

Clausthal-Zellerfeld, 31.03.2026

**Verbundvorhaben NG1: StaR ;
Teilvorhaben: Entwicklung und Charakterisierung von kostengünstigen
Wasserelektrolysestacks**

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil I: Kurzbericht

Stand:	31.12.2025
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Technische Universität Clausthal – Forschungszentrum Energiespeichertechnologien EST
Autorinnen/Autoren:	T. Turek, M. Becker, I. Hauer, C. Minke, S. Appelhaus, J. Brauns, S. Bauer, F. Gäde, L. Söffker, O. Zielinski
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_NG1: StaR – TU Clausthal: Entwicklung und Charakterisierung von kostengünstigen Wasserelektrolysestacks
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY102B
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



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

Das Teilvorhaben StaR war im Rahmen des Verbundvorhabens H₂Giga NG1 – StaR darauf ausgerichtet, einen kostengünstigen, skalierbaren und langlebigen alkalischen Wasserelektrolysestack zu entwickeln. Dabei sollten durch parallele Stack-, Herstellungs- und Prozessentwicklung die Herstellungskosten für alkalische Wasserelektrolyseure deutlich unter die Marktprognosen für 2030 gesenkt werden.

Um diese Zielsetzung zu erreichen, muss das Design des Stackkonzeptes konsequent auf die Herstellbarkeit und die Materialverfügbarkeit ausgelegt sein. Die Arbeitspakete der Technischen Universität Clausthal (TU Clausthal) am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) waren auf die Charakterisierung der Materialien auf der Laborebene und den Betrieb des Shortstacks mit voller kommerzieller WEW-Zellgröße fokussiert. Dabei wurde ein ganzheitlicher Ansatz von der systematischen Erfassung und Bewertung aller materialseitigen Anforderungen über die Entwicklung und experimentelle Charakterisierung von Zellen auf funktionaler Ebene bis zur modellhaften Betrachtung des Gesamtelektrolyseursystems gewählt.

2. Ablauf des Vorhabens

Die Projektarbeit am EST wurde entsprechend den im Antrag definierten Arbeitspaketen durchgeführt, insbesondere im späteren Projektverlauf wurden davon ausgehend relevante Unterthemen eingehender betrachtet. Das Teilvorhaben wurde entlang der im Antrag definierten Arbeitspakete (AP) umgesetzt. Schwerpunkte waren die materialbezogenen Grundlagen (AP 2.1.1), das Zelldesign und Streustromhandling (AP 2.1.2, AP 2.1.3) sowie der Aufbau und Betrieb eines Short-Stack-Testfeldes einschließlich Lebenszyklusanalyse (AP 2.3).

In AP 0 koordinierte das EST das eigene Teilvorhaben und beteiligte sich am Austausch in der H₂Giga-Plattform, insbesondere zu Messmethodik, Referenzprozeduren und Materialauswahl.

In AP 1 wurde ein gemeinsamer Anforderungskatalog (AP 1.4) für funktionale Komponenten erarbeitet, in den das EST insbesondere materialseitige Anforderungen im Laugekontakt (Korrosionsbeständigkeit, Dichtigkeit, Langzeitstabilität) einbrachte.

In AP 2.1.1 wurden Elektrodenmaterialien systematisch ausgewählt, physikalisch charakterisiert und bewertet. Dazu wurde eine Materialbibliothek aufgebaut (vor allem Edelstähle & Nickel-Legierungen sowie Separatormaterialien) und hinsichtlich Leitfähigkeit, Permeabilität und spezifischer Oberfläche untersucht. Parallel wurden mehrere modulare Halbzellteststände (TF2) inklusive spezieller Zelldesigns aufgebaut. Das EST beteiligte sich an einem internationalen Round-Robin-Test zur Standardisierung elektrochemischer Charakterisierungsmethoden in der alkalischen Elektrolyse. Separatoren verschiedener Hersteller wurden bezüglich Beständigkeit, Porosität, Gasdurchlässigkeit und elektrochemischer Performance untersucht und bewertet.

In AP 2.1.2 wurden auf Basis einer strukturierten Analyse etablierter Zelldesigns neue, kosteneffiziente Zellkonzepte entwickelt. Ein morphologischer Kasten diente zur systematischen Variation und Auswahl von Designparametern (Elektroden- und Separatoranordnung, Strömungsführung, Elastikelemente,

Kontaktierung). Für die experimentelle Bewertung wurden 100-cm²-Laborzellen und das Testfeld TF3 aufgebaut. Die Wirkung von Kontaktierungsqualität, Elektrodengeometrie, Elektrolytvolumenstrom, Spacergeometrie und Gasphasenanteil wurde durch kombinierte U-I-Messungen, Impedanzspektroskopie und Gasphasenanalytik untersucht. Zusätzlich wurden eine hohe, schmale Laborzelle sowie ein Zellkonzept mit integrierter Stromdichtemesskarte entwickelt, um die lokale Stromdichteverteilung und Gasphasenverteilung mit hoher Auflösung zu messen.

In AP 2.1.3 entwickelte das EST ein Streustromhandlingkonzept für industrielle alkalische Elektrolyseure. Hierfür wurde ein flexibles, für die Open-Source-Veröffentlichung geplantes Streustrommodell (auf Basis eines elektrischen Ersatzschaltbilds) aufgebaut, das unterschiedliche Stackgeometrien, Leitungswiderstände, Zellspannungen, Erdungskonzepte sowie serielle/parallele Stackverschaltungen abbilden kann. Parallel wurden Laboraufbauten (TF4, TF5) zur gezielten Eindosierung von Streuströmen in Laborzellen errichtet. Es erfolgten Untersuchungen zum Einfluss von Zweiphasenströmung in Leitungen auf die effektive Leitfähigkeit sowie zur lokalen Verteilung von Streuströmen in der Zelle (u. a. mittels segmentierter Stromdichtemessung).

In den AP 2.1.4 bis 2.1.6 unterstützte das EST die Auswahl und Bewertung von Füge- und Zwischenschichtmaterialien aus elektrochemischer Sicht und brachte Betriebserfahrungen aus Short-Stacks in die Auslegung des Fügekonzepts ein.

Im AP 2.3 wurde in der Technikumshalle des EST ein Short-Stack-Testfeld (TF1, bis 150 kW, bis 25 Zellen) geplant, errichtet und schrittweise erweitert. Nach Inbetriebnahme des ersten Short-Stacks Mk1 wurden unterschiedliche Stackgenerationen unter variierenden Betriebsbedingungen charakterisiert. Parallel wurden Mess- und Modellsysteme für Streuströme, Gasphasenanteile, Druck- und Temperaturverteilungen sowie ein dynamisches Anlagenmodell entwickelt. TF1 wurde im Projektverlauf u. a. um eine leistungsfähige Zellspannungsmesstechnik, eine Partikelmessung im Gasstrom, eine Kompressionseinheit, eine hochfrequente Spannungs- und Strommessung, eine großflächige Stromdichtemesskarte sowie eine erweiterte Gasanalytik (GC-Systeme) ergänzt. In AP 2.3.14 wurde auf Basis von Primärdaten aus dem Short-Stack-Betrieb ein Life-Cycle-Assessment (LCA) des StaR-Stackkonzepts durchgeführt.

3. Wesentliche Ergebnisse

Materialauswahl und -charakterisierung

- Aufbau einer Materialbibliothek aus Edelstählen, Nickel- und Referenzmaterialien.
- Nachweis, dass Nickel im Vergleich zu typischen Edelstählen etwa eine zehnmal höhere Leitfähigkeit aufweist und damit bei Ohm'sch dominierten Verlusten vorteilhaft ist, während kostengünstige Edelstähle nach hinreichend langer Konditionierung (≥ 100 h) eine stabile, für unbeschichtete Elektroden sehr gute Performance erreichen können.
- Systematische Untersuchung von Vorbehandlungs- und Aktivierungsmethoden (chemische Behandlung, elektrochemisches Zyklisieren) und deren Einfluss auf Oberflächenrauheit, Aktivität und Langzeitstabilität.
- Teilnahme und Mitgestaltung eines internationalen Round-Robin-Tests (IEA-Initiative) zur Standardisierung der Charakterisierung alkalischer Elektrodenmaterialien. Wesentliche Einflussgrößen konnten identifiziert werden (Temperaturmessung/-regelung,

Eisenverunreinigung im Elektrolyten, Polarisationshistorie), die für reproduzierbare Messungen maßgeblich sind.

- Bewertung verschiedener Separatoren unter chemischer, mechanischer und elektrochemischer Belastung. Identifikation vielversprechender Alternativen zum Referenzmaterial inkl. Bewertung von Gas-Crossover, Ionentransportwiderstand sowie Chargenschwankungen. Erweiterung des Anforderungskatalogs und Validierung der Materialauswahl (MS 2.1.4).

Zelldesign, Gasphasenanteil und Kontaktierung

- Experimenteller Vergleich mehrerer 100-cm²-Zellkonfigurationen mit variiertelektrodengeometrie, Halbzellstärke, Elastikelement- und Kontaktierungskonzepten. Nachweis, dass v. a.
 - die Qualität der Kontaktierung zwischen den Komponenten (Anpressdruck, Nullabstandsordnung, Kombination von Elastikelement und Elektrode) und
 - der effiziente Abtransport der Gasblasen (Strömungsführung, Spacergeometrie) die Zellperformance entscheidend verbessern können, ohne erhebliche Mehrkosten zu verursachen. Der Meilenstein MS 2.1.2 „Experimenteller Vergleich ausgesuchter Zellkonzepte“ wurde planmäßig erreicht.
- Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss des Elektrolytvolumenstroms, der Elektrodengeometrie und verschiedener Spacergeometrien auf Gasphasenanteile und Potentialverteilung entlang der Zellen. Für Zero-Gap-Designs konnte gezeigt werden, dass der Höhen-Scale-Up hinsichtlich des Gasphasenanteils günstiger ausfällt als bei Zellen mit signifikantem Elektrolytspalt.
- Aufbau einer hohen, schmalen Laborzelle mit optischem Zugang sowie Schnittstelle für ein Blasengrößenmesssystem (Sopat). Erste Messungen erlauben eine bildbasierte Bestimmung von Blasengrößen und -verteilungen und bilden die Grundlage für künftige, hochaufgelöste Modellvalidierungen.
- Integration einer Labor-Stromdichtemesskarte in ein spezielles Zellkonzept mit segmentierten Elektroden und Kontaktierungen. Entwicklung und Validierung eines mechanisch und chemisch stabilen Aufbaus für lokale Stromdichtemessungen unter anspruchsvollen Bedingungen.

Streuströme (shunt currents) und Streustromhandlingkonzept

- Entwicklung eines flexiblen, numerischen Streustrommodells (Python-basiert, mit grafischer Benutzeroberfläche), das u. a. unterschiedliche Stackgrößen, Leitungsgeometrien und -widerstände, Erdungsstrategien, geerdete und schwebende Gleichrichter sowie Multi-Stack-Konfigurationen (serielle und parallele Verschaltung) abbildet. Das Modell erlaubt die Abschätzung von Faraday-Effizienzen, maximalen Leitungsströmen und deren Auswirkungen auf Korrosion und Verluste.
- Erweiterung des Modells um die Wirkung verschieden hoher Leitungswiderstände und Gasphasenanteile in den Elektrolytverteilern. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere bei paralleler Verschaltung mehrerer Stacks ohne hinreichend hohe Leitungswiderstände erhebliche Streuströme auftreten können.
- Aufbau von Laborprüfständen (TF4, TF5) zur experimentellen Untersuchung von Streuströmen. Gezielte Eindosierung von Strömen in Laborzellen ermöglichte die Bestimmung der lokalen

Streustromverteilung (unter Nutzung segmentierter Stromdichtemessungen) sowie des Einflusses auf Degradation und Gasreinheit.

- Untersuchung der Zweiphasenströmung in vertikalen Schläuchen mit unterschiedlichen Blasengrößen und Gasanteilen. Nachweis, dass die effektive Leitfähigkeit und damit der Leitungswiderstand stark vom Strömungsregime, der Blasengröße und dem Gasanteil abhängt und zeitlich stark schwankt. Bestehende Korrelationen (z. B. Bruggeman) sind für realistische Betriebsbedingungen nur eingeschränkt anwendbar.
- Lokale Messung der Streustromverteilung in der Zelle mittels segmentierter Stromdichtemesskarte: Es konnte gezeigt werden, dass ein Großteil des Streustroms in unmittelbarer Nähe der Zellanschlüsse in die Elektrode eindringt und so lokale Überlastungen verursacht. Langzeitversuche mit aufgeprägten Streuströmen zeigen sichtbare, lokal begrenzte Oberflächenveränderungen, wenngleich in den hier getesteten Betriebsbereichen kein unmittelbares Zellversagen beobachtet wurde.
- Bewertung des Einflusses von Streuströmen auf die Gasreinheit: Unter typischen Betriebsbedingungen (<5 % Effizienzverlust durch Streuströme) ist kein signifikanter zusätzlicher Einfluss auf die Gasverunreinigung zu erwarten.
- Auf Basis von Modell- und Versuchsergebnissen wurde ein robustes Streustromhandlingkonzept für das StaR-Stackdesign und die Verschaltung mehrerer Stacks entwickelt. Der Meilenstein MS 2.1.3 wurde planmäßig erreicht.

Short-Stack-Testfeld, Stackcharakterisierung und Betriebskonzepte

- Planung, Aufbau und Inbetriebnahme des Short-Stack-Testfeldes TF1 (bis 150 kW, bis 25 Zellen) mit umfangreicher Messtechnik (Druck, Temperatur, Gaszusammensetzung, Einzelzellspannungen), industriellem Prozessleitsystem und sicherheitsgerichtetem Design. Der Meilenstein MS 2.3.1 „Fertigstellung des Stacktestfeldes“ wurde im Juni 2022 erreicht.
- Betrieb mehrerer Short-Stack-Generationen (u. a. Mk1 bis Mk6) unter variierenden Lastprofilen und Betriebsbedingungen, Validierung der grundlegenden Funktionsfähigkeit des StaR-Stackkonzepts sowie Identifikation von Verbesserungspotenzialen in Konstruktion und Betrieb (z. B. Drucksteuerung, Elektrolythandling, Demisterkonzepte).
- Entwicklung eines dynamischen 1D-Stackmodells entlang der Stackhöhe, das Gasphasenanteil, Stromdichteverteilung und deren Wechselwirkung beschreibt. Modellergebnisse bestätigen, dass der Gasphasenanteil im unteren Stackbereich rasch zunimmt und zu einer Abnahme der Stromdichte in der Höhe führt. Volumenstrom und Strömungsführung erweisen sich als zentrale Stellgrößen.
- Entwicklung und Implementierung eines innovativen Differenzdruckregelkonzepts, das einen dauerhaft getrennten Betrieb von Anoden- und Kathodenkreislauf bei gleichzeitiger Konzentrations- und Füllstandsstabilisierung ermöglicht. Durch eine gezielte Gasdruckdifferenz von bis zu ca. 10 mbar wird ein kontrollierter konvektiver Stofftransport durch den Separator erreicht, sodass vermischungsbedingte Verluste reduziert werden können.
- Erweiterung von TF1 um einen leistungsfähigen Demister mit austauschbaren Filterkerzen sowie ein Partikelgrößenmesssystem. Nachweis, dass mit einer geeigneten Demisterkonfiguration eine

sehr hohe gravimetrische Abscheidungsrate ($\approx 99,96\%$) für KOH-haltige Aerosole erreichbar ist und Restpartikelgrößen im Submikrometerbereich liegen.

- Integration eines Hochfrequenzmesssystems zur Analyse des Gleichrichterverhaltens und möglicher Wechselwirkungen mit dem Stack. Messungen zeigen Stromwelligkeiten im Bereich von etwa 20 % bei 50 Hz, bei gleichzeitig nur moderaten Spannungsflektuationen auf Zellebene (typisch ca. 20 mV je nach Last).
- Beschaffung und Integration einer großflächigen Stromdichtemesskarte für den Short-Stack (1 m² Zellfläche, 1428 Messpunkte für Strom und Temperatur). Die Short-Stack-Stromdichtemessung ist nach Kenntnisstand der Autoren weltweit einmalig und ermöglicht die detaillierte Analyse der Lastverteilung, Identifikation von Hotspots sowie Validierung von Modellen zur Streu- und Rückstromverteilung (Messdaten und Detailauswertung werden in Teil III behandelt).

Life Cycle Assessment (AP 2.3.14) und Beitrag zur Kostenreduktion

- Durchführung eines LCA nach ISO 14040/44 für das StaR-Stackkonzept auf Basis von Primärdaten aus dem Short-Stack-Betrieb. Vergleich mit einem generischen alkalischen Stackdesign mit massiven Bipolarplatten und konventionellen Elektroden.
- Nachweis, dass das StaR-Design durch die deutliche Reduktion von Stahl- und Nickelmasse sowohl die absolute Materialmenge als auch das Treibhauspotenzial (GWP) pro erzeugter H₂-Menge signifikant senkt. Der Meilenstein MS 2.3.4 wurde im Dezember 2023 erreicht.
- Unterstützung der Arbeitspakete zum Kostenmanagement (AP 6.1, 6.2) durch die Identifikation zulässiger Materialsubstitutionen, Empfehlungen zu günstigen Vorbehandlungs- und Beschichtungskonzepten (z. B. NiFe-Schichten aus im Elektrolyten vorhandenen Ionen), sowie die Bewertung technologischer Stellhebel im Spannungsfeld von Kosten, Effizienz und Lebensdauer.

4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Die TU Clausthal arbeitete im Verbundprojekt eng mit der WEW GmbH (Kordinatorin), der Hochschule Rhein-Waal (HSRW), der RWTH Aachen (ISF), der OTH Regensburg zusammen. Die Zusammenarbeit umfasste insbesondere:

- die gemeinsame Erstellung und Fortschreibung des Anforderungskatalogs (AP 1.4),
- die Abstimmung von Zell- und Stackkonzepten (u. a. Schnittstelle zu AP 2.2 und AP 3),
- die Auswahl und Bewertung von funktionalen Materialien (Elektroden, Separatoren, Fügwerkstoffe) einschließlich Aufteilung experimenteller Arbeiten (z. B. Auslagerungstests am ISF),
- die Koordination beim Design, Aufbau und Betrieb der Short-Stacks im TF1,
- die Rückkopplung von Betriebs- und Modellergebnissen in die Produktions- und Kostenmanagementkonzepte (v. a. mit HSRW).

Über das Verbundprojekt hinaus war das EST in projektübergreifende H2Giga-Aktivitäten eingebunden, u. a. in den Austausch mit Querschnittsthemen wie QT1.1 (Prometh2eus) zu Messmethodik, Materialauswahl und Beschichtungstechnik sowie in Statuskonferenzen, Workshops und bilateralen Austauschen. Ein geplanter H2Giga-interner Referenzversuch konnte zwar nicht umgesetzt werden, wurde jedoch im Rahmen einer internationalen IEA-Initiative initiiert und erfolgreich durch die TU

Clausthal koordiniert und mitrealisiert (Round-Robin-Test für alkalische Elektrolyse). Durch den gemeinsamen Test verschiedener Labore wurden kritische Einflussgrößen – etwa die Position von Temperatursensoren, Verunreinigungen im Elektrolyten (insbesondere Eisen) und die Polarisationshistorie der Elektroden – identifiziert. Die daraus resultierenden empfohlenen Messprotokolle wurden im EST-Labormaterial-Testfeld implementiert und führten zu einer verbesserten Reproduzierbarkeit der Charakterisierungsergebnisse.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Streuströme führten zu einem intensiven Austausch mit der Technischen Universität in Lappeenranta, die ebenfalls experimentelle Untersuchungen im Bereich der Streuströme durchführt. Der Kontakt ist bestehen geblieben und bildet die Basis für eine weitere erfolgreiche Zusammenarbeit.

Die Dissemination der Ergebnisse erfolgte über zahlreiche Fachveranstaltungen: Filmaufnahmen und Presseberichte zur Eröffnung des Short-Stack-Testfeldes (Oktober 2022), Poster-Präsentationen auf den H₂Giga-Status-Konferenzen in Frankfurt (2022) und Berlin (2023), Vorträge auf internationalen Kongressen (z.B. ICE 2023, ECS San Francisco 2024, EFCF 2025, ICE 2025) sowie die Veröffentlichung von Peer-Reviewed-Artikeln. Das entwickelte Streustrom-Modell wird in Kürze als Open-Source-Software publiziert und steht der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Weiterentwicklung zur Verfügung.