | 2 |
| 1.2 | Bisher abgerufene Mittel | 3 |
| 1.3 | Aktueller Stand des Mittelabrufs aus früheren Bewilligungen | 3 |
| 1.4 | Publikationsliste (max. 10 wichtigste Publikationen aus diesem Projekt) | 4 |
| 1.4.1 | Bereits erschienene Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung.... | 4 |
| 1.4.2 | Andere Veröffentlichungen..... | 4 |
| 2 | Arbeits- und Ergebnisbericht (max. 10 Seiten)..... | 5 |
| 2.1 | Ausgangslage und Zielsetzung des Projekts..... | 5 |
| 2.2 | Durchgeführte Arbeitsschritte und Konzeptabweichungen..... | 6 |
| 2.3 | Erfahrungen über die angewandten Methoden und Nachnutzungsmöglichkeiten | 8 |
| 2.4 | Bisher vorliegende Ergebnisse und Zugriffshäufigkeit durch Dritte..... | 9 |
| 2.5 | Zum Projekt beitragende Personen..... | 12 |
| 2.6 | Eigenleistung | 14 |
| 2.7 | Öffentlichkeitsarbeit | 14 |
| 3 | Zusätzliche Literatur | 15 |
| 4 | Zusammenfassung (max. 1 Seite) | 16 |
| 5 | Weitere Arbeiten und Planung | 17 |
| 6 | Veröffentlichung von Daten aus Abschlussberichten | 17 |
| 7 | Weitere Bemerkungen zum Vorhaben/Anregungen etc..... | 17 |
| 8 | Unterschrift(en) | 18 |

1 Allgemeine Angaben

1.1 Allgemeine Angaben

| | |
|---|---|
| DFG-Geschäftszeichen: | TU 89/18-1 |
| Antragsteller: | Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek |
| Institut/Lehrstuhl | Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik, Technische Universität Clausthal |
| Thema des Projektes: | „Experimentelle und theoretische Untersuchung der Gasreinheit in der druckbetriebenen alkalischen Wasserelektrolyse“ |
| Berichtszeitraum: | 01.03.2018 – 31.08.2021 |
| Internetadresse des Vorhabens: | https://www.icvt.tu-clausthal.de/forschung/forschungsprojekte/arbeitsgruppe- turek/untersuchung-der-gasreinheit-in-der-druckbetriebenen- alkalischen-wasserelektrolyse |
| Mit der Erstantrag kalkulierte Gesamtdauer des Vorhabens: | 36 Monate |
| Projektbeginn / voraussichtlicher Abschluss der Arbeiten: | 01.03.2018 / 31.05.2021 |
| Erstbewilligung der DFG für dieses Projekt vom: | 02.11.2017 |
| Derzeit laufende DFG- Bewilligung vom: | 02.11.2017 |
| Aktueller Stand des Mittelabrufs aus der laufenden Bewilligung: | 274.370,96 Euro (2018-2021), 43.062,30 Euro von 2021 noch nicht abgerufen |

1.2 Bisher abgerufene Mittel

| | |
|--|---|
| Postdoktorandin/Postdoktorand und Vergleichbare: | 0 Euro |
| Doktorandin/Doktorand und Vergleichbare: | 213.594,79 Euro |
| Sonstige wissenschaftliche Mitarbeiterin oder Mitarbeiter: | 0 Euro |
| Nichtwissenschaftliche Mitarbeiterin oder Mitarbeiter: | 0 Euro |
| Hilfskräfte: | 22.926,96 Euro |
| Reisen: | 6.346,00 Euro |
| Geräte: | 24.133,00 Euro (lt. Bewilligung) |
| Mittelabruf von weiteren Bewilligungspositionen: | 2018-2021 Sachmittel: 31.503,21 Euro |
| Noch verfügbare Mittel aus der laufenden Bewilligung: | 0 Euro (43.062,30 Euro von 2021 noch nicht abgerufen) |

1.3 Aktueller Stand des Mittelabrufs aus früheren Bewilligungen

| | |
|--|--------|
| Noch verfügbare Mittel (frühere Bewilligungen zum Vorhaben): | 0 Euro |
|--|--------|

1.4 Publikationsliste (max. 10 wichtigste Publikationen aus diesem Projekt)**1.4.1 Bereits erschienene Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung**

2018

- [P1] Trinke, P., Haug, P., Brauns, J., Bensmann, B., Hanke-Rauschenbach, R., Turek, T., 2018. Hydrogen Crossover in PEM and Alkaline Water Electrolysis: Mechanisms, Direct Comparison and Mitigation Strategies. *Journal of The Electrochemical Society* 165, F502–F513. <https://doi.org/10.1149/2.0541807jes>
-

2020

- [P2] Brauns, J., Turek, T., 2020. Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review. *Processes* 8, 248. <https://doi.org/10.3390/pr8020248>
- [P3] Kreitz, B., Brauns, J., Wehinger, G.D., Turek, T., 2020. Modeling the Dynamic Power-to-Gas Process: Coupling Electrolysis with CO₂ Methanation. *Chemie Ingenieur Technik*. <https://doi.org/10.1002/cite.202000019>
-

2021

- [P4] Brauns, J., Schönebeck, J., Kraglund, M.R., Aili, D., Hnát, J., Žitka, J., Mues, W., Jensen, J.O., Bouzek, K., Turek, T., 2021. Evaluation of Diaphragms and Membranes as Separators for Alkaline Water Electrolysis. *J. Electrochem. Soc.* 168, 014510. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abda57>
- [P5] Becker, M., Brauns, J., Turek, T., 2021. Battery-Buffered Alkaline Water Electrolysis Powered by Photovoltaics. *Chemie Ingenieur Technik* 93, 655–663. <https://doi.org/10.1002/cite.202000151>
-

1.4.2 Andere Veröffentlichungen

2019

- [P6] Vortrag: Brauns, J., Turek T. Dynamic process modeling of an alkaline water electrolyzer
16th Symposium on Modeling and Validation of Electrochemical Energy Devices 2019 (Braunschweig, Deutschland)
- [P7] Vortrag: Brauns, J., Turek T. Dynamic operation strategies and design criteria for alkaline water electrolyzers powered by renewable energies
2nd International Conference on Electrolysis 2019 (Loen, Norwegen)
-

2021

- [P8] Vortrag: Brauns, J., Turek T. Model-based evaluation of dynamic operating concepts for alkaline water electrolyzers powered by renewable energy
Annual Meeting on Reaction Engineering 2021 (Online meeting)
- [P9] Vortrag: Brauns, J., Turek T. Enhancing the part-load range of alkaline water electrolyzers by model-based optimization
12th European Symposium on Electrochemical Engineering 2021 (Online meeting)
- [P10] Vortrag: Brauns, J., Turek T. Dynamic Validation of an Alkaline Water Electrolysis Model by Fluctuation Operation
72nd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry 2021 (Hybrid meeting, Online and Jeju Island, South Korea)
-

2 Arbeits- und Ergebnisbericht (max. 10 Seiten)

2.1 Ausgangslage und Zielsetzung des Projekts

Für eine nachhaltige Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energiequellen (bspw. Photovoltaik oder Windkraft) muss die Teillastfähigkeit von alkalischen Wasserelektrolyseuren erhöht werden. Aktuell limitiert eine sinkende Produktgasqualität die Anlagenverfügbarkeit in diesem Lastbereich, da sicherheitstechnische Grenzen den Betrieb einschränken. Die untere Explosionsgrenze (UEG) eines Gasgemischs aus Wasserstoff und Sauerstoff liegt bei ca. 4 Vol.% Wasserstoff in Sauerstoff, daher müssen industrielle Elektrolyseure beim Erreichen von 2 Vol.% Wasserstoff in Sauerstoff (50 % der UEG) abgeschaltet werden [P2]. Zusätzlich stellt die Elektrolyse unter erhöhtem Systemdruck eine wirtschaftlich interessante Alternative dar, da eine kostenintensive erste mechanische Kompressionsstufe eingespart werden kann und die steigenden Betriebskosten aufgrund einer nur leicht erhöhten Zellspannung kaum die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen [P1, P2, P3]. Daher soll im Rahmen dieses Projekt die Gasreinheit in der druckbetriebenen alkalischen Wasserelektrolyse sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht werden. Während die experimentellen Untersuchung mit Hilfe des DFG-geförderten Großgeräts (Projektnummer: 290019031) in einer selbstentwickelten Elektrolysezelle durchgeführt werden sollen, erfolgt die theoretische Untersuchung mit Hilfe bestehender Modellansätze, welche um die Dynamik und den Druckeinfluss erweitert werden sollen. Da hierfür ebenfalls Stoffdaten und Materialeigenschaften der verwendeten Komponenten benötigt werden, sollen diese im Rahmen geeigneter Experimente ermittelt und mit dem aktuellen Stand der Literatur verglichen werden. Beispielsweise sind in der Literatur verschiedenste Ansätze zur Berechnung der Gaslöslichkeit von Wasserstoff und Sauerstoff im verwendeten Elektrolyten Kalilauge vorhanden, welche voneinander abweichen [Z6]. Daher gilt es mit geeigneten Versuchsaufbauten die Gaslöslichkeit experimentell zu bestimmen und die beste Option für die Prozessmodellierung zu ermitteln. Außerdem besitzt das verwendete Separatormaterial einen großen Einfluss auf die resultierende Produktgasqualität, da im Elektrolyten gelöste Gase durch das Material diffundieren können und somit die Produktgasqualität sinkt. Daher sind die wichtigsten Materialgrößen von Separatoren in einer experimentellen Studie unter realen Betriebsbedingungen zu bestimmen [P4]. Diese Ergebnisse sollen ebenfalls zur Verbesserung des Modellansatzes beitragen [P6, P10].

Im Anschluss gilt es sowohl experimentell als auch theoretisch geeignete dynamische Betriebskonzepte für druckbetriebene alkalische Wasserelektrolyse zu ermitteln und miteinander zu vergleichen [P7-P9]. Daher wurden diese Themen im Projektantrag in folgende Arbeitspakete unterteilt, welche sich sowohl inhaltlich als auch in ihrer Vorgehensweise voneinander abgrenzen:

- AP 1: Stoffdatenermittlung (Gaslöslichkeit, Separatorpermeabilität)
- AP 2: Stationäre Messungen (Produktgasqualität, Zellspannung)
- AP 3: Stationäre Modellierung (Produktgasqualität, Zellspannung)
- AP 4: Dynamische Messungen (Produktgasqualität, Zellspannung)
- AP 5: Dynamische Modellierung (Produktgasqualität, Zellspannung)
- AP 6: Publikation der Ergebnisse

Während im ersten Teil vom AP 1 die Gaslöslichkeit von Wasserstoff und Sauerstoff im verwendeten Elektrolyten (Kalilauge) in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen (Temperatur, Elektrolytkonzentration, Betriebsdruck) experimentell ermittelt werden sollen, soll in einem zweiten Teil dieses Arbeitspakets die Permeabilität von geeigneten Separatormaterialien für die alkalische Wasserelektrolyse unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden. Im AP 2 sollen die Produktgasqualitäten der alkalischen Wasserelektrolyseanlage im stationären Betrieb bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen

(Stromdichte, Druck, Temperatur, Elektrolytkonzentration) gemessen und die Abhängigkeiten analysiert werden. Die erhaltenen Ergebnisse sollen im AP 3 zur Weiterentwicklung eines stationären verfahrenstechnischen Modells für die alkalische Wasserelektrolyse einfließen. Ein besonderes Augenmerk soll hierbei auf die Implementierung des Druckeinflusses gesetzt werden. Ebenfalls soll das Modell um einen geeigneten Ansatz für die Modellierung der resultierenden Zellspannung der Elektrolysezelle erweitert werden. Nachdem die Produktgasqualität sowohl experimentell als auch theoretisch im stationären Zustand untersucht wurde, ist die Analyse und Nutzung des dynamischen Elektrolysebetriebs geplant. Im AP 4 sind dynamische Messungen der Produktgasqualität und der Zellspannung vorgesehen, um geeignete Betriebskonzept für die Verwendung von fluktuierenden, erneuerbaren Energiequellen zu entwickeln. Hierfür sollen realitätsnahe Stromdichteprofile als Eingangssignal für die Elektrolyseanlage vorgegeben und anschließend geeignete Betriebsweisen experimentell miteinander verglichen werden. Beispielsweise bietet sich hierbei die dynamische Umschaltung zwischen einer getrennten und einer gemischten Betriebsweise beider Elektrolytkreisläufe an, was bereits in Vorarbeiten erprobt wurde [Z2].

2.2 Durchgeführte Arbeitsschritte und Konzeptabweichungen

Im Arbeitspaket 1 war die Untersuchung der Gaslöslichkeit unter Variation der Elektrolytkonzentration, der Temperatur und des Systemdrucks vorgesehen. Aufgrund des sehr aufwendigen Aufbaus für Versuche unter erhöhtem Druck wurden die Gaslöslichkeiten der Gase Wasserstoff und Sauerstoff im Elektrolyten bisher nur unter Variation der Elektrolytkonzentration und der Temperatur untersucht. Die Soll- und Ist-Versuchsbedingungen dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Soll- und Istwerte der Betriebsparameter für die experimentelle Bestimmung der Gaslöslichkeit mit Hilfe einer rotierenden Scheibenelektrode.

| | Soll | Ist |
|-------------------------------|-------------------|---|
| abs. Druck / bar | 1 / 10 / 20 / 30 | 1 |
| Temperatur / °C | 50 / 60 / 70 / 80 | 25 / 40 / 60 / 80 |
| Konzentration / Gew.-% | 28 / 30 / 32 / 34 | KOH: 10 / 20 / 25 / 30 / 35 / 40 NaOH: 10 / 20 |

Insgesamt wurden zwar die Versuche unter erhöhtem Druck ausgelassen, dafür wurde der Einfluss der Elektrolytkonzentration in einem größeren Konzentrationsbereich untersucht. Außerdem wurde die Gaslöslichkeit nicht nur in Kombination mit einer wässrigen KalilaugeLösung (KOH) experimentell bestimmt, sondern es wurde ebenfalls eine wässrige Lösung mit Natriumhydroxid (NaOH) betrachtet. Außerdem wurden im Rahmen dieses Versuchsaufbaus zusätzlich noch die Dichten und Leitfähigkeiten der angesetzten Elektrolytlösungen untersucht, was bisher nicht im Projektplan vorgesehen war. Diese zusätzliche Bestimmung von Stoffdaten wurde miteinbezogen, da hiermit die Genauigkeit der zu entwickelnden Modelle erhöht werden kann. Da die erhaltenen Daten der Gaslöslichkeit unter atmosphärischen Bedingungen grundsätzlich mit Literaturdaten übereinstimmten und die Druckabhängigkeit für die Modellierung auch als ideal angenommen werden kann, wurde auf eine Erweiterung des Aufbaus für einen Druckbetrieb verzichtet, da der Nutzen der experimentellen Daten deutlich geringer als der Zeit- und Kostenaufwand wäre. Die erhaltenen Daten bestätigen die Korrelationen aus einer Vielzahl Literaturquellen und können daher als valide für die Modellierung der alkalischen Wasserelektrolyse angenommen werden [Z6]. Grundsätzlich hat sich nur gezeigt, dass die experimentell bestimmten Gaslöslichkeiten bei

allen Versuchen unterhalb der Literaturdaten liegen. Die Ursache für diese Abweichungen muss in zukünftigen Arbeiten noch ermittelt werden.

Im Arbeitspaket 2 war die systematische Untersuchung der stationären Produktgasqualität unter Variation einzelner Betriebsparameter vorgesehen. In Tabelle 2 sind die Soll- und Ist-Versuchsbedingungen aufgeführt.

Tabelle 2: Soll- und Istwerte für die experimentelle Untersuchung der Produktgasqualität in der alkalischen Wasserelektrolyse.

| | Soll | Ist |
|--|---------|---------|
| Stromdichte / kA m⁻² | 0,3 – 5 | 0,5 – 7 |
| abs. Druck / bar | 1 – 30 | 1 – 20 |
| Volumenstrom / L min⁻¹ | 0,5 – 2 | 0,1 – 1 |
| Temperatur / °C | 50 – 90 | 50 – 80 |
| Konzentration / Gew.-% | 28 – 36 | 20 – 35 |

In der Projektbeschreibung wurde bereits darauf hingewiesen, dass zum Zeitpunkt der Antragsstellung die genauen Grenzen und Möglichkeiten des neuen Teststands noch nicht bekannt waren, daher mussten noch einige Anpassungen der realen Versuchsparameter vorgenommen werden. Insgesamt wurden aber alle angesprochenen Parametervariationen untersucht. In den ersten beiden Projektjahren war die Verfügbarkeit der Versuchsanlage aufgrund von Materialversagen deutlich reduziert, weswegen in dieser Zeit nur wenige Versuchsreihen durchgeführt werden konnten.

Die erhaltenen Ergebnisse konnten danach für die Weiterentwicklung des bestehenden, stationären Modells in den Arbeitspaketen 3 und 5 genutzt werden. Da insbesondere die auseinanderdriftenden Elektrolytkonzentrationen bei getrennten Elektrolytkreisläufen die resultierende Produktgasqualität beeinflusst und somit theoretisch nie ein vollständig stationärer Betriebszustand bei getrennten Elektrolytkreisläufen erreicht werden kann, wurden direkt zum Beginn des Projekts die dynamischen Effekte in das Modell integriert, wodurch eine sinnvolle Validierung mit den bisher erhaltenen Ergebnissen ermöglicht wurde. Zusätzlich wurde zur Implementierung eines Zellspannungsmodells die Energiebilanz des gesamten Systems aufgestellt, um dynamische Fahrweisen im Modell besser abbilden zu können. Insgesamt hat sich gezeigt, dass eine Validierung des Modells mit stationären Messdaten problemlos in der bisherigen Entwicklungsumgebung Siemens PSE gPROMS ModelBuilder möglich war. Der fortschreitende Komplexitätsgrad des Modells und die vielen Einflussgrößen erforderten aber eine dynamische Modellvalidierung mit fluktuierenden experimentellen Versuchsdaten, was nicht ohne einen deutlich größeren Aufwand in der bisherigen Umgebung möglich gewesen wäre. Deshalb wurde das Modell vollständig in die Programmiersprache Python (Version 3) überführt, womit die Differentialgleichungssysteme mit Hilfe des Pakets GEKKO (Version 1.0) gelöst werden können. Außerdem wurden direkte Schnittstellen sowohl zu den Messdaten des Gaschromatographen als auch zu den Messdaten der Versuchsanlage programmiert, wodurch eine Validierung mit einer Vielzahl von dynamischen Versuchen möglich wurde. Insgesamt hat dieser Schritt die Genauigkeit des Modells und die Validierbarkeit deutlich verbessert.

Aufgrund des Erfordernisses an dynamische Versuchsdaten zur Modellvalidierung wurde deshalb das Arbeitspaket 4 um Versuche mit synthetischen, fluktuierenden Lastprofilen ergänzt, welche nicht grundsätzlich zur Erweiterung des Teillastbereichs beitragen, sondern eher für die Modellvalidierung herangezogen wurden. Mit Hilfe des validierten, dynamischen

Modells des alkalischen Wasserelektrolyseurs war es nun möglich, gezielte dynamische Betriebsweisen zu erforschen oder dynamische Versuchsreihen zu planen. In diesem Zusammenhang wurden erstmalig sinusförmige Stromdichteprofile für den alkalischen Wasserelektrolyseur genutzt und der Effekt auf die Gasreinheit und Zellspannung bewertet. Insgesamt konnte keine große Abweichung zum idealen Verhalten gemäß dem Modell nachgewiesen werden. Neben gleichförmigen, dynamischen Stromdichteprofilen wurden auch fluktuierende Stromdichteprofile mit Hilfe der Daten der universitätsinternen Wetterstation erzeugt und für Versuche und Simulationen verwendet. Hierbei hat sich ebenfalls gezeigt, dass Experiment und Simulation sehr gut übereinstimmen und deshalb mit der Entwicklung von geeigneten dynamischen Prozessführungsvarianten begonnen werden kann. Hierfür wurden synthetische, fluktuierende Lastprofile als Beispiel für die Nutzung von Photovoltaikanlage oder Windkraftanlagen zum Betrieb von alkalischen Wasserelektrolyseuren mit etablierten Literaturansätzen berechnet und zum weiteren experimentellen und modellgestützten Vergleich der Prozessführungsstrategien verwendet.

2.3 Erfahrungen über die angewandten Methoden und Nachnutzungsmöglichkeiten

Die angewandten Methoden können in Folgeprojekten sehr gut weitergenutzt werden. Insgesamt wurden im Rahmen der Studien dieses Projekts geeignete Versuchsabläufe für die Bewertung von Separatormaterialien entwickelt. Grundlegend können neu entwickelte Materialien mit Hilfe der veröffentlichten Methoden und experimentellen Ergebnissen direkt mit dem aktuellen Stand der Technik verglichen werden, wodurch viele Materialhersteller an Tests gemäß unseren veröffentlichten Daten interessiert sind.

Ebenfalls werden die gemessenen Gasreinheiten und Modellansätze zur Beschreibung des Anlagenverhaltens in verschiedenen Folgeprojekten eingesetzt, welche alle im Jahr 2021 gestartet sind:

- Alkalische Wasserelektrolyse mit Gasdiffusionselektroden – DFG-Projekt 450621348
- Innovationslabor Wasserelektrolyse: Vom Material zum System (InnoEly) – gefördert durch das MWK des Landes Niedersachsen
- Entwicklung und Charakterisierung von kostengünstigen Wasserelektrolysestacks (StaR) – BMBF-Projekt 03HY102B

Neben den universitätsinternen Folgeprojekten können die veröffentlichten Ergebnisse ebenfalls von externen Forschungsgruppen zur Projektentwicklung herangezogen werden, was insgesamt das Verständnis und die Weiterentwicklung der alkalischen Wasserelektrolyse stärkt.

Neben der themenbezogenen Weiternutzung können die erhaltenen Erfahrungen im Hinblick auf die Modellierung von komplexen, verfahrenstechnischen Systemen in der Open Source Programmiersprache Python für viele andere Modellansätze verwendet werden, wofür bis vor wenigen Jahren kostenintensive kommerzielle Software eingesetzt werden musste, da es keine Alternative zur Lösung von komplexen Differentialgleichungssystemen gab. Insgesamt können so Kosten eingespart und die Vergleichbarkeit der Modellierungsansätze erhöht werden, da nun eine freie Referenzsoftware existiert, die nicht nur für Projekte, sondern auch direkt in der Lehre eingesetzt werden kann. Wenn es die jeweilige Modellkomplexität zulässt, sollten zukünftige Projekte vermehrt auf Open Source Software setzen, damit in den nächsten Jahren eine größere Nutzerbasis von freier Software für die Forschung entsteht und somit weniger kostenintensive Software im Rahmen von öffentlich geförderten Projekten beschafft werden muss.

2.4 Bisher vorliegende Ergebnisse und Zugriffshäufigkeit durch Dritte

Innerhalb des Arbeitspakets 1 wurde sowohl die Gaslöslichkeit von Wasserstoff und Sauerstoff in Kalilauge und Natronlauge bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen experimentell mit Hilfe einer rotierenden Scheibenelektrode bestimmt. Ausgewählte Ergebnisse für die Wasserstofflöslichkeit in Kalilauge sind in Abhängigkeit von der Temperatur und der Elektrolytkonzentration in Vergleich zu Literaturdaten in Abbildung 1 dargestellt.

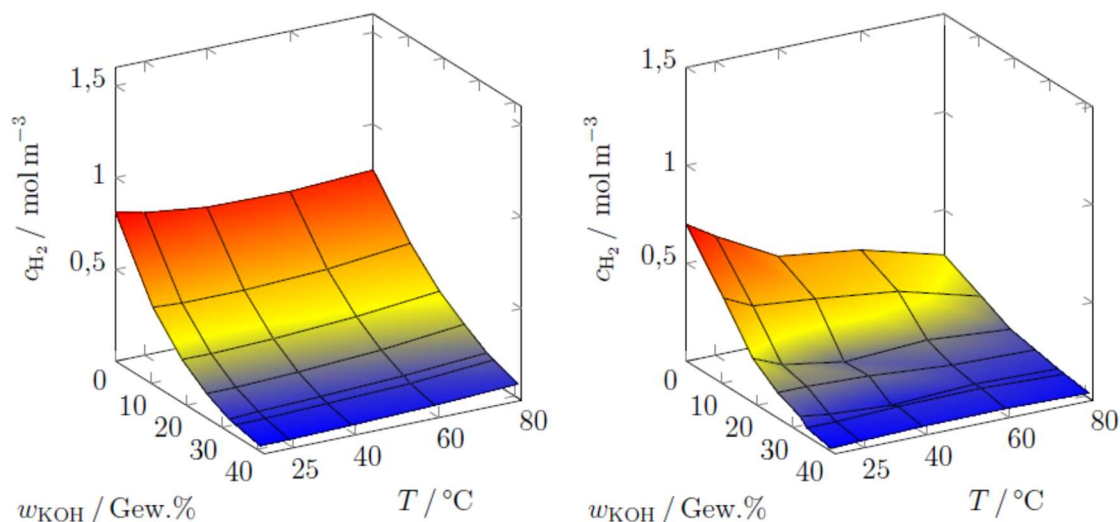


Abbildung 1: Berechnete (links) und gemessene Gaslöslichkeiten (rechts) von Wasserstoff in Kalilauge in Abhängigkeit der Elektrolytkonzentration und der Temperatur [Z6].

Es ist erkennbar, dass die gemessene Gaslöslichkeit von Wasserstoff besonders bei hohen Temperaturen und geringen Elektrolytkonzentrationen von den Literaturwerten abweicht. Diese Abweichungen können vermutlich auf systematische Messfehler in diesen Bereichen zurückgeführt werden. Insgesamt liegen die ermittelten Gaslöslichkeiten aber in einem ähnlichen Größenbereich wie die Literaturdaten. Eine besonders gute Übereinstimmung wird bei höheren Elektrolytkonzentrationen ab 30 Gew.-% KOH erreicht. Somit können die Messungen im realitätsnahen Anwendungsbereich für die alkalische Wasserelektrolyse zur Identifikation der am besten geeigneten Modellansätze aus der Literatur verwendet werden [Z6]. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die Sauerstofflöslichkeit in Kalilauge am ehesten mit den Ansätzen von Himmelblau [Z7] und Weisenberger et al. [Z8] beschrieben werden kann, da in dieser Kombination die erhaltenen Messergebnisse größtenteils unter den relevanten Betriebsbedingungen nachgestellt werden können. Zur Beschreibung der Wasserstofflöslichkeit ist die Kombination aus den Ansätzen von Himmelblau [Z7] und Shoor et al. [Z9] am besten geeignet, da hier ebenfalls die Übereinstimmung mit den Messergebnissen bei höher konzentrierten Elektrolytlösungen gut ist [Z6]. Für die Ergebnisse bezüglich der Studie zu Separatoren für die alkalische Wasserelektrolyse wird auf unsere Open Access Veröffentlichung verwiesen (siehe [P4]). Insgesamt konnte gezeigt werden, dass Diaphragmen (poröse Separatoren) aktuell die beste Performance für die alkalische Wasserelektrolyse aufweisen, da sowohl die ohmschen Verluste als auch die Beeinflussung der Gasreinheit nur sehr gering sind. Zudem konnte bestätigt werden, dass funktionalisierte Membranen eher für geringere Elektrolytkonzentrationen geeignet sind, wodurch diese eine interessante Alternative für die alkalische Membranelektrolyse sind, welche in Zukunft eine größere Bedeutung erlangen könnte, da diese eine direkte Alternative zur PEM-Elektrolyse darstellt.

Im Arbeitspaket 2 sollten die stationären Produktgasqualitäten der alkalischen Wasserelektrolyse bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen vermessen werden. Für die Ergebnisse wird ebenfalls auf unsere Veröffentlichung verwiesen (siehe [P1]).

Für die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 3 und 5 (Weiterentwicklung des Modells für die alkalische Wasserelektrolyse) wird auf die geplanten Arbeiten im Kapitel 5 verwiesen. Grundlegend war die Weiterentwicklung des verfahrenstechnischen Modells mit Hilfe der experimentellen Versuche erfolgreich, jedoch verzögerten sich einige der essentiellen Versuchsreihen aufgrund einer geringen Anlagenverfügbarkeit in den ersten beiden Projektjahren (siehe Abschnitt 2.2). Als Ausgleich wurde in dieser Zeit ein Review-Artikel zur alkalischen Wasserelektrolyse in Kombination mit erneuerbaren Energien veröffentlicht (siehe [P2]), welcher bisher (18.08.2021) 15747-mal im Volltext aufgerufen wurde und damit einer der erfolgreichsten Artikel dieser Zeitschrift aus den letzten drei Jahren ist.

Die Weiterentwicklung des verfahrenstechnischen Modells für die alkalische Wasserelektrolyse wurde auf Basis der Veröffentlichung von Haug et al. [Z1] durchgeführt. Die Elektrolysezelle wird hierbei als zwei über einen Separator verbundene zweiphasige, kontinuierliche Rührkessel dargestellt. Daher erfolgte die Einbeziehung von dynamischen Effekten durch die Einführung des Akkumulationsterms in den Bilanzgleichungen. Auch die Gasabscheider mussten als eine weitere Modelleinheit eingebunden werden, da die Volumina beider Apparate einen signifikanten Effekt auf die zeitliche Entwicklung der Gasverunreinigung haben. Hierfür wurden beide Behälter ebenfalls als zweiphasige, kontinuierliche Rührkessel in das Modell implementiert. Der Druckeinfluss musste insbesondere bei der Gasphase berücksichtigt werden. Hierfür wurden ideale Beziehungen zwischen den Druckniveaus angenommen, sodass sowohl der Gasblasendurchmesser als auch der Gasphasenanteil mit steigendem Druck sinken. Ebenfalls erhöht sich bei steigendem Druck die maximal im Elektrolyten lösliche Gasmenge, da ebenfalls ein höher Partialdruck der Spezies vorherrscht. Somit verblieben zwei Modellparameter, welche für eine Validierung genutzt werden können. Haug et al. beschrieb bereits in den Vorarbeiten, dass die Gasentwicklungseffizienz als Validierungsgröße für die alkalische Wasserelektrolyse geeignet ist, da die Massentransportvorgänge während der Gasentwicklung an den Elektroden nur schwer exakt beschrieben werden können [Z1]. Daher muss hierfür eine geeignete Korrelationsgleichung entwickelt und mit experimentellen Messdaten validiert werden. Neben der Stromdichteabhängigkeit muss bei dieser Größe ebenfalls die Druckabhängigkeit mit implementiert werden, da die Gasentwicklungseffizienz aufgrund der höheren Gaslöslichkeit sinken muss. Darüber hinaus haben Haug et al. und Trinke et al. bereits darauf hingewiesen, dass eine Übersättigung der gelösten Produktgasspezies in der Separatornähe vorliegen muss, da die Gasverunreinigungen mit getrennten Elektrolytkreisläufen deutlich oberhalb der ideal zu erwartenden Werte liegen [P1]. Daher wurde hierfür ebenfalls eine weitere Modellgröße eingeführt, welche im weiteren Verlauf als Übersättigungsfaktor bezeichnet wird.

Die eigentliche Modellvalidierung wurde anschließend mit Hilfe von stationären und dynamischen Versuchsdaten durchgeführt, womit die Korrelationsparameter für die Gasentwicklungseffizienz und den Übersättigungsfaktor mit Hilfe einer Parameterbestimmung ermittelt wurden. Die finalen Validierungsergebnisse werden in der noch geplanten Veröffentlichung mit einem Verweis auf dieses Projekt aufgeführt sein. Als Beispiel ist in Abbildung 2 ein Vergleich zwischen dynamischen Versuchsdaten und dem aktuellen Stand des Modells dargestellt.

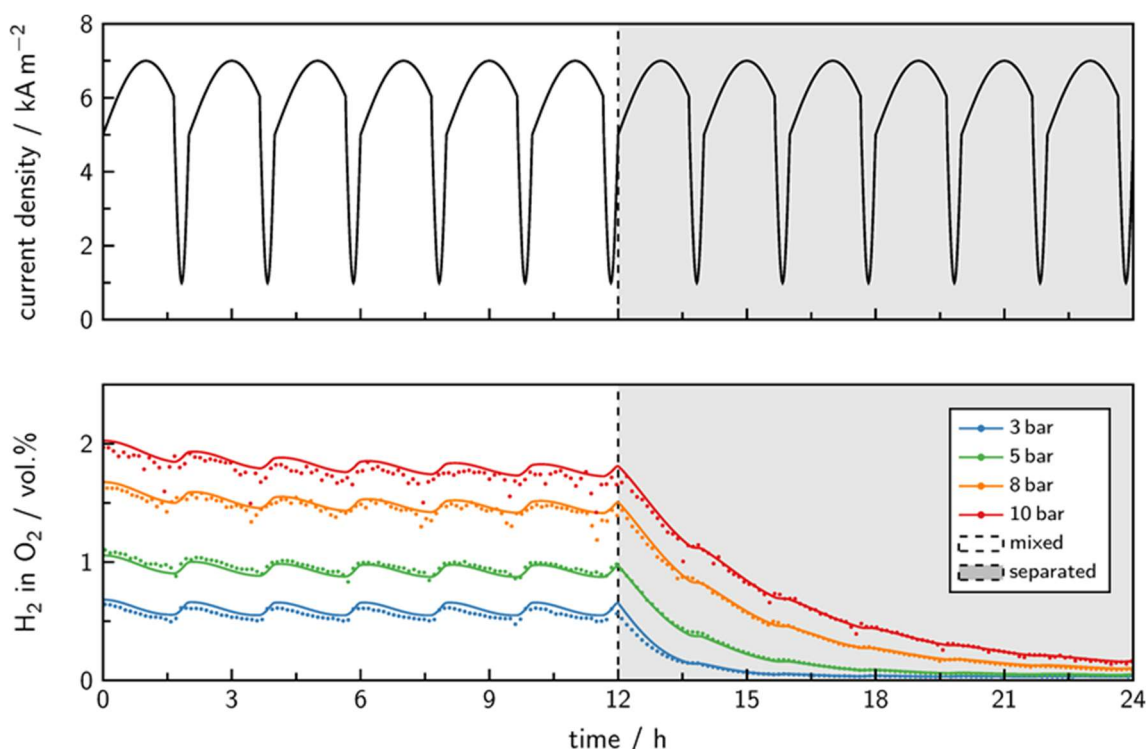


Abbildung 2: Gemessene (Punkte) und simulierte (Linie) Gasverunreinigung während der dynamischen Modellvalidierung mit gemischten und getrennten Elektrolytkreisläufen bei 60°C und einem Elektrolytvolumenstrom von 350 mL min⁻¹ [P10].

Innerhalb von Arbeitspaket 4 waren dynamische Versuche für die Entwicklung von vorteilhaften Betriebskonzepten für die alkalische Wasserelektrolyse in Kombination mit erneuerbaren Energien vorgesehen. Neben der Verwendung von realen Wetterdaten, wurden ebenfalls synthetische Lastprofile von Windkraft- und Photovoltaikanlagen mit Hilfe von etablierten Modellansätzen aus der Literatur simuliert, wodurch ein gezielter Vergleich von unterschiedlichen Fahrweisen ermöglicht wurde.

Die Veröffentlichung einer solchen experimentellen Studie ist in den nächsten Monaten geplant. Insgesamt hat sich gezeigt, dass sowohl das periodische Wechseln zwischen getrennten und zusammengeführten Elektrolytkreisläufen als auch eine adaptive Regelung des Elektrolytvolumenstroms im Hinblick auf die aktuelle Systemlast sehr gute Möglichkeiten sind, um die Gasverunreinigung im fluktuierenden Teillastbereich deutlich zu senken. In Abbildung 3 sind hierfür beispielhafte Simulationsergebnisse für diese Studie dargestellt, welche mit Hilfe des Versuchsstands ebenfalls experimentell nachgestellt wurden.

Insgesamt ist zu erkennen, dass ein dauerhafter Betrieb mit gemischten Elektrolytkreisläufen unter diesen Randbedingungen nicht sinnvoll ist, da die Gasverunreinigung in manchen Zeiträumen oberhalb von 2 Vol.-% Wasserstoff in Sauerstoff liegt und technische Anlagen aus Sicherheitsgründen hätten herunterfahren werden müssen. Mit Hilfe des dynamischen Betriebs kann die Gasverunreinigung unter diesen Betriebsbedingungen nahezu halbiert werden, wodurch die Anlagenverfügbarkeit erhöht wird und somit mehr erneuerbare Energie für die Wasserstoffproduktion verwendet werden kann. Der Einfluss dieser Betriebskonzepte auf die Zellspannung ist nur minimal, da die Elektrolytkonzentration durch das Mischen beider Kreisläufe ausgeglichen wird und somit keine signifikanten Nachteile zum konventionellen Betrieb entstehen. Der eigentliche Nutzen dieser Verfahrenskonzepte kann daher direkt mit der Erhöhung der Produktgasqualität bewertet werden. Damit wird eine weniger intensive Aufreinigung der Produktgase benötigt und eine längeren Anlagenbetriebszeit ermöglicht.

Daher ist die Einbindung von dynamischen Betriebskonzepten für die großtechnische Nutzung von alkalischen Wasserelektrolyseuren abschließend als positiv zu bewerten. Vorläufige Ergebnisse dieses Arbeitspakets wurden bereits auf mehreren nationalen und internationalen Fachkonferenzen einem breiten Publikum präsentiert [P6-P10].

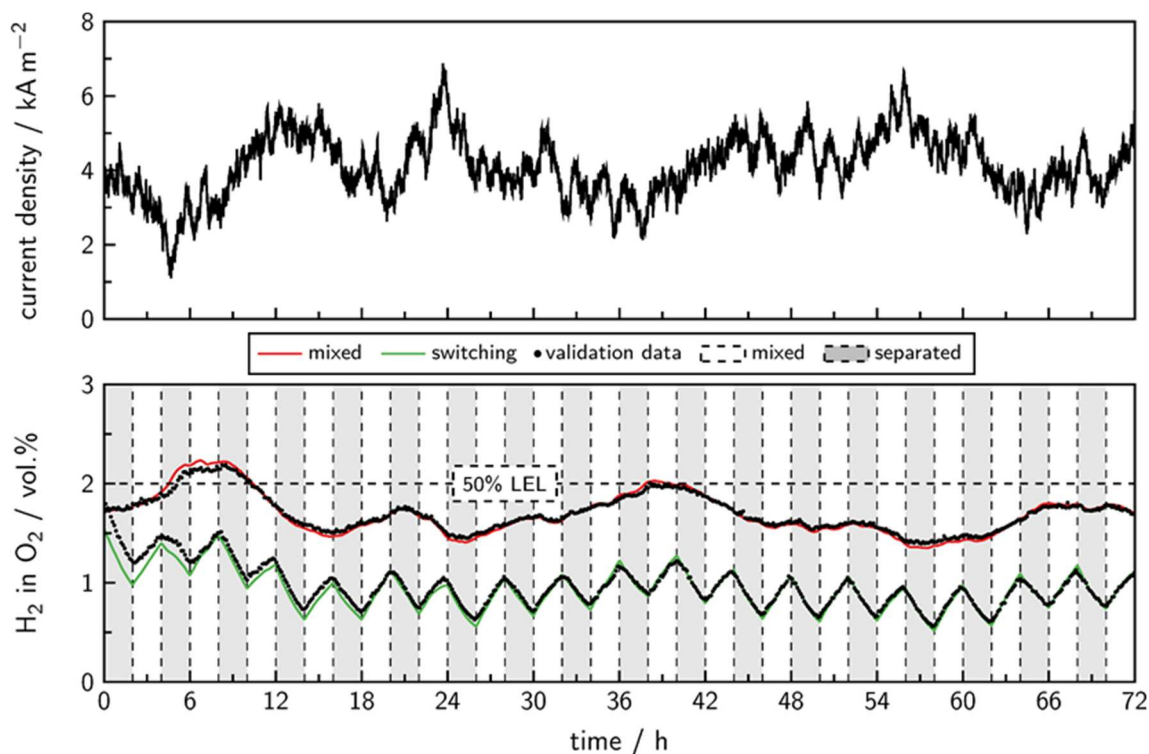


Abbildung 3: Simulierte (durchgezogene Linien) und experimentelle Ergebnisse (Punkte) der Gasverunreinigung bei einem Systemdruck von 7 bar, einer Elektrolyttemperatur von 60°C und einem Elektrolytvolumenstrom von 350 mL min⁻¹. Die wässrige Elektrolytlösung enthält ungefähr 32 Gew.-% KOH [P10].

Inhaltlich wurden hiermit alle Themen der Arbeitspakete bearbeitet und bereits ein großer Anteil der Ergebnisse in Form von Publikationen in Fachzeitschriften veröffentlicht. Die bisher noch ausstehenden Projektergebnisse sollen zukünftig ebenfalls veröffentlicht werden (siehe Kapitel 5).

2.5 Zum Projekt beitragende Personen

Die Personen, welche einen signifikanten Beitrag zu den Projektergebnissen beitragen haben, sind in der nachfolgenden Tabelle mit der jeweiligen Zugehörigkeit und Funktion aufgeführt.

| Person | Zugehörigkeit | Funktion |
|--------------------------------|---------------|--|
| Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek | TU Clausthal | Antragsteller |
| Jörn Brauns | TU Clausthal | Projektbearbeiter |
| Dr.-Ing. Philipp Haug | TU Clausthal | Interner Kooperationspartner für AP 2 [P1] |
| Prof. Dr.-Ing. Gregor Wehinger | TU Clausthal | Interner Kooperationspartner für AP 6 [P3] |

Abschlussbericht

| | | |
|---|----------------------------|---|
| Jonas Schönebeck | TU Clausthal | Abschlussarbeiter (Masterarbeit) für AP 1, AP 2, AP 3 und AP 5, AP 6 [P4, Z2] |
| David Hövelmeyer | TU Clausthal | Abschlussarbeiter (Masterarbeit) für AP 2, AP 3 und AP 5 [Z4] |
| Felix Gäde | TU Clausthal | Abschlussarbeiter (Masterarbeit) für AP 2 und AP 5 [Z5] |
| Niklas Speer | TU Clausthal | Abschlussarbeiter (Masterarbeit) für AP 1 und AP 3 [Z6] |
| Bjarne Kreitz | TU Clausthal | Interner Kooperationspartner für AP 5/6 [P3] |
| Dr.-Ing. Maik Becker | TU Clausthal | Interner Kooperationspartner für AP 5/6 [P5] |
| Patrick Trinke | LU Hannover | |
| Boris Bensmann | LU Hannover | Externer Kooperationspartner für AP 6 [P1] |
| Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach | LU Hannover | |
| Mikkel Rykær Kraglund. | DTU, Dänemark | |
| David Aili | DTU, Dänemark | |
| Prof. Jens Oluf Jensen | DTU, Dänemark | Externer Kooperationspartner für AP 1/6: Separatormaterialien, |
| Jaromír Hnát. | UCT, Tschechien | Kooperationspartner für die |
| Prof. Karel Bouzek | UCT, Tschechien | Masterarbeit von Jonas |
| Jan Žitka | CAS, Tschechien | Schönebeck [P4, Z3] |
| Willem Mues | Agfa-Gevaert N.V., Belgien | |
| Dr.-Ing. Ingmar Hartung | IAV GmbH | Kooperationspartner für die Masterarbeit von David Hövelmeyer |

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek agierte als Antragssteller und Projektbetreuer für die Gesamtheit der anfallenden Themengebiete. Jörn Brauns war der hauptsächliche Projektbearbeiter und somit für die Planung, Durchführung, Dokumentation und Veröffentlichung der Ergebnisse der Arbeitspakete verantwortlich. Außerdem wurden die aktuellen Fragestellungen von dynamisch betriebenen alkalischen Wasserelektrolyseuren in Kombination mit erneuerbaren Energien in einem Review-Artikel vom Projektbearbeiter veröffentlicht (siehe [P2]). Die Messung der stationären Produktgasqualitäten auf verschiedenen Druckniveaus (AP 2) konnte gemeinsam mit Philipp Haug und Partnern von der LU Hannover aus der Arbeitsgruppe von Prof Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind bereits in der Zeitschrift *Journal of The Electrochemical Society* publiziert (siehe [P1]). Im Rahmen von Abschlussarbeiten leisteten Jonas Schönebeck, David Hövelmeyer, Felix Gäde und Niklas Speer einen wesentlichen Anteil zu den Projektergebnissen, da die Themen der Abschlussarbeiten an die Arbeitspakete (AP1, AP2, AP3, AP5, AP6) innerhalb dieses Projekts angelehnt waren und somit den Projektbearbeiter bei der Bearbeitung aller Aufgabenstellungen unterstützen [Z3-Z6].

Außerdem konnten mehrere europäische Forschungsinstitute und Industrieunternehmen als Kooperationspartner gewonnen werden. Zur Untersuchung des Einflusses von porösen

Separatoren und dichten Membranen auf die Performance der alkalischen Wasserelektrolyse wurden dem Projektbearbeiter mehrere vorkommerzielle Separatoren des belgischen Unternehmens Agfa-Gevaert N.V. zur Verfügung gestellt. Außerdem haben sowohl ein dänisches als auch zwei tschechische Forschungsinstitute selbstentwickelte Membranen zur Verfügung gestellt, womit die vorkommerziellen und kommerziell bereits verfügbaren Materialien experimentell verglichen werden konnte. Die erhaltenen Ergebnisse wurden als gemeinsame Forschungsarbeit in der Zeitschrift *Journal of The Electrochemical Society* unter Open Access Richtlinien veröffentlicht (siehe [P4]). Ebenfalls konnten mit Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek, Prof. Dr.-Ing. Gregor Wehinger, Bjarne Kreitz und Maik Becker gemeinsame Veröffentlichungen publiziert werden, welche sich hauptsächlich mit der Modellierung von alkalischen Wasserelektrolyseuren beschäftigen, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Während eine Forschungsarbeit die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu Methan vorsah (siehe [P3]), beschäftigt sich die andere Publikation mit der Einbindung einer Pufferbatterie in Kombination mit einem alkalischen Wasserelektrolyseur zur Nutzung von erneuerbaren Energien zur Wasserstoffproduktion (siehe [P5]). Die IAV GmbH unterstützte die Abschlussarbeit von David Hövelmeyer durch die Bereitstellung von realen Betriebsdaten von einem alkalischen Wasserelektrolyseur, welche zur Weiterentwicklung des dynamischen Prozessmodells verwendet wurden. Die konkreten Betriebsdaten dürfen nicht veröffentlicht werden, da diese einer Verschwiegenheitserklärung unterliegen.

2.6 Eigenleistung

Die bisher eingebrachte Eigenleistung entspricht dem Umfang des ursprünglichen Konzepts, da grundsätzlich die Themengebiete aller Arbeitspakete bearbeitet wurden und lediglich der Umfang mancher Versuchsreihen oder die genaue Zielsetzung mancher Themengebiete leicht angepasst wurde. Die Einschränkungen der Covid19-Pandemie (beschränkter Zutritt zu den Laboren) konnte durch die vielfältige Aufgabenstellung aus theoretischen und praktischen Arbeiten sowie durch die kostenneutrale Verlängerung des Projekts um drei Monate zufriedenstellend ausgeglichen werden. Die bisher unveröffentlichten Ergebnisse sollen in den kommenden Monaten mit einem Vermerk auf dieses Projekt in Zeitschriften mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung publiziert werden.

2.7 Öffentlichkeitsarbeit

Die Projektbeschreibung wurde seit Projektbeginn im März 2018 auf folgender Internetseite der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

<https://www.icvt.tu-clausthal.de/forschung/forschungsprojekte/arbeitsgruppe-turek/untersuchung-der-gasreinheit-in-der-druckbetriebenen-alkalischen-wasserelektrolyse>

Darüber hinaus wurden das Projekt sowohl Studierenden der TU Clausthal im Rahmen von angebotenen Abschluss- und Projektarbeiten sowie einem interessierten Publikum auf mehreren Fachkonferenzen in Form von Vorträgen und Postern dargestellt.

3 Zusätzliche Literatur

- [Z1] Haug, P., Kreitz, B., Koj, M., Turek, T., 2017. Process modelling of an alkaline water electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 15689–15707. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.031>
- [Z2] Haug, P., Koj, M., Turek, T., 2017. Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 9406–9418. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.111>
- [Z3] Schönebeck J., Masterarbeit, Masterarbeit, Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Separatormaterialien auf die alkalische Wasserelektrolyse, 2019.
- [Z4] Hövelmeyer D., Masterarbeit, Weiterentwicklung und Validierung eines Modells für die alkalische Wasserelektrolyse hinsichtlich des Betriebs im industriellen Maßstab, 2020.
- [Z5] Gäde F., Masterarbeit, Weiterentwicklung von Gasdiffusionselektroden für die alkalische Wasserelektrolyse durch die Optimierung des Porensystems und die Einbringung von Elektrokatalysatoren, 2021.
- [Z6] Speer N., Masterarbeit, Experimentelle Bestimmung von Stoffdaten für die Modellierung von elektrochemischen Prozessen, 2021.
- [Z7] Himmelblau, D.M., 1960. Solubilities of Inert Gases in Water. 0° C to Near the Critical Point of Water. *J. Chem. Eng. Data* 5, 10–15. <https://doi.org/10.1021/je60005a003>
- [Z8] Weisenberger, S., Schumpe, A., 1996. Estimation of gas solubilities in salt solutions at temperatures from 273 K to 363 K. *AIChE Journal* 42, 298–300. <https://doi.org/10.1002/aic.690420130>
- [Z9] Shoor, S.K., Walker, R.D., Gubbins, K.E., 1969. Salting out of nonpolar gases in aqueous potassium hydroxide solutions. *The Journal of Physical Chemistry* 73, 312–317. <https://doi.org/10.1021/j100722a006>

4 Zusammenfassung (max. 1 Seite)

Innerhalb dieses Projekts wurde die Gasreinheit in der druckbetriebenen alkalischen Wasserelektrolyse sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht. Da für die theoretische Analyse der Gasreinheit eine genaue Kenntnis der Stoffdaten der vorkommenden Komponenten erforderlich ist, wurde im Arbeitspaket 1 eine experimentelle Bestimmung der Gaslöslichkeit von Wasserstoff und Sauerstoff in dem Elektrolyten Kalilauge durchgeführt. Die Gaslöslichkeit wurde hierbei elektrochemisch mit Hilfe einer rotierenden Scheibenelektrode ermittelt. Grundsätzlich war die Ermittlung der Gaslöslichkeit unter atmosphärischen Bedingungen erfolgreich und es wurden ähnliche Größenordnungen wie in der Literatur erreicht. Als Resultat konnte die am besten passende Korrelation aus der Literatur für die weiteren Berechnungen verwendet werden. Aufgrund des herausfordernden Aufbaus einer rotierenden Scheibenelektrode unter einem erhöhten Betriebsdruck, konnten leider keine Messungen unter erhöhtem Druck durchgeführt werden. Dafür wurde der Einfluss des Separators auf die Gasreinheit in Zusammenarbeit mit der Firma AGFA-Gevaert N.V. und weiteren europäischen Forschungsinstituten anhand von kommerziellen und vorkommerziellen Materialien im Druckbetrieb untersucht. Dabei wurden die ohmschen Spannungsverluste, welche auf den Separator zurückzuführen sind, ebenfalls betrachtet. Die Ergebnisse dieser Studie wurden bereits in einer Fachzeitschrift veröffentlicht.

Innerhalb vom Arbeitspaket 2 wurde die Produktgasqualität im Druckbetrieb experimentell untersucht. Diese Studie hat gezeigt, dass die Gasreinheit mit steigendem Druck sinkt und daher ein sicherer und effizienter Betrieb schwieriger umzusetzen ist. Die Ergebnisse dieser Studie wurden ebenfalls bereits in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke Rauschenbach an der LU Hannover veröffentlicht.

Im Arbeitspaket 3 wurde die stationäre Modellierung des Druckelektrolysesystems um die erhaltenden experimentellen Ergebnisse im Druckbetrieb ergänzt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass neben der Gasentwicklungseffizienz ebenfalls ein Verstärkungsfaktor für den diffusionsgetriebenen Stofftransport der gelösten Produktgase durch den Separator eingeführt werden muss, um die experimentellen Ergebnisse mit dem Modell nachstellen zu können.

Innerhalb von Arbeitspaket 4 wurden Experimente zur Entwicklung von dynamischen Prozessführungsvarianten durchgeführt. Der Hauptfokus lag hierbei auf dem Einsatz von synthetischen fluktuierenden Lastprofilen von erneuerbaren Energien und der zeitlichen Variation der Elektrolytführungskonzepte. Eine Publikation dieser Ergebnisse ist aktuell in Vorbereitung.

Im Arbeitspaket 5 wurde das bestehende Modell für den dynamischen Einsatz erweitert, wodurch alle Bilanzgleichungen nun eine zeitliche Abhängigkeit aufweisen. Ebenfalls besitzen nun die jeweiligen Apparatvolumina einen Einfluss auf die Ergebnisse, da diese die zeitlichen Verläufe innerhalb der Akkumulationsterme beeinflussen. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die stationär ermittelten Gasverunreinigungen nicht vollständig zur Validierung des dynamischen Modells geeignet sind und eine dynamische Validierung erforderlich ist, da sowohl Zeit eingespart als auch die Genauigkeit des Modells gesteigert werden kann. Eine Publikation dieser Ergebnisse befindet sich aktuell ebenfalls in Vorbereitung.

5 Weitere Arbeiten und Planung

Nach Projektabschluss ist noch die Veröffentlichung von zwei Forschungsarbeiten in etablierten Fachzeitschriften geplant. Die erste Veröffentlichung soll experimentelle Studien zu dynamischen Betriebsstrategien für alkalische Wasserelektrolyseure in Kombination mit der Nutzung von erneuerbaren Energien beinhalten und somit direkt das Thema aus dem Arbeitspaket 4 aufgreifen. Das Manuskript ist aktuell in Vorbereitung und soll in den nächsten Monaten in der anerkannten Fachzeitschrift *Electrochimica Acta* eingereicht werden. Die zweite geplante Veröffentlichung soll den Modellansatz zur dynamischen Beschreibung einer druckbetriebenen alkalischen Wasserelektrolyseanlage beinhalten und ist daher an das Thema des Arbeitspakets 5 angelehnt. Das Manuskript zu dieser Veröffentlichung ist aktuell ebenfalls in Vorbereitung und soll bis Ende 2021 bei der Fachzeitschrift *Journal of The Electrochemical Society* eingereicht werden. Die Konzepte zur Verbesserung des Teillastverhaltens von alkalischen Wasserelektrolyseuren sollen ebenfalls im BMBF-geförderten StaR-Projekt in einem größeren Anlagenmaßstab weiter untersucht werden (siehe Abschnitt 2.3).

6 Veröffentlichung von Daten aus Abschlussberichten

Die Veröffentlichungen im Kapitel 1.4.1 können in Kombination mit der Zusammenfassung in die Datenbank GEPRIS aufgenommen werden.


7 Weitere Bemerkungen zum Vorhaben/Anregungen etc.

Entfällt.

8 Unterschrift(en)

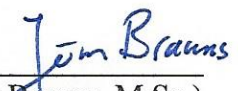
Antragsteller:

(Ort, Datum, Unterschrift)

Clausthal-Zellerfeld, 31.8.2021 
(Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek)

Projektbearbeiter:

(Ort, Datum, Unterschrift)

Clausthal-Zellerfeld, 31.08.2021 
(Jörn Brauns, M.Sc.)