

Steinfurt, 31. März 2026

**Verbundvorhaben H2Giga\_NG3\_HY-Core:  
Entwicklung des ersten AEM-Elektrolyseurs der Megawattklasse;  
Teilvorhaben: Forschung und Anwendung**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil I: Kurzbericht**

---

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Enapter GmbH
Autorinnen/Autoren:	S. Meyknecht, F. Wierling, A. Schliemer, S. Nießen, M. Kulms, E. Brüggling
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_NG3_HY-Core: Entwicklung des ersten AEM-Elektrolyseurs der Megawattklasse; Teilvorhaben: Forschung und Anwendung
Laufzeit:	01.05.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY104A
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

### Vorwort des Verbundkoordinators

Das Verbundprojekt HY-Core als Teil der H2Giga-Plattform war darauf ausgerichtet, die AEM-Elektrolyse maßgeblich in Richtung industrieller Anwendung zu skalieren. Gemeinsam mit den assoziierten Partnern – darunter insbesondere die FH Münster, Enapter und regionale Industrieunternehmen – wurden entscheidende technologische Fortschritte erzielt, welche den Industriemaßstab und die Wirtschaftlichkeit von Elektrolysesystemen sichern. Durch kontinuierlichen Austausch sowohl innerhalb des Verbunds als auch über ihn hinaus, wurden Schnittstellen identifiziert und Synergien geschaffen – insbesondere bei Automatisierung, Materialien und Digitalisierung. Die aktive Einbindung in Netzwerke und Transfermeetings trug dazu bei, Innovationen schnell zu bewerten und gemeinsame Standards zu entwickeln.

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

Das Projekt HY-Core adressierte zentrale Forschungslücken der noch jungen AEM-Technologie, die das Potenzial besitzt, die Vorteile der alkalischen und der PEM-Elektrolyse in einem System zu vereinen. Zum Projektbeginn fehlten grundlegende Erkenntnisse über die Langzeitstabilität edelmetallfreier Katalysatoren, die chemische Beständigkeit von Membranen sowie die Skalierbarkeit der Zell- und Stackarchitektur für industrielle Anwendungen. Ebenfalls unzureichend erforscht waren Fragen der dynamischen Regelung, Systemintegration und Serienfertigung modularer Elektrolyse-Systeme. HY-Core zielte daher darauf, diese Lücken durch praxisorientierte Materialforschung, Teststandsversuche und die Entwicklung eines skalierbaren Multicore-Systems im Megawattbereich zu schließen, um die AEM-Elektrolyse industrietauglich zu machen.

#### 2. Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben umfasste die Entwicklung eines modularen, skalierbaren AEM-Elektrolyseurs – von der Errichtung eines 24 kW-String-Teststands zur Evaluierung grundlegender Betriebs- und Serviceparameter bis zur Realisierung eines 1 MW-Multicore-Systems mit 420 Stacks in 42 Strings. Die gesamte Anlage wurde im Bioenergiepark Saerbeck unter realen Praxisbedingungen erprobt, wobei die Integration in die bestehende erneuerbare Energie-Infrastruktur sowie der Test verschiedener Produktions- und Service-Szenarien im Fokus standen. Ergänzend wurde an der FH Münster ein Application Lab aufgebaut, das neben der begleitenden Material- und Sensorikforschung auch dem Lehr- und Besucherbetrieb dient.

#### 3. Wesentliche Ergebnisse

Die wesentlichen Projektergebnisse der Enapter GmbH resultieren aus der verantwortlichen Bearbeitung ingenieurstechnischer Arbeitspakete, welche die industrielle Skalierung der AEM-Elektrolysetechnologie ermöglicht. Im Fokus standen die Entwicklung des Stackmoduls sowie

das Design, der Bau und die Erprobung eines Megawatt-Prototypen, dem AEM Multicore, der zuvor genannte Stackmodule in eine Gesamtanlage integriert. Der Testbetrieb des AEM Multicore ermöglichte es, tiefgreifende Erkenntnisse zum Betriebsverhalten des Stackmodules zu erlangen, die AEM-Technologie im realen Einsatz weitreichend zu analysieren sowie entsprechende BoP-Anlagenkomponenten zu validieren. Gemeinsam mit der FH Münster konnten umfassende Testreihen am entwickelten Multicore-System unter realen Einsatzbedingungen durchgeführt werden. Zudem wurden auf Basis des Testbetriebes und iterativen Optimierungen der Anlage konstruktive Schwächen beseitigt und ein Skalierungspfad für mögliche 100 MW-Systeme erarbeitet.

Durch die kontinuierliche Validierung, Analyse und Optimierung in den genannten Arbeitspaketen wurde sichergestellt, dass sämtliche technologischen Entwicklungen dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und eine nachhaltige sowie marktfähige Skalierung der AEM-Elektrolyse bis hin zur Megawattklasse ermöglicht wird. Die systematische und strukturierte Herangehensweise ermöglichte die gezielte Identifikation technischer Innovationspotenziale und sicherte eine konsequente Ausrichtung des Gesamtsystems auf industrielle Anwendungen.

#### 4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Die Arbeit erfolgte in enger Kooperation mit der FH Münster (wissenschaftliche Begleitung), der Wenker GmbH & Co. KG (Containerbau) sowie weiteren Partnerfirmen und regionalen Wasserstoffnetzwerken. In Transfermeetings und Statuskonferenzen wurden insbesondere der Status des Anlagenbaus, zu antizipierende Projektgefährdungspotentiale und die Definition von Testreihen abgestimmt. Die Integration in die H2Giga-Plattform und die Nutzung von Statuskonferenzen und Fachveranstaltungen stärkten die regionale wie nationale Vernetzung; studentische Abschlussarbeiten und Workshops sorgten für Nachwuchsförderung und Wissensdiffusion.

Saerbeck, 29. März 2026

**Verbundvorhaben H2Giga\_NG3\_HY-Core:  
Entwicklung des ersten AEM-Elektrolyseurs der Megawattklasse;  
Teilvorhaben: Forschung und Anwendung**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung**

---

Stand:	29.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Enapter GmbH
Autorinnen/Autoren:	S. Meyknecht, F. Wierling, A. Schliemer, S. Nießen, M. Kulms, E. Brüggling
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_NG3_HY-Core: Entwicklung des ersten AEM-Elektrolyseurs der Megawattklasse; Teilvorhaben: Forschung und Anwendung
Laufzeit:	01.05.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY104A
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 II. Eingehende Darstellung

### 1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Die Energiewende stellt eine der bedeutendsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar, mit dem Ziel, eine nachhaltige und kohlenstoffarme Energieversorgung zu etablieren. In diesem Kontext hat grüner Wasserstoff als Energieträger und -speicher eine zentrale Rolle eingenommen, insbesondere durch seine Fähigkeit, erneuerbare Energien effizient zu integrieren und zu speichern. Die Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) der deutschen Bundesregierung unterstreicht die Notwendigkeit einer nationalen Wasserstoffindustrie und setzt ambitionierte Ziele, um die Elektrolysekapazität bis 2030 auf mindestens 10 Gigawatt zu erhöhen. Diese Strategie ist von entscheidender Bedeutung, um die Dekarbonisierung der Industrie und anderer Sektoren voranzutreiben.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Strategie ist die Entwicklung und Skalierung der Anionen-Exchange-Membrane-(AEM)-Elektrolyse auf den Megawatt-Maßstab – ein Ziel, welches im Projekt HY-Core verfolgt und erreicht wurde. Die AEM-Elektrolyse bietet als Next-Generation-Technology vielversprechende Vorteile, darunter eine potenziell kostengünstigere Produktion von grünem Wasserstoff durch den Einsatz nicht-edler Metalle und eine verbesserte Systemeffizienz. Die Skalierung dieser Technologie ist unerlässlich, um die gesteckten Ziele der NWS zu erreichen und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wasserstoffwirtschaft zu stärken.

Der Skalierungsbedarf der AEM-Elektrolyse ergibt sich aus mehreren Faktoren: Erstens ist die Erhöhung der Elektrolysekapazität entscheidend, um die Versorgung mit grünem Wasserstoff sicherzustellen, der für die Dekarbonisierung von Schlüsselindustrien unerlässlich ist. Zweitens ermöglicht die industrielle Serienfertigung von Elektrolyseuren, wie sie durch die H2Giga-Plattform gefördert wird, eine signifikante Reduktion der Produktionskosten und eine Erhöhung der Marktreife dieser Technologien. Drittens trägt die Weiterentwicklung der AEM-Elektrolyse zur Erreichung der Klimaziele bei, indem sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen signifikant reduziert.

Die H2Giga-Plattform spielt eine zentrale Rolle bei der Umsetzung dieser Ziele, indem sie die Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektrolyseure intensiv fördert und die Brücke zwischen Wissenschaft und Industrie schlägt. Durch die Bereitstellung einer Plattform für technologische Innovationen und den Wissensaustausch unterstützt sie die Marktentwicklung und den Infrastrukturaufbau, die für eine funktionierende Wasserstoffwirtschaft unerlässlich sind.

Das Projekt HY-Core hat diese Herausforderungen direkt adressiert, indem es die AEM-Elektrolyse erfolgreich auf den MW-Maßstab skaliert und somit einen Beitrag zur industriellen Anwendung und Effizienzsteigerung geleistet hat. Durch die Integration in die H2Giga-Plattform und die enge Zusammenarbeit mit den Partnern wurde mit HY-Core nicht nur die technologische Entwicklung vorangetrieben, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Wasserstofftechnologie gestärkt.

### Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Projekt HY-Core, eingebettet in das Wasserstoffleitprojekt H<sub>2</sub>Giga, hatte zum Ziel, die AEM-Technologie für die Wasserelektrolyse auf ein industrielles Niveau zu heben. Durch die Entwicklung eines modularen und skalierbaren Systems, dem AEM-Multicore, sollte eine kosteneffiziente Produktion von grünem Wasserstoff ermöglicht werden.

Ein zentrales Ziel des Projekts war es, die Kosten für die Wasserstoffproduktion erheblich zu senken. Der AEM-Multicore soll so eine wirtschaftliche Alternative zu den PEM- und alkalischen Elektrolyseverfahren darstellen. Durch die Standardisierung und Massenproduktion des AEM-Multicores sollten die Wasserstoffkosten wesentlich gesenkt werden. Dies wurde durch die Nutzung preiswerterer Komponenten und Steigerung der Leistungsdichte erreicht. Die Kostenreduktion ist von entscheidender Bedeutung, um Wasserstoff als nachhaltige Energiequelle wettbewerbsfähig zu machen und die Klimaziele zu erreichen.

Ein weiteres wichtiges Ziel des Projekts war, die Robustheit und Resilienz des Systems zu erhöhen. Der modulare Aufbau des AEM-Multicores mit 420 im Verbund geschalteten Stacks ermöglicht eine hohe Redundanz. Jedes Stackmodul ist „hot-swappable“, was bedeutet, dass es im laufenden Betrieb ausgetauscht werden kann, ohne den Elektrolyseur abschalten zu müssen. Dies trägt zur Betriebssicherheit und Effizienz bei und minimiert Ausfallzeiten.

Darüber hinaus ermöglicht die flexible Steuerbarkeit aller Stacks eine sehr gute Steuerung des Elektrolyseurs. Dies erlaubt eine flexible Fahrweise (Teillastbetrieb und Vollastbetrieb) und damit die Abdeckung des gesamten Leistungsbereichs von 0 bis 100 % der Nennleistung. Die Fähigkeit, schnell und effizient auf Schwankungen in der Energieversorgung zu reagieren, ist besonders in Kombination mit erneuerbaren Energien von Vorteil.

Die Entwicklung, Konzeption und Umsetzung von AEM-Elektrolyseuren für den industriellen Einsatz waren weitere zentrale Ziele des Projekts. Der Fokus lag darauf, die AEM-Technologie für großflächige industrielle Anwendungen zu skalieren und somit einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie zu leisten.

Die Vorgehensweise des Projekts HY-Core gliederte sich in vier Arbeitspakete (AP).

#### Arbeitspaket 1: Entwicklung des Stackmoduls

In diesem Arbeitspaket wurde der bestehende elektrochemische Stack für den Multicore-Betrieb angepasst, wobei kosteneffiziente Überwachungssysteme für Temperatur und Durchfluss sowie elektronische Regelungen zum Einsatz kamen. Hochintegrierte Subsysteme (Mikroelektromechanische Systeme - MEMs, System on a Chip - SoC) wurden in Zusammenarbeit mit lokalen Partnern entwickelt. Jeder Stack wurde mit sicherheitsrelevanten mechanischen Komponenten ausgestattet, die in Großproduktion mit einem Partner hergestellt wurden. Diese Aktivitäten wurden bis Q2/2023 abgeschlossen. Zudem wurde ein automatisiertes Testszenario zur Messung von Qualitätsparametern entwickelt (seit Q4 2023 verfügbar).

## Arbeitspaket 2: Design, Bau und Erprobung des Megawatt-Prototypen

Im Rahmen dieses Pakets wurde ein AEM-Elektrolyseur mit 420 Stacks und einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1 MW aufgebaut. Nach dem initialen Designentwurf wurde das Detail-Engineering über einen Zeitraum von 11 Monaten durchgeführt. Parallel fand die Materialbeschaffung einschließlich eines Containers für Einhausung und Transport statt. Die Montage begann in Q3/2022, gefolgt von Qualifizierung und Tests. Während bereits ab Q2/2022 einzelne Komponenten einen Testbetrieb durchliefen, wurde mit dem Test der gesamten Anlage im Q2/2023 begonnen.

## Arbeitspaket 3: Erarbeitung eines Skalierungspfad auf 100 MW

Im Berichtszeitraum wurden im Rahmen des Projekts einige Fortschritte in den Entwicklungs- und Erprobungsphasen erzielt. Die Arbeitsschritte 3.1 bis 3.5 wurden im Berichtsjahr 2023 planmäßig abgeschlossen. Im Anschluss daran wurden im Jahr 2024, basierend auf den Ergebnissen des Testbetriebs des Megawattprototyps (AP 2), gezielte Umbaumaßnahmen am Flex 120-Prototypen durchgeführt. Der Flex 120 ist ein modularer Elektrolyseur mit 5 Strings und einer Nennleistung von 120 kW, wodurch dieses System zwischen dem Teststand und Multicore platziert werden kann. Diese Umbauten führten temporär zu Einschränkungen im Testbetrieb, konnten jedoch zu Beginn des letzten Quartals erfolgreich abgeschlossen werden. Weitere Einschränkungen ergaben sich aufgrund der Pause der Klinkerproduktion, in deren Rahmen der Prototyp betrieben wird. Dies führte in dem Berichtszeitraum zu einem fehlenden Abnehmer für den produzierten Wasserstoff und somit zu einer temporären Unterbrechung des Testbetriebs. Der im Arbeitsschritt 3.7 vorgesehene Abschluss der Detailkonstruktion für eine skalierbare Anlage wurde erreicht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse aus Bau und Betrieb des Prototyps flossen in die Konstruktion ein und ermöglichten gezielte Optimierungen hinsichtlich Fertigung, Wartung, Kosten, Bauraum und Anlagenverfügbarkeit. Auf Basis der finalisierten Detailkonstruktion wurde im Anschluss eine Kleinserie von vier Anlagen gefertigt.

## Arbeitspaket 4: Wissenschaftliche Begleitung – Research – Application - Education

Während die Arbeitspakete 1 bis 3 im Verantwortungsbereich von Enapter lagen, bearbeitete die FH Münster das Arbeitspaket 4. Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes war die wissenschaftliche Begleitung der Stack- und Anlagenentwicklung durch Enapter sowie die Durchführung von Testreihen mit den entwickelten Komponenten. Hierfür konstruierte die FH Münster etwa einen Teststand für die Untersuchung von AEM-Stacks und stellte die Infrastruktur für die Aufstellung und den Betrieb des Megawatt-Prototyps. Darüber hinaus wurden Entwicklungen in der Fachliteratur gesichtet und zur Projektunterstützung integriert. Parallel zur Multicore-Entwicklung wurde ein Anwendungszentrum für Wasserstoffsystemtechnologien (Application Lab – AL) errichtet, in welchem sicherheits- und speichertechnische Fragestellungen sowie die kontinuierliche Herstellung von grünem Wasserstoff untersucht wurden. Das AL bietet seither zudem Möglichkeiten zur gezielten Ausbildung von Studierenden im Bereich Zukunftstechnologien.

## AP 1: Entwicklung des Stackmoduls

### AP 1.1: Festlegung der Spezifikationen

2021 wurden die Spezifikationen des zu entwerfenden Stackmoduls erarbeitet. Hierbei stellte die zu dem Zeitpunkt sehr angespannte Zulieferer- und Beschaffungssituation durchaus Probleme dar. Im Projektteam wurde festgelegt, dass gewisse Komponenten wie bspw. Sondersensoren nicht selbst entwickelt werden sollen, da dies durch die äußeren Umstände nicht in einer vertretbaren Zeit leistbar wäre und somit die Zielerreichung des Projekts nachhaltig gestört hätte. Es wurde daher die Entwicklung eines ersten Prototypen des modifizierten Stack-Moduls anvisiert. Das Stackmodul besteht im Wesentlichen aus dem AEM Stack und Sensoren, sowie Auswerteelektronik zur Überwachung der Gesundheits- und Performanzparameter des Stacks.

Die Betriebsbedingungen des Stack bewegen sich für eine optimale Lebensdauer in folgenden Bereichen:

- Elektrische Spannung: 38 – 45 V
- Elektrischer Strom: < 53 A
- Temperatur: 46 °C
- Wasserstoffdruck (Stack-Ausgang): 29 bar
- Elektrolytfluss: 4,2 l/min

### AP 1.2: Sensorik und Steuerung erproben und integrieren

Ausgehend vom bereits bestehenden reinen Stack wurden notwendige Modifikationen erarbeitet, sodass die Stacks elektrisch in Reihe und hydraulisch parallel schaltbar sind. Zusätzlich wurde eine Platine entwickelt, welche zur Datenaggregation jedes einzelnen Stackmoduls dient. Die zu überwachenden Betriebsparameter des Stacks stellen sich wie folgt dar:

- Temperatur: Die Temperatur des Elektrolyts wird auf Systemebene im optimalen Bereich gehalten, um eine hohe Lebensdauer der Stacks zu garantieren. Im Stackmodul wird die Temperatur erneut geprüft, um auf mögliche Probleme hinzuweisen. Steigt die Temperatur über den Schwellwert an, kann es sich um einen Kurzschluss im Stack handeln.
- Elektrolytfluss: Im Elektrolytkreislauf einzelner Strings sind Stacks parallel angeschlossen, wodurch eine homogene Flussverteilung von garantiert wird. Das Abweichen von Flusswerten vom Normalwert von  $4 \frac{l}{min}$  weist auf einen Schaden hin. Verringert sich der Fluss durch einzelne Stacks, spricht dies für eine Verstopfung des Elektrolytpfades innerhalb des Stacks. Bei erhöhtem Fluss spricht dies für einen Membranriss oder ähnliche Schäden innerhalb des Stacks.
- H<sub>2</sub>-Druck: Zusammen mit der zunächst verbauten Orifice-Plate sollte der Drucksensor auf kleine Löcher in der Membran—sog. Pinholes—hinweisen. Ausgehend von der Evaluierung und Beurteilung dieser Hypothese, sowie einer Sicherheitsbeurteilung wurde die Orifice-Plate vom Stackmodul entfernt, wodurch eine Druckmessung auf Stack-Ebene hinfällig wurde. Im aktuellen System misst ein einzelner Drucksensor den Ausgangsdruck eines gesamten Strings.

- **H<sub>2</sub>-Gasaustritt:** Innerhalb des Stackmoduls werden brennbare Gase — u.A. Wasserstoff — erkannt, wenn eine Leckage auftritt. Eine Wasserstoffleckage kann an Anschlüssen, Leitungen und am Stack selbst entstehen. Eine geringe Leckage ist normal und wird auf Systemebene behandelt. Der Gas-Sensor im Stackmodul übernimmt dabei keine sicherheitsgerichtete Funktion, sondern weist auf möglicherweise problematische Module hin, sodass diese vom Service-Personal bearbeitet werden können.

Übersicht der verwendeten Sensoren des Stackmoduls:

- **Elektrolyttemperatur:** SIE Connect, Modell WF361
- **Elektrolytdurchfluss:** Huba Control, Modell 210.906441K – 0,5-10 l/min
- **H<sub>2</sub>-Druck:** Trafag, Modell 8250.82.3542 – 0-60 bar
- **H<sub>2</sub>-Gassensor:** Zhengzhou Winsen Electronics Technology, Hydrogen Gas Sensor MQ8

### AP 1.3: Mechanische Baugruppen entwerfen und festlegen

Alle Arbeitsschritte hin zur Entwicklung des Stackmoduls auf mechanischer Ebene konnten im Jahr 2022 abgeschlossen und das Stackmodul-Design fertiggestellt werden. Die Medienanschlüsse für Wasserstoff und Elektrolyt befinden sich an der Vorderseite. Auf der Rückseite befindet sich die elektrische Versorgung und Datenverbindung, welche automatisch erfolgt, sobald das Modul in einen Regalslot geschoben wird.

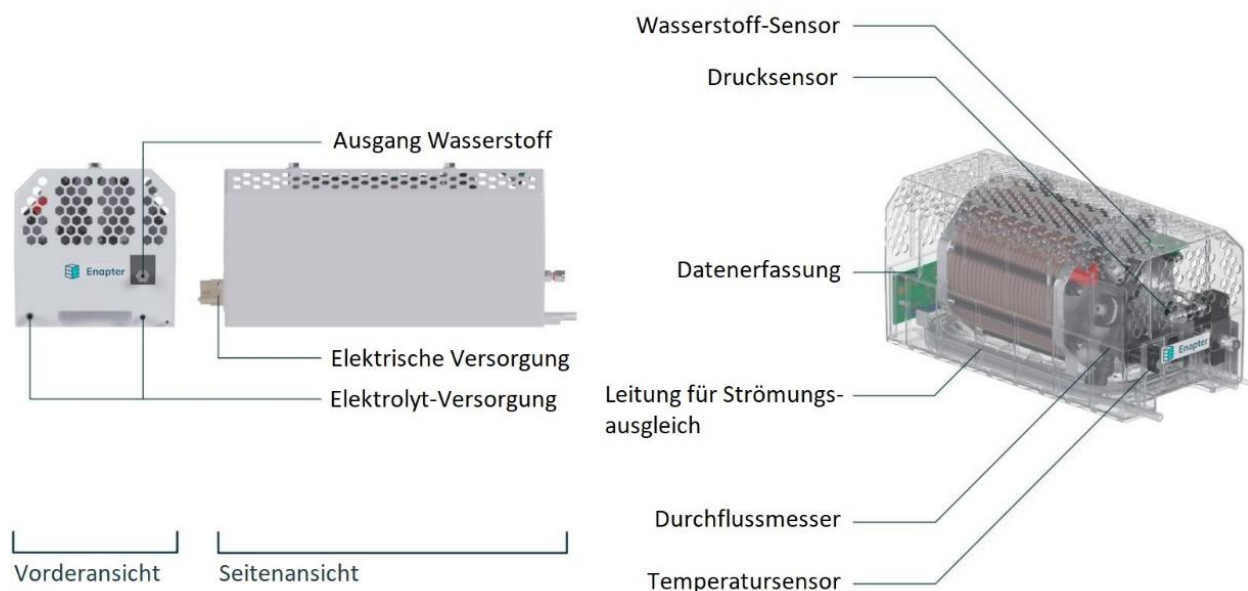


Abbildung 1: Aufbau Stackmodul

#### AP 1.4: Musterbau

Ein erster Musterbau des Stackmoduls erfolgte 2022 aus zugeschnittenen Kunststoffplatten und rudimentärer Ausstattung der gewählten Sensorik.

#### AP 1.5: Qualifizierung, Nullserie, Fertigungsvorbereitung

Nach erfolgreicher Validierung der Nullserie bezüglich Funktion und Prozessfähigkeit, erfolgte die Änderung auf das finale Design des Stackmodul-Korpus aus massenproduzierten Spritzgussformen. Anschließend zur Finalisierung des Designs wurde für die Herstellung erster Kleinserien eine manuelle Produktionsstraße errichtet.

#### AP 1.6: Entwicklung, Erprobung automatisches Testsystem

Es wurde ein Testsystem entwickelt, das gleichzeitig als Proof-of-Concept für das Gesamtsystem dient. Hierbei handelt es sich um ein System mit 10 Stacks und einer Gesamtleistung von 25 kW mit der technisch notwendigen Peripherie. Das angepasste Testsystem konnte 2022 erfolgreich in Betrieb genommen werden und überlief anschließend in die Erprobungs- und Optimierungsphase. Die meisten Arbeitsschritte aus AP 1 konnten bereits 2022 abgeschlossen werden. Für das Jahr 2023 lag der Fokus auf der weiteren Erprobung und Entwicklung des Testsystems. Dieses wurde technisch möglichst ähnlich zur Prototypenanlage ausgerichtet, um Anpassungen an der MW-Anlage zuvor im Kleinen testen und antizipieren zu können.

Für die Jahre 2024 & 2025 lag der Fokus ebenfalls auf der weiteren Erprobung und Entwicklung des Stackmoduls. Zuletzt wurden die Stack-Module im Teststand durch Stackmodule einer neuen Generation ausgetauscht, die sich maßgeblich in der verwendeten Stackversion unterscheiden. Ebenfalls wurden neue Gasisolatoren aus PEEK verwendet, da die zuvor verwendeten Isolatoren aus glasfaserverstärktem Teflon ihren mechanischen Ansprüchen nicht gerecht wurden. Laufend optimiert wurde ebenfalls die Firmware des DAQ-Boards.

## AP 2 Design, Bau und Erprobung des Megawatt-Prototypen

### AP 2.1: Designentwurf, inkl. Review

Bezüglich der AEM-Multicore-Prototypen wurde zunächst ein Sicherheitskonzept erarbeitet. Dieses Sicherheitskonzept ist die Basis für die Komponentenauswahl und wurde in Zusammenarbeit mit Safety Consultants erstellt. Weiterhin wurde ein industrialisierungsfähiges Piping and Instrumentation Diagram (kurz P&ID) erarbeitet. Das P&ID ist die Basis für die Entwicklung des Gesamtsystems und umfasst alle Prozesse innerhalb des AEM-Multicores.

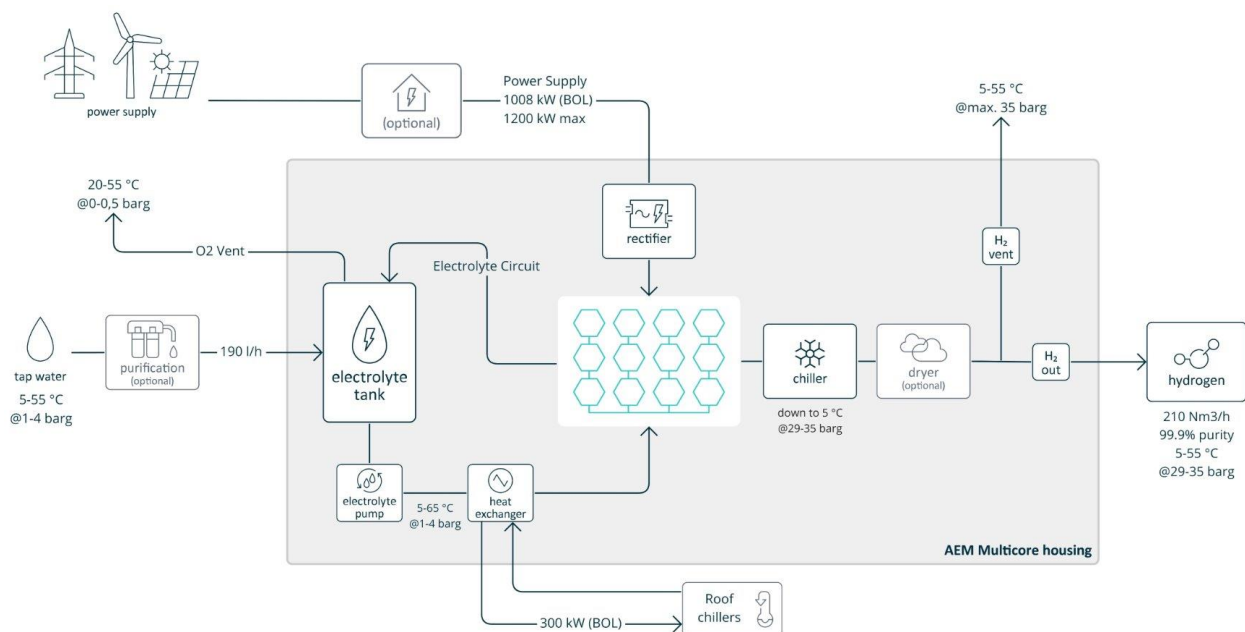


Abbildung 2: AEM Multicore - Vereinfachtes PFD

Datenblatt des AEM Multicore:

- Nominale H<sub>2</sub>-Produktionsrate: 210 Nm<sup>3</sup>/h / 450 kg/Tag
- Wasserstoffdruck: 35 bar max.
- Leistungsaufnahme: 1008 kW
- Elektrolytkonzentration: 1 % KOH
- Effizienz: 4.8 kWh / Nm<sup>3</sup>
- Flexibilität: 3% - 100%
- Wasserstoffreinheit: 99.96%, 99,999% mit Trockner

### AP 2.2: Plausibilisierung, externe Begutachtung

Ausgehend von diesen Vorarbeiten (aus AP 2.1) wurde das Detailed Engineering des AEM-Multicores an ein externes Konstruktionsbüro vergeben. Parallel zu den genannten Arbeiten wurde eine Baugenehmigung für die Aufstellung und Betrieb des ersten Prototypen im Bioenergiepark

Saerbeck gestellt. Die Baugenehmigung wurde 2021 erteilt. Des Weiteren erfolgten Planungsab-sprachen mit der Gemeinde und Ex-Schutz-Betrachtungen für den Ausbläser sowie Legung einer Wasserleitung zum Multicore von der Wasseraufbereitung des BEP.

### AP 2.3: Detailed Engineering

Im zweiten Arbeitspaket wurde eine Parallelstrategie verfolgt: Zum einen wurde das Detailed En-gineering des AEM-Multicore Prototypen anvisiert. Parallel dazu wurde im Sinne eines Proof-of-Concept zunächst das sogenannte Testsystem entwickelt. Bzgl. des Testsystems wurde ein De-sign mit Berücksichtigung der parallel konzipierten Stack-Module sowie der notwendigen Sub-Systeme entwickelt. Ziel ist ausgehend vom Testsystem ein industrialisiertes Subsystem der Ge-samtanlage zu testen. Dieses Testsystem wurde bei einem externen Hersteller in Auftrag gege-ben.

Das Design der Prototypenanlage konnte im Jahr 2022 erfolgreich fertiggestellt werden. Im „AEM Multicore“ finden sich 420 Stackmodule in 42 Spalten zu je 10 Modulen vertikal angeordnet wie-der. Jedes Modul generiert 2,3 kW elektrische Leistung. Da jedes Modul für sich gesehen eine autarke Einheit darstellt, ergibt sich ein modularer Aufbau mit mehreren entscheidenden Vortei-len: Jedes Modul ist „hot-swappable“, was einen Austausch während des laufenden Betriebs ohne Abschaltung des Gesamtsystems erlaubt. Zudem bringt diese Anordnung auch eine Ska-lierbarkeit des Systems mit sich, das je nach Bedarf erweitert oder verkleinert werden kann. Der größte Vorteil liegt zuletzt in der hohen Redundanz der Stackmodule, sodass beim Ausfall eines einzigen Moduls der betroffene String runterfährt, was in einem Leistungsabfall von ca. 2,4 % des Gesamtsystems resultiert. Da jeder Stack einzeln angesteuert werden kann, ergibt sich so eine Abdeckung des gesamten Leistungsbereich von 0 - 100 %, was ihn effizient auf Schwankungen in der Energieversorgung reagieren lässt und für den Einsatz in Verbindung mit erneuerbaren Energiequellen prädestiniert. Die Gesamtheit der Module wird von einer gemeinsamen Periphe-rie, also zentralisierte Tanks, Pumpen, Elektrolyt- sowie Stromversorgung gespeist. Der gene-rierte Wasserstoff wird schließlich zu einem Wasserstofftrockner geleitet und von seiner Rest-feuchtigkeit befreit, wodurch der ausgegebene Wasserstoff des Systems eine Reinheit von 99,999 % besitzt. Mit einer Gesamtleistung von 1 MW lässt sich so eine tägliche Produktion von bis zu 450 kg – oder 210 Nm<sup>3</sup>/h – grünem Wasserstoff realisieren.

Im Folgenden finden sich eine Übersicht zu Hauptkomponenten der Anlage sowie Angaben zur zugehörigen Sensorik bezüglich Gasanalytik und Sicherheitsüberwachung.

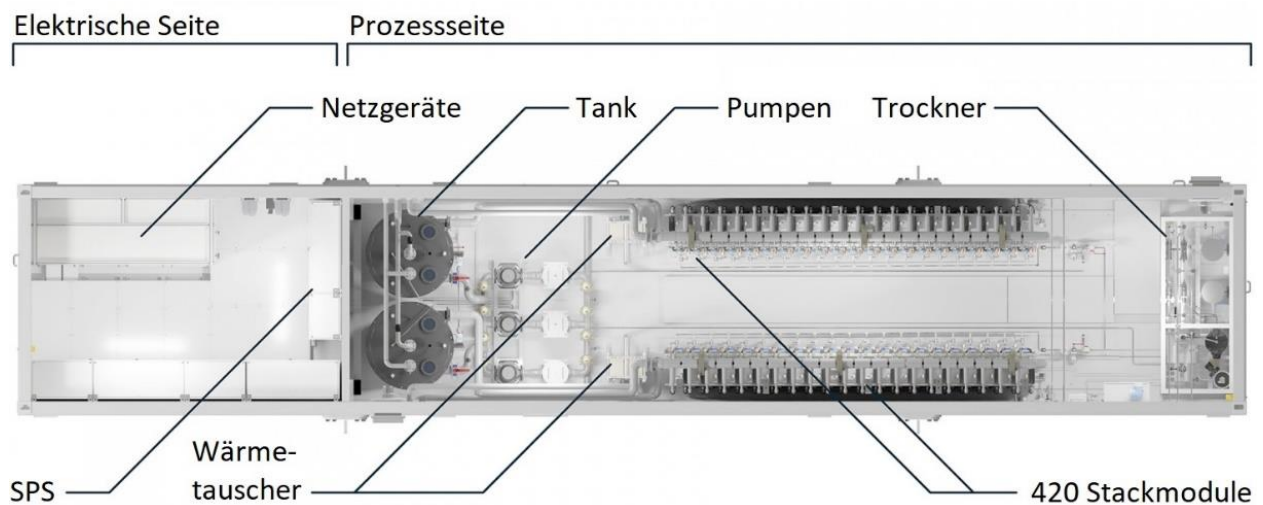


Abbildung 3: Aufbau AEM-Multicore

- **Gasanalytik:**

- NEO983A H<sub>2</sub>-Sensor (neohysens) zur Bestimmung des Wasserstoffanteils im Sauerstoff.
- Durchflussmesser Promass F300 (Endress+Hauser) zur Bestimmung der produzierten Wasserstoffmenge
- Taupunktanalyser J22 TDLAS (Endress+Hauser) für die Quantifizierung von Wasser im Wasserstoff via Laserabsorptionsspektroskopie.
- OXY5500 (Endress+Hauser) zur detektierten Sauerstoffkonzentration im Produktwasserstoff.

- **Sicherheitsüberwachung:**

- Gaswarnanlage CC28 von GfG (Messbereich 0–100% H<sub>2</sub>), gekoppelt mit der Steuerung GMA200-MT6.
- Wasserstoffsensoren Polytron 5200 (Dräger) zur Detektierung von Wasserstofflecks auf Containerebene
- Sauerstoffsensoren 6809630 O<sub>2</sub> LS (Dräger) zur Detektierung von Sauerstoffkonzentrationen auf Containerebene
- Rauchwarnmelder ORS 142 (Hardy Schmitz), integriert in Notauskette

#### AP 2.4: Materialbeschaffung

Die Arbeitsschritte Materialbeschaffung und Montage wiesen 2022 zwar deutliche Verzögerungen im Vergleich zur Planung während der Antragsphase auf, sind aber mittlerweile weit fortgeschritten. Seitens Enapter bewirkt insbesondere die Verzögerung bei der Fertigung und Inbetriebnahme des Multicores (Arbeitspaket 2.4 – 2.6) eine Verschiebung bei der Bearbeitung der damit verbundenen Forschungstätigkeiten. Diese sind in erster Linie auf Lieferengpässe bei den Zulieferern der für den Bau des Multicores erforderlichen Komponenten zurückzuführen.

So konnte mit den über erste Inbetriebnahmeversuche hinausgehenden Forschungstätigkeiten erst verzögert begonnen werden. Durch die genehmigte Verlängerung der Projektlaufzeit konnten diese Verzögerungen kompensiert werden. Dies hatte gleichzeitig den Vorteil, dass Versuche an den Stackmodulen verlängert und so weitere Erkenntnisse für die Verlängerung der Lebensdauer der Stackmodule gewonnen werden können.

#### AP 2.5: Montage

Der Bau des Prototyps wurde in Q2/2023 abgeschlossen und es konnte anschließend mit dem Testbetrieb begonnen werden. Im April 2023 konnte die Prototypen-Anlage in den Bioenergiepark geliefert, angeschlossen und in Betrieb genommen werden. Neben vorbereitenden Maßnahmen für die Infrastruktur mussten auch genehmigungsrechtliche Vorbereitungen, insbesondere hinsichtlich der BImSch-Genehmigung erfolgen.



Abbildung 4: AEM Multicore im Bioenergiepark Saerbeck

### AP 2.6: Testbetrieb

Vor Beginn des Testbetriebes fanden Vorbereitungen für die Inbetriebnahme des Prototyps statt. Diese umfassen insbesondere infrastrukturelle Maßnahmen am Aufstellort im Bioenergiepark in Saerbeck aber auch genehmigungsrechtliche Vorbereitungen (Erhalt der BImSch-Genehmigung), durchgeführt durch die FH Münster.

Im Mai 2023 fand die offizielle Einweihung des AEM Multicore statt. Seitdem befand sich die Anlage im Testbetrieb. Die Leistung wurde sukzessive hochgefahren. Defekte Stackmodule wurden nach Möglichkeit ausgetauscht und gefundene Fehler beseitigt. Die Bedienung des Multicore und der Wasserstoffsystemtechnik (u.a. Druckregelstation, Wasserstoffackel und -ausbläser, BHKW, Wasseraufbereitung) wurde durch Personal der FH Münster vor Ort unterstützt.

Im Laufe des Testbetriebes traten vermehrt Defekte von Berstscheiben auf der String-Ebene auf, die die Stacks im Falle eines Überdrucks schützen sollten (bspw. bei Fehlfunktion der NO-Ventile). Da ein Überdruck im String nicht festzustellen war, wurden Druckmessungen in der gemeinsamen Lüftungsleitung der Strings durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass beim Abblasen des gesamten Systems ein ausreichend hoher Druck in der Lüftungsleitung entsteht, um die Berstscheiben zu schädigen. Anschließend wurden Berstscheiben eingebaut, die einem höheren Gegendruck standhalten, wodurch weitere Defekte ausblieben.

Weiterhin wurde an zwei Strings ein Isolationsmonitoring installiert und an den Medienverbindungen der zugehörigen Stackmodule Messstromwandler angebracht. So konnte das elektrotechnische Verhalten, insbesondere auftretende Streuströme und Isolationswiderstände, bei modifizierten Betriebsparametern untersucht werden.

Im Rahmen des Testbetriebs erfolgten mehrere konstruktive und systemische Optimierungen, deren Nutzen und Verwertbarkeit sich unmittelbar auf die Betriebssicherheit, Energieeffizienz und Wartungsfreundlichkeit des Gesamtsystems auswirken. Der Wechsel der ursprünglich eingesetzten ASCO-Ventile zu Bürkert-Ventilen im NO-Strang war erforderlich, da die ASCO-Ventile nach wiederholtem Kontakt mit Kondensat Undichtigkeiten sowie ein unzuverlässiges Steuerungsverhalten aufwiesen. Die nun verwendeten Bürkert-Ventile zeichnen sich durch eine deutlich höhere Zuverlässigkeit und einen signifikant geringeren Strombedarf aus (2 W gegenüber 16 W). Für die Gesamtheit aller Strings reduziert sich dadurch die elektrische Leistungsaufnahme von 672 W auf 84 W, was zu einer spürbaren Steigerung der Energieeffizienz beiträgt.

Da entsprechende ASCO-Ventile auch als Ventil zur Druckerhaltung auf Set-Ebene verwendet wurden, mussten diese entsprechend ausgetauscht werden. In diesem Fall wurde ein Ventil von COAX-Müller verwendet, welches ein verlässlicheres Schließverhalten und eine stabilere Konstruktion aufwies.

Im ursprünglichen Design der Stackmodule wurden am Wasserstoff-Isolator Drosselblenden eingesetzt, um Druckunterschiede innerhalb eines Strings zu vermeiden. Im Betrieb zeigte sich jedoch, dass diese Orifices nach wenigen Betriebsstunden durch Ablagerungen verstopfen. Um eine stabile Betriebsweise sicherzustellen, wurden sie durch Standard-Einschraubverschraubungen ersetzt.



Abbildung 5: Ablagerung an Orifice

Zur Erhöhung der Arbeitssicherheit wurden an den Elektrolytabläufen der unteren Module jedes Strings Kugelventile installiert. Diese Maßnahme reduziert das Gefahrenpotenzial beim Umgang mit Elektrolyt insbesondere während des Austauschs einzelner Stacks erheblich.

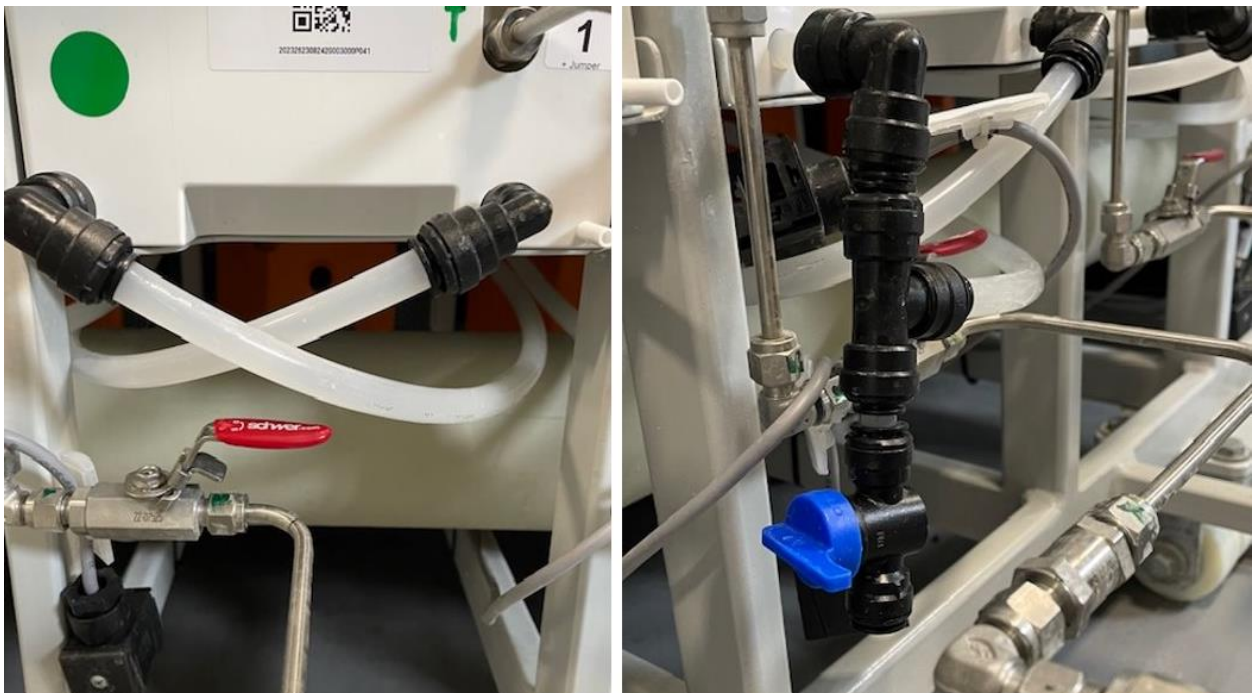


Abbildung 6: Kugelventil auf Stringebene

Zudem zeigte sich, dass die ursprünglich eingesetzten Koaleszenzfilter auf Set-Ebene für eine effektive Kondensatabscheidung nicht ausreichend waren. Daher wurden ergänzend Zyklonabscheider installiert, um die Betriebssicherheit und Lebensdauer der Komponenten zu erhöhen. Darüber hinaus wurde die Druckmessung optimiert, indem pro String ein zentraler Drucksensor integriert wurde, was den Sensoreinsatz vereinfacht und die Auswertung der Druckverhältnisse effizienter gestaltet.

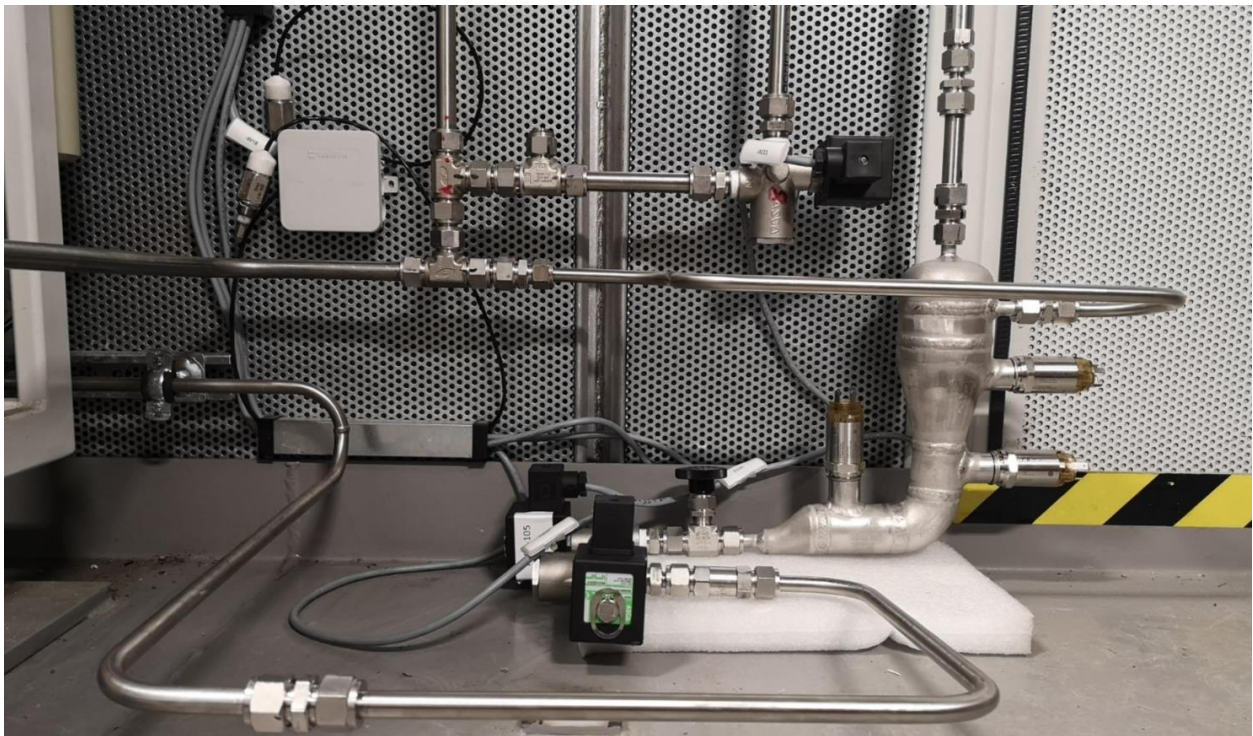


Abbildung 7: Zyklonabscheider

In der Weiterentwicklung („Model T“) ist eine vergrößerte aktive Fläche der Stacks vorgesehen, um den Gesamtwirkungsgrad zu verbessern. Ziel ist es, durch Skalierung die Stackstabilität und Lebensdauer zu erhöhen, ohne den modularen Systemansatz aufzugeben. Das angepasste Design sieht dafür eine Reduktion von 420 auf 100 Stacks vor, wodurch sowohl die Gesamtkomplexität als auch der Wartungsaufwand künftig deutlich verringert werden können.

### AP 3 Erarbeitung Skalierungspfad für 100 MW

#### AP 3.1: Analyse Kostenkalkulation

Eine erste Analyse der Kostenstruktur ergab, dass die Kostensenkungspotenziale der in AP 2 designten MW-Anlage begrenzter sind als zunächst angenommen. Dies liegt u.a. an den Kosten für den Container. Daher fiel die Entscheidung für den Pfad zu 100 MW auf eine modularere, skalierbarere Variante mit einer maximalen Reduzierung der Peripherie. Die Einsparungen durch Scale-up-Effekte scheinen in diesem Fall deutlich höher. Nach aktuellem Stand wird davon ausgegangen, dass Anlagen im Sinne des Flex 120 bei höheren Gesamtleistungen von bspw. 100 MW spezifisch günstiger sein werden als die Multicore-Variante aus AP 2. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass die Nachfrage nach flexiblen Mehrkernsystemen im mittleren Leistungsbereich insbesondere aus der Klein- und Mittelindustrie aktuell sehr groß ist. Viele Kunden äußern Bedarf nach kleineren Anlagen, dessen Leistung später kostengünstig erhöht werden kann. Dadurch können erste Erfahrungen bei überschaubarem unternehmerischem Risiko gesammelt werden.

#### AP 3.2: Ausarbeitung Skalierungskonzept

Um den Vorteil der Flexibilität weiter im Fokus zu halten und gleichzeitig kurzfristig eine Lösung zu generieren, wurde ein Produkt entwickelt, das die Nachfrage aus AP3.1 adressiert: Der AEM Flex 120 besteht aus 50 Stackmodulen (wie sie bereits im 10er Testsystem sowie im Multicore Prototyp verwendet werden) mit einer Leistung von insgesamt 120 kW. Durch die separate H<sub>2</sub>-Einhausung ist der Flex 120 zudem für den Betrieb innerhalb von Produktionshallen geeignet. Ein erster Prototyp wurde als Betatester bereits bei einem Kunden positioniert und in Betrieb genommen.

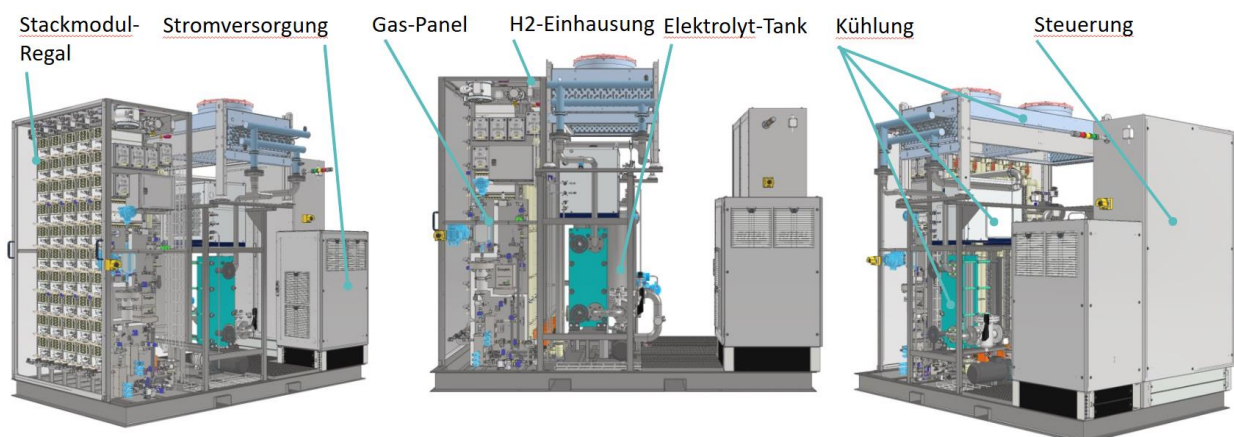


Abbildung 8: AEM Flex 120

### Betriebsdaten des AEM Flex 120:

- Nominale H<sub>2</sub>-Produktionsrate: 25 Nm<sup>3</sup>/h / 54 kg/Tag
- Minimale Leistung: 3 Nm<sup>3</sup>/h (12%)
- Wasserstoffdruck: 35 bar max.
- Leistung: 120 kW
- Gewicht: 3700 kg
- Elektrolytkonzentration: 1 % KOH
- Tankvolumen: 290 Liter
- Wasserstoffreinheit: 99,96 %; 99,999% mit Trockner

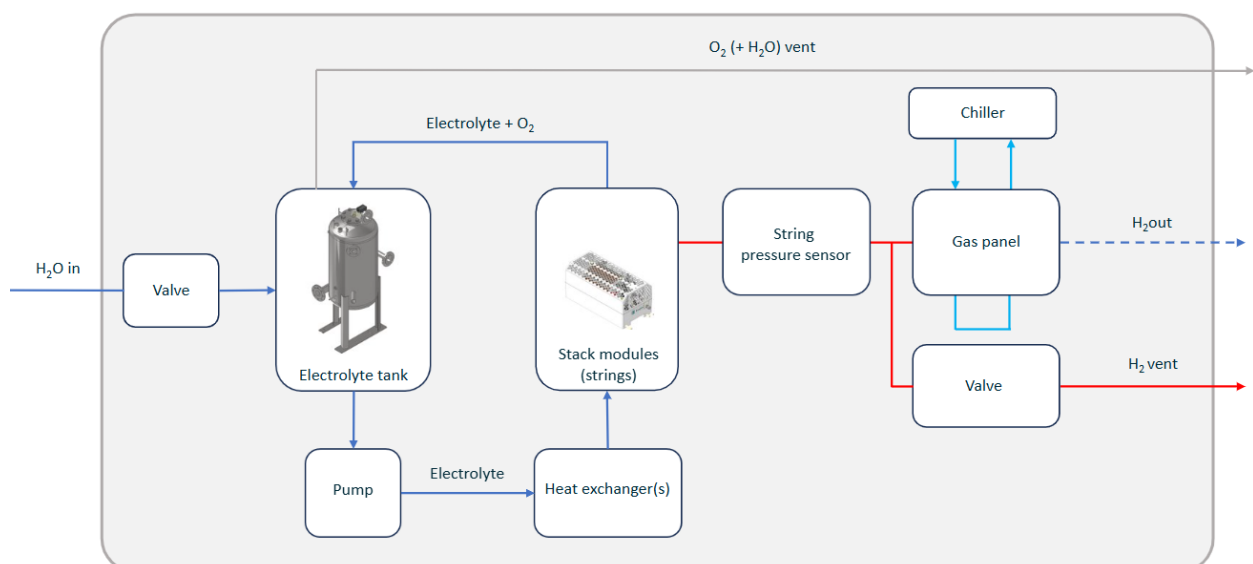


Abbildung 9: AEM Flex 120 - Vereinfachtes P&ID

Aus den oben genannten Gründen wurde nicht wie in der Projektbeantragung angedacht ein großer Stack im Zuge des HY-Core-Projektes entwickelt, sondern eine kostenoptimierte Version des aktuellen Flex120-Prototypen. Die Entwicklung des Flex120 ist so ausgelegt, dass diese Anlagen nach abgeschlossener Entwicklung einer neuen Stackgeneration (im Nachgang des aktuellen Projekts) mit wenig Aufwand umgebaut werden könnten. Dadurch kann das unternehmerische Risiko reduziert und dennoch weiter auf das Projektziel eingezahlt werden.

### AP 3.3: Entwurf Prototyp 100 MW System und Komponenten

Während der Bearbeitung des Projektes wurde festgestellt, dass die geplante Stack-Entwicklung eines größeren Stacks abweichend von der ursprünglichen Projektlogik keinem Top-down sondern einem Bottom-up-Ansatz folgen wird. Die Entwicklung ist weitaus aufwendiger als zunächst geplant. Dies ist in erster Linie durch die umfangreichen Änderungen zum bestehenden Stack und die damit einhergehenden Veränderungen bzgl. technischen Anforderungen und Spezifikationen bedingt. Diese Entwicklung mit anschließender Entwicklung des Stackmoduls konnte daher nicht mehr in der Projektlaufzeit erfolgen.

#### AP 3.4: Materialbeschaffung Prototyp

In Q1/2023 wurde seitens ABC Klinker der Auftrag für den Bau des 120 kW Elektrolyseurs erteilt. Die Umsetzung des Konzepts erfolgte mithilfe dreier Hauptpartner (Envitec – Endmontage; Swagelok – Gasverrohrung; IAB (Siemens) - Elektrokonstruktion & Schaltschrankbau). Die Beistellung aller Unterkomponenten und Unterbaugruppen vollzog der Enapter-interne Einkauf.

#### AP 3.5: Montage Prototyp

Die Hauptbaugruppen des Flex 120 wurden bei den jeweiligen Partnern abgenommen. Nach der Endmontage und Installation der Feldverkabelung bei Envitec - mit direktem Support durch Enapter - erfolgte der Transport zum Enapter Campus. Nach anschließender Vor-Inbetriebnahme (FAT) durch das Enapter-interne Engineering erfolgte der Transport und die Installation bei ABC Klinker.

#### AP 3.6: Testbetrieb Prototyp

Nach der erfolgreichen Adaption der Software wurde die Anlage in das Gesamtkonzept des Kunden eingebunden. In 12/2023 produzierte die Anlage erstmals Wasserstoff und eine Beimischung zum Erdgas in den Ziegeleiofen war erfolgreich. Seit Beginn des Testbetriebes waren zahlreiche konstruktive Änderungen an der BoP der Anlage nötig, u.a. Austausch von Berstscheibenmodelle und Anpassung der Verrohrung. Durch geplante Wartungsarbeiten am Ziegeleiofen und an der Wasseraufbereitungsanlage kam es wiederholt zu Verzögerungen im Testbetrieb. Weiterhin wurde mit ABC Klinker eine Schnittstelle zur kundenseitigen PV-Anlage abgestimmt, um den Flex 120 zu betreiben und somit den Anteil verwendeter regenerativer Energien in der Ziegeleiproduktion zu erhöhen. Nach einem Fehlerfall am Prototypen des AEM Multicores wurde der Testbetrieb des Flex 120 kurzzeitig gestoppt, da sich beide Anlagen Komponenten teilen, die im Verdacht standen, den entsprechenden Fehlerfall ausgelöst zu haben. Um ein erneutes Auftreten zu verhindern, wurde eine Isolationsüberwachung im Jahr 2024 nachgerüstet und eine zusätzliche Sicherheitsroutine in die Anlagensteuerung implementiert.

#### AP 3.7: Detailentwurf 100 MW System

Die in Arbeitsschritt 3.7 anberaumte Detailkonstruktion einer Anlage für den Scale-up wurde abgeschlossen. In die Konstruktion flossen Erkenntnisse aus Bau und Testbetrieb des Prototypen, die eine Optimierung der Konstruktion hinsichtlich Fertigung, Wartung, Kosten, Bauraum und Anlagenverfügbarkeit zur Folge haben. Auf Basis dieser Detailkonstruktion wurde eine Kleinserie von 4 Anlagen (AEM Flex 120) gefertigt.

Der Grundbaustein zum Entwurf eines 100 MW Systems stellt der Flex 120 dar. Da dieser sowohl mit dem Ziel konstruiert ist, auf eine neue (bzw. möglicherweise größere) Stackgeneration anpassbar zu sein, als auch ein in sich geschlossenes Elektrolyse-System inklusive BoP darstellt, verfolgt die Grundidee des 100 MW Systems eine Ansammlung an Flex 120-Systemen. So kann je nach Kundenbedarf ein modulares, in 120 kW-Schritten skalierbares Endsystem installiert werden. Durch den möglichen Indoor-Betrieb kann dies auch in Hallen erfolgen, solange entsprechende Bauwerke mit passend skalierten Lüftungssystemen versehen sind.

## 2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der folgende Abschnitt erläutert die wesentlichen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises der Projektaktivitäten. Die Struktur orientiert sich dabei am zuletzt genehmigten Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplan (AZA). Um eine gute Übersichtlichkeit zu gewährleisten, konzentriert sich die Darstellung auf die budgetär bedeutendsten Positionen; auf die explizite Aufführung von Kleinstbeträgen wird verzichtet.

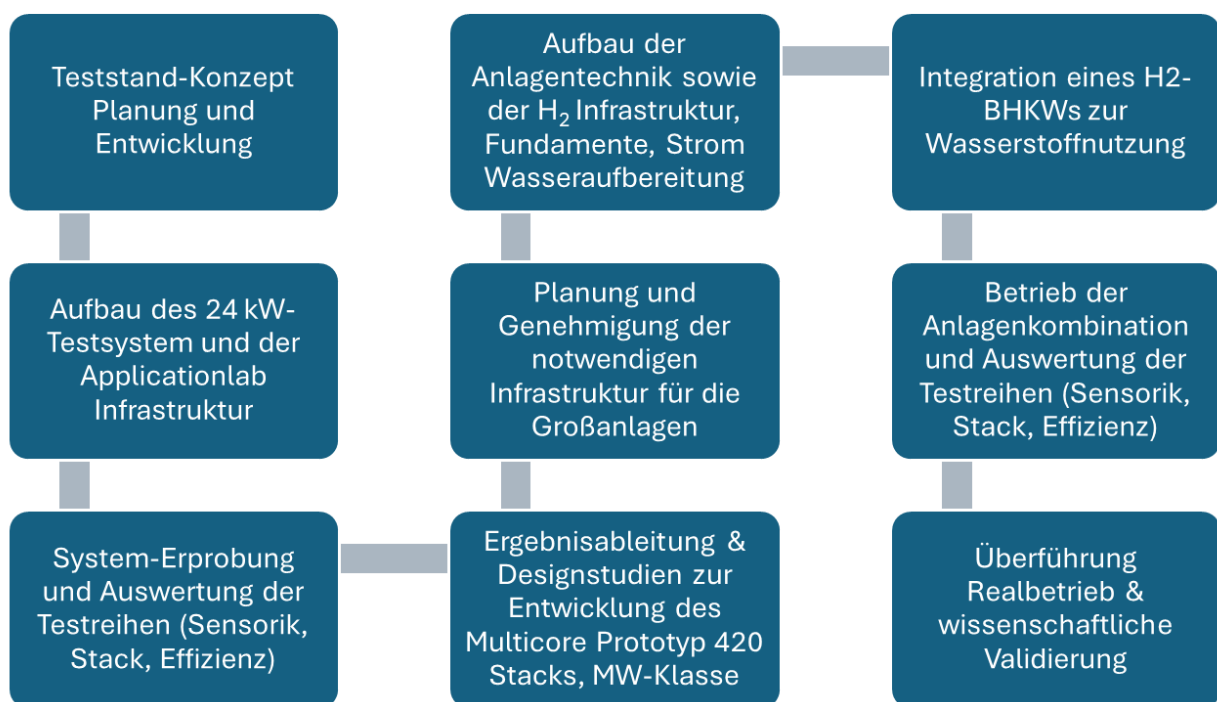
### Zusammenfassung der wichtigsten Kostenpositionen

AZA Position	Bezeichnung	Inhalt & Verwendung
0813	Material	Komponenten & Stack Module für die Errichtung und Inbetriebnahme des AEM Teststands
0823	FE-Fremdleistungen	-
0837	Personalkosten	Technische, Wissenschaftliche und administrative Personal für Unterstützung von Auswertungen, Aufbau, Betrieb der Testsysteme
0838	Reisekosten	Dienstreisen, Tagungen, H2 Giga Treffen sowie Besuch von Messen
0847	Vorhabenspezifische Abschreibungen	Bei den ausgewiesenen Abschreibungen handelt es sich um den wertmäßigen Verzehr von Wirtschaftsgütern, die explizit für die Durchführung der Forschungsarbeiten im Rahmen von HY Core beschafft wurden
0848	Afa sonstige	-
0850	Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	Unter dieser Position werden Kosten ausgewiesen, die in direktem kausalem Zusammenhang mit den Forschungs- und Entwicklungszielen des Vorhabens stehen und nicht den Personal- oder Investitionskosten zuzuordnen sind
0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	-
0860	Verwaltungskosten	-

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der Zuwendung an die Enapter GmbH im Rahmen des Projekts HY-Core ergibt sich aus der verantwortlichen Bearbeitung der Arbeitspakete in den Bereichen Entwicklung, Design und Konstruktion. Mit Unterstützung der FH Münster in Form von Arbeitspaketen wissenschaftlicher / infrastruktureller Natur, kann so die industrielle Skalierung der AEM-Elektrolyse erfolgen.

Die Teilprojekte umfassten dabei die Entwicklung des Stackmoduls, Design, Bau und Erprobung des Megawatt-Prototypen inklusive anschließendem Testbetrieb im Bioenergiepark Saerbeck sowie die Erarbeitung des Skalierungspfades eines 100 MW Systemes. Anschließend erfolgten außerdem umfassende Testreihen in Kooperation mit der FH Münster am entwickelten Multicore-System in realen Einsatzszenarien. Weiterhin wurden konkrete Bereitstellungspfade für den erzeugten Wasserstoff konzipiert und das übergeordnete Projektmanagement sichergestellt. Die durchgeführten Projektarbeiten waren für die Erreichung der Vorhabenziele dringend erforderlich und wären nicht allein aus eigenen Mitteln der Enapter GmbH finanzierbar gewesen.



Durch die kontinuierliche Validierung, Analyse und Optimierung in diesen Arbeitspaketen wurde gewährleistet, dass die technologischen Entwicklungen den aktuellen wissenschaftlichen Standards entsprechen und eine nachhaltige sowie marktfähige Skalierung der AEM-Elektrolyse bis zur Megawattklasse möglich wurde. Die strukturierte und systematische Vorgehensweise ermöglichte die Identifikation von Innovationspotenzialen und sicherte damit eine gezielte Ausrichtung des Gesamtsystems auf industrielle Anwendungen.

#### 4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In den letzten Jahren wurden wesentliche Fortschritte in der AEM-Elektrolyse erzielt, insbesondere bei Materialien, Elektrodendesign und Leistungssteigerung (Mustapha et al. 2025; Titheridge et al. 2025). Im Fokus stehen neue Elektrokatalysatoren, die durch Dotierung mit Übergangsmetallen, Nanostrukturierung oder Hybridansätze verbesserte Aktivität und Stabilität zeigen (Qayoom et al. 2024). Während Edelmetalle die besten Ergebnisse liefern, bieten nicht-edelmetallbasierte Systeme wie NiFeOx und NiFeCoOx vielversprechende Alternativen (Vinodh et al. 2024). Parallel wurden Membranen und Ionomere mit höherer chemischer Stabilität und Ionenaustauschkapazität entwickelt, um die Hydroxidionenleitfähigkeit zu erhöhen (Wijaya et al. 2024).

Beim Zell- und MEA-Design erweisen sich Elektrodenporosität und optimierte Herstellungs- sowie Betriebsbedingungen als entscheidend für hohe Stromdichten bei vergleichsweise niedrigen Spannungen (Yang et al. 2025). Typische Leistungsbereiche liegen bei 1,8–2,2 V und 0,5–3,0 A/cm<sup>2</sup> bei 40–90 °C (Mustapha et al. 2025). Neben Kaliumhydroxid werden alternative Elektrolytzusammensetzungen wie Kaliumcarbonat untersucht (Kim et al. 2025).

Zentrale Herausforderungen bestehen weiterhin in der Haltbarkeit der Membranen sowie im Fehlen standardisierter Testprotokolle (Titheridge et al. 2025; Qayoom et al. 2024). Damit bleibt kontinuierliche Forschung für die Bewertung von MEAs und Katalysatoren sowie für die breite Implementierung der AEM-Technologie erforderlich.

## 5. Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

*Bitte führen Sie hier Publikationen in wissenschaftliche Fachzeitschriften, Konferenzen, Postern, Vorträge etc. sowie weitere Formen der Veröffentlichung (wie beispielsweise News Beiträge, Interviews, Videos etc.) tabellarisch auf.*

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
07./08.09.2022	Vortrag	NG3: HY-Core – Upscaling AEM Electrolysis (1. H2Giga-Statuskonferenz)	Elmar Brüggling, Holger Eisenlohr	
20./21.09.2023	Vortrag	NG3: HY-Core – Upscaling AEM Electrolysis (2. H2Giga-Statuskonferenz)	Elmar Brüggling, Holger Eisenlohr	
29.09.2023	Vortrag	HY-Core – Upscaling AEM Electrolysis - Research and Application (Fortbildungsveranstaltung durch die Ingenieurkammer-Bau NRW)	Holger Eisenlohr	
10./11.09.2024	Vortrag	Hydrogen as a key technology in future energy systems (10th International Conference on Smart Energy Systems)	Simon Nießen	
17./18.09.2024	Vortrag	NG3: HY-Core – Upscaling AEM Electrolysis (3. H2Giga-Statuskonferenz)	Simon Nießen	
02./03.07.2025	Vortrag	Erfolgreiche Skalierung der AEM-Elektrolyse in die Megawattklasse (H2Giga-Abschlusskonferenz)	Elmar Brüggling	
Q4/2025	Beitrag in Fachzeitschrift	Techno-economic viability of an electrolyzer-oxygen storage system for continuous biogas desulfurization in Power-to-Gas applications (Journal of Cleaner Production)	Kirill Resnikow, Harry E. Hoster, Christof Wetter	<a href="https://t1p.de/azuny">https://t1p.de/azuny</a>

## 6. Literaturverzeichnis

Gemeinde Saerbeck (2021): Biomasse. Biogas; Kompostwerk. Online verfügbar unter <https://www.klimakommune-saerbeck.de/Bioenergiepark/Erneuerbare-Energien/Biomasse.htm?waid=317>.

Kim, In Tae; Kim, Tae Ha; Moon, Seong Jun; Park, Gi Dae; Park, Yoo Sei (2025): Yolk–shell structured microspheres consisting of CoO/CoP hetero-interfaced nanocomposites as highly active hydrogen evolution reaction electrocatalysts for AEM electrolyzer stacks. In: *J. Mater. Chem. A* 13 (19), S. 13763–13775. DOI: 10.1039/D4TA07211A.

Kreis Steinfurt (2018): Treibstoff der Zukunft - Grüner Wasserstoff mobilisiert das energieland 2050: Bewerbung des Kreises Steinfurt als Modellregion Wasserstoffmobilität NRW.

Kreis Steinfurt (2025). Unter Mitarbeit von Henning Bückers.

Mühlböck, Kajetan; Völkl, Johannes (2025): Einsatz von Sauerstoff aus der Wasserelektrolyse für chemische Synthesen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 97 (5), S. 536–548. DOI: 10.1002/cite.202400138.

Mustapha, Ferial; Guilbert, Damien; Gross, Bodo (2025): Advancements in anion exchange membrane electrolyzers: from catalysts to life cycle assessment. In: *International Journal of Sustainable Energy* 44 (1), Artikel 2520812. DOI: 10.1080/14786451.2025.2520812.

Qayoom, Abdul; Ahmad, Muhammad Shakeel; Fayaz, H.; Qazi, Atika; Selvaraj, Jeyraj; Zainul, Rahadian et al. (2024): Recent advances in anion exchange membrane technology for water electrolysis: a review of progress and challenges. In: *Energy Science & Engineering* 12 (11), S. 5328–5352. DOI: 10.1002/ese3.1938.

Titheridge, Laura; Sharma, Shailendra K.; Soisson, Anouk; Roth, Christina; Marshall, Aaron T. (2025): Recent advances in understanding catalyst coated membranes vs catalyst coated substrates for AEM electrolyzers. In: *Current Opinion in Electrochemistry* 49, S. 101607. DOI: 10.1016/j.coelec.2024.101607.

U.S. Department of Energy (2024): Hydrogen Shot: Water Electrolysis Technology Assessment (2024-12). Online verfügbar unter <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/hydrogen-shot-water-electrolysis-technology-assessment.pdf>, zuletzt geprüft am 06.11.2026.

Vinodh, Rajangam; Palanivel, Tamilazhagan; Kalanur, Shankara Sharanappa; Pollet, Bruno G. (2024): Recent advancements in catalyst coated membranes for water electrolysis: a critical review. In: *Energy Adv.* 3 (6), S. 1144–1166. DOI: 10.1039/D4YA00143E.

Wijaya, Gede Herry Arum; Im, Kwang Seop; Nam, Sang Yong (2024): Advancements in commercial anion exchange membranes: A review of membrane properties in water electrolysis applications. In: *Desalination and Water Treatment* 320, S. 100605. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100605.



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

Yang, Liming; Dong, Shengbing; Yang, Tao; Liu, Jianhe; Liu, Shuang; Wang, Kang et al. (2025): Membrane Electrode Assembly Design for High-Efficiency Anion Exchange Membrane Water Electrolysis. In: *Research (Washington, D.C.)* 8, S. 907. DOI: 10.34133/research.0907.