Leitprojekt
H_2Giga

Dresden, 31.03.2026

Verbundvorhaben H2Giga_TP_HTm: HTEL-MODULE – Ready for Gigawatt; Teilvorhaben Serienfertigung großskaliger HTEL MODULE

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung

Stand:	31.12.2025
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Sunfire SE
Autorinnen/Autoren:	F. Vandercruysse, K. Schwarze, S. Golle, T. Richter, D. Schimanke, S. Odoj
Fördertitel:	Serienfertigung großskaliger HTEL Module
Laufzeit:	01.12.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY125A
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Teil II. Eingehende Darstellung

Im Folgenden sind die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse dargestellt. Eine detaillierte Ergebnisdarstellung ist im Teil III zu finden.

Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

HTm1.1: Spezifikation der Anforderungen von HTEL-Modulen im Industriemaßstab

Das Arbeitspaket HTm.1.1 widmete sich der Festlegung der Anforderungsspezifikationen aus den identifizierten Zielmärkten der Hochtemperaturelektrolyse, der Bestimmung der optimalen Modulgröße (basierend auf e.g. Effizienz, OPEX und CAPEX), der Entwicklung von Realisierungskonzepten hinsichtlich der Aufstellung, Betriebsführung, Wartung- und Instandhaltung sowie der Erarbeitung und regelmäßigen Review der Produktions- und Zielkostenplanung. Hierzu wurde eine umfassende Market Requirement Specification (127 Anforderungen) erarbeitet, priorisiert und in einem Soll-/Ist-Abgleich gegen die Entwicklungsstände gespiegelt. Damit wurde der Meilenstein *MS.HTm.1 - Erstellung der Modul- und Systemspezifikation* erreicht.

Zur Bewertung technologischer Optionen wurde das bestehende TCO-Modell (Total Cost of Ownership) erweitert, um Entwicklungsentscheidungen entlang CAPEX/OPEX-Wirksamkeit, Wirkungsgrad, Lebensdauer und Modulgröße quantifizieren zu können. Eine Validierungs-Roadmap für SOEC-Systeme wurde erstellt, wobei ein schrittweises Vorgehen von STMs (Small-Test-Modules, vgl. HTm.1.7) bis zu großskaligen Pilotanwendungen vorgesehen ist.

Im Skalierungskonzept wurde die optimale Modulgröße (~10 MW) aus techno-ökonomischen Analysen abgeleitet. Das Modul bildet eine standardisierte Einheit, welche in wenigen, großen Skids vorgefertigt werden kann. Das Modul kann beliebig repliziert werden, um die gewünschte Gesamtanlagengröße zu erreichen. Weiterhin wurde ein Degradationsausgleichskonzept konzipiert (Temperaturanhebung, Nutzung von Überkapazitäten, rollierende Stackwechsel), dass eine stabilere Modulleistung erlaubt. TCO-Sensitivitäten zu Degradation, Überkapazität, Nennstrom u.a. wurden evaluiert.

Mit Installations- und Wartungskonzepten wurden notwendige Aktivitäten, Personalressourcen und verfügbarkeitsrelevante Einflussgrößen abgeleitet. Eine Simulation der Anlagenkopplung mit fluktuierenden erneuerbaren Energien lieferte realitätsnahe Betriebsprofile zur Bewertung der Systemauslegung. Abschließend wurde ein ramp-up-Szenario hin zur Serienfertigung >200 MW/Jahr entwickelt und ein Produktkosten-Reporting etabliert.

HTm.1.2: Weiterentwicklung und Validierung der Gen2 als Versuchsträger für großskalige SOEC-Systeme

Bereits vor dem Teilvorhaben HTEL-MODULE wurde eine Generation 2 von SOEC-Systemen entwickelt, welche als Vorläufergeneration und Versuchsträger für die Generation 3 SOEC diente. Ziel war die Gen2-Systeme (250 kW) als Vorläufergeneration zur Ableitung von Optimierungen für Gen3 zu nutzen. Dazu wurden Kostenstrukturen und Fertigungsprozesse analysiert und Baugruppenkostentreiber identifiziert, insbesondere bei der Hotbox, der Stackintegration und auf Blockebene. Die Zusammenarbeit mit der XENON Automatisierungstechnik GmbH zeigte bedeutende Optimierungsansätze bei Schweißen,

Elektromontage und Prüfschritten. Ein höherer Grad an Vormontage wurde als essenziell für spätere Serienfertigung bewertet.
Ein Großteil der Fertigungskosten entfiel auf die Stacks und die Hotbox. Dies ist vorrangig damit zu begründen, dass die Prozesse bisher weitestgehend manuell (Stack) und wenig optimiert sowie in geringen Stückzahlen (Hotbox) erfolgten. Aber auch auf das System und die Blöcke entfielen ein größerer Anteil an Fertigungskosten.
Weiterhin wurden im Rahmen der Gen2.1-Entwicklung und bedingt durch die Wandlung von einem FuE-geprägten Start-up zu einem industriell produzierenden Unternehmen neue Sunfire-interne Prozesse etabliert, die tlw. am Beispiel der Gen2.1-Entwicklung erprobt wurden. Dazu gehörten der Aufbau eines Qualitäts- und Sicherheitsmanagementsystem (Einführung von Funktionaler Sicherheit im Rahmen der IEC 61511), Umsetzung neuer Prozesse für die Zertifizierung gemäß der anwendbaren CE-Richtlinien (insbesondere Maschinen- und EMV-Richtlinie) sowie in der Erfüllung von Dokumentationspflichten. Erfahrungen aus dem MultiPHLY-Projekt bestätigten betriebliche Anforderungen industrieller Partner. Der Meilenstein *MS.1.2.SF.1 - Design-, Kosten- und Produktions-Review Gen2.1* wurde erreicht.
Für die Betriebsführung wurde der Parallelbetrieb mehrerer Module untersucht. Hierbei wurden Unterschiede in Dampf- und Wasserstoffverteilung gemessen und ihre Ursachen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Parallelschaltung grundsätzlich möglich ist, jedoch hochpräzise fluidische Auslegung erfordert, um Stackschäden zu vermeiden (*MS.HTm.2 – Nachweis der Funktionalität des parallelen Betriebs der Module*).

HTm.1.3: Konzept- und Vorausentwicklung für großskaliges HTEL-Modul

Das Arbeitspaket HTm.1.3 widmete sich der Durchführung grundlegender und begleitender Konzept- und Vorausentwicklungen deren Ergebnisse für die erfolgreiche Entwicklung sowie den wirtschaftlichen Betrieb eines großskaligen HTEL-Moduls der Generation 3 notwendig sind. Es wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Technische Universität Bergakademie Freiberg, DECHEMA Forschungsinstitut sowie DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH bearbeitet.
Es wurden verfahrenstechnische Konzepte unterschiedlicher Modul- und Systemschnittstellen untersucht und unterschiedliche Prozessvarianten simuliert. Daraus entstand eine umfangreiche Bewertungsmatrix mit über 30 Varianten, die mit über 22 Parametern verglichen wurden. Damit wurde der Meilenstein *MS.1.3.SF.1 - Auswahl, Prozess-Simulation und Bewertung grundlegender Konzepte für verfahrenstechnische Modul- und Hotbox-Verschaltung* erreicht.
Weiterhin wurde ein Feed-Conversion-Control-System entwickelt und für STMs erprobt. Die Testergebnisse und die TCO-Berechnungen für ein Full Scale Module führten dann zu einer weiteren Verbesserung des Feed Conversion Control Systems, da die notwendige Sensorik/Aktorik durch einen modellbasierten Regelansatz um über 100 Komponenten pro Modul reduzieren werden konnte.
Um die Stack-Robustheit zu erhöhen, wurden umfangreiche Analysen von Langzeitdaten bestehender Anlagen durchgeführt. Daraus wurden Routinen und Kennzahlen zur Bestimmung der Degradation und schadensrelevanter Betriebsparameter abgeleitet. Außerdem wurden Betriebsereignisse und Betriebsparameter/-führung mit Alterungskennzahlen und Ausfallraten korreliert.
Diese Grenzwerte wurden anschließend in STM-Versuchen validiert und dienten als Basis der FSM-Betriebsstrategie. Zudem wurde ein Anomalie-Detektionsalgorithmus entwickelt, der Ausfälle frühzeitig erkennen kann (*MS.1.3.SF.2 - Grenzwerte und Betriebsführungs-Leitfaden zu schonendem und degradationsarmen Betrieb des Full-Scale-Moduls definiert*).

Werkstoffuntersuchungen (Oxidation, Alterung, Kriechen) wurden gemeinsam mit der DECHEMA DFI und der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Die Ergebnisse führten zu einer fundierten Auswahl geeigneter eisen- bzw. nickelbasierter Hochtemperaturlegierungen je nach Belastungszone der Hotbox (*MS.1.3.SF.3 - Hauptschadensmechanismen und Werkstoffmodelle vorvalidiert sowie zeitabhängige Korrosions-, Festigkeits- und Lebensdauer-Eigenschaften unter Prozessgas-Atmosphäre für kostenoptimierte Werkstoffauswahl und sichere Auslegung der Hotbox des zu optimierenden Full-Scale-Moduls nutzbar)*.

In Zusammenarbeit mit dem DBI Gas – und Umwelttechnik GmbH wurden mögliche Aufreinigungskonzepte für die relevanten Eduktströme (Wasserdampf und CO2) anhand physikalisch-chemischer Wirkungsprinzipien identifiziert und auf Basis ingenieurstechnischer Annahmen techno-ökonomisch bewertet. Auf diesem Wege wurden Vorzugslösungen für den Einsatz im SOEC-Kontext abgeleitet (Reindampfumformung für Wasserdampf / Aktivkohleadsorber zur CO2 Reinigung) und die Annahmen empirisch verifiziert (*MS.1.3.SF.4 - Vorzugslösungen für die Abscheidung von Silizium aus Wasser, Wasserdampf und weiteren Eduktströmen auf Basis der Versuchsergebnisse und techno-ökonomischer Bewertungen definiert*).

HTm.1.4: Basic Engineering HTEL im MW-Maßstab (Generation 3)

Das Arbeitspaket HTm.1.4 widmete sich der Konzeptionierung eines großserientauglichen HTEL-MODULE der nächsten Generation.

Die verfahrenstechnischen Konzeptarbeiten aus HTm.1.3 wurden mit Schwerpunkt auf Konstruktion, Elektrotechnik, Kostenschätzung, Design-to-Cost, Anlagensicherheit, Industrialisierung, Wartung und Fertigung weiter ausgeführt. Stationäre Prozesssimulationen wurden durchgeführt und Massen- und Energiebilanzen sowie R&I-Fließbilder erstellt. Darauf aufbauend wurde wiederrum ein 3D-Layout eines Moduls mit 1,6…3,1 MW sowie ein Systemlayout mit 20 MW erarbeitet.

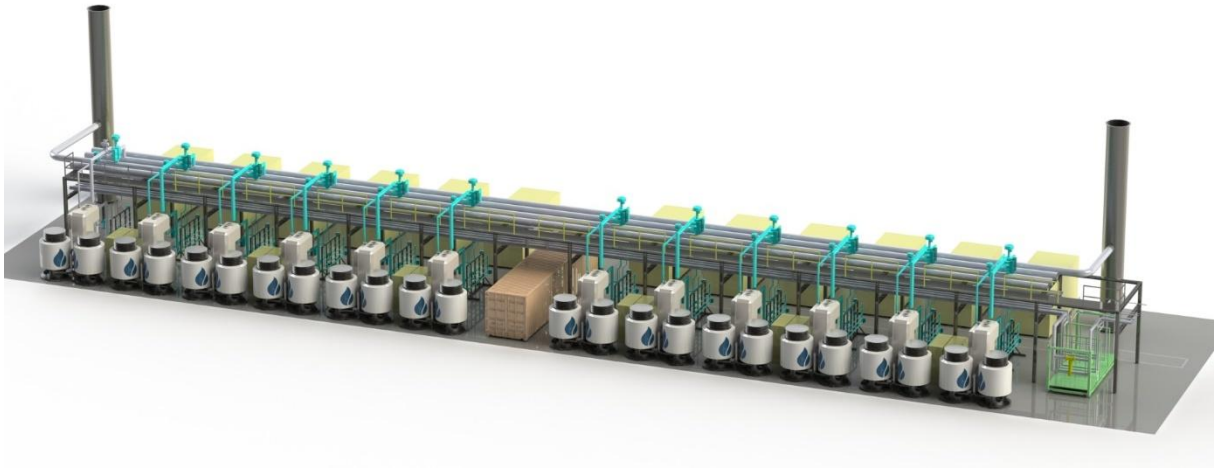

Abbildung 1: 3D-Layout eines 20 MW-Gen3-Systems bestehend aus zwölf Modulen (© Sunfire SE)

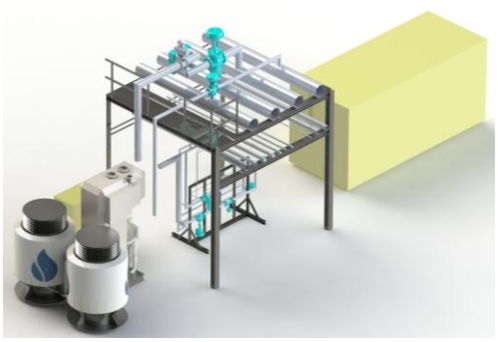

Abbildung 2: 3D-Layout eines 2 MW-Gen3-Moduls (© Sunfire SE)

Dieses Modul und das zugehörige System wurden einer umfangreichen HAZOP und einer Risikoanalyse unterzogen. Außerdem wurden ein Basic Electrical Engineering und ein Wartungskonzept erstellt. Damit wurde ein vollständiges und dem Stand der Technik nach sicheres *Basic Engineering für STM, FSM und replizierbares MW-System erzeugt* und dokumentiert und somit der Meilenstein *MS.HTm.3* erreicht.

HTm.1.5: Entwicklung Hotbox des großskaligen HTEL-Moduls Gen 3

Ziel des Arbeitspaketes war die Neuentwicklung einer Hotbox für das großskalige HTEL-MODULE unter Beachtung der Leistungs-, Lebensdauer- und Kostenziele. Die Hotbox des Hochtemperaturelektrolyse Moduls ist das Kernelement, welches einerseits die Stacks aufnimmt und in welchem die Heißkomponenten bei ca. 800°C betrieben werden sowie anderseits die Schnittstelle zu allen „kalten" Komponenten der Medien- und Stromversorgung sowie Regelungstechnik des Moduls. Die Entwicklung erfolgte stufenweise mit zunächst kleinskaligen Versuchsträgern als Testsysteme mit 270 kW (Small-Test Module – STMs, *MS.1.5.SF.3 – Engineering Hotbox Small-Test Modul abgeschlossen*). Anschließend erfolgte das Engineering von Einheiten mit der vollen Leistung von 1,3 MW (Full-Scale Module – FSM, *MS.1.5.SF.2 - Hotbox-Konzept abgeschlossen und Festlegung der Modulgrößen für das Small-Test Modul und Full-Scale-Module)*. Parallel dazu wurden die Balance of Plant Komponenten des Heißbereiches unter dem Aspekt der Skalierbarkeit weiterentwickelt.

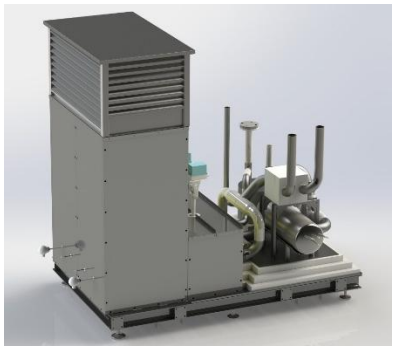

Abbildung 3: STM mit 2 Stacks links und verkleinerter GPU rechts (© Sunfire SE)

Die FSM-Hotbox wurde radial angeordnet, mit integrierter Gas Processing Unit und thermischer Isolierung. Kriechverhalten, Druckbelastungen, Sensorik- und Regelkonzepte sowie Fertigungsstrategien wurden intensiv untersucht. Designvereinfachungen ermöglichten eine 30 %ige Kostensenkung gegenüber dem PoC (*MS.1.5.SF.4 – Engineering Hotbox Full-Scale Modul abgeschlossen, MS.1.5.SF.5 - Fertigungs- und kostenoptimiertes Engineering der Hotbox für Kleinserie*).

Parallel wurden Heizer- und Wärmeübertragerkonzepte skaliert und Erprobungen durchgeführt; Siliziumbeladung als Lebensdauerfaktor wurde analysiert (*MS.1.5.SF.1 - Definition der Randbedingungen aus der HotBox für Werkstoffauslagerung und –modellierung*)

HTm.1.6: Entwicklung und Aufbau von Testständen zur Validierung von HTEL-Modulen (Generation 3)

Das Arbeitspaket widmete sich der Entwicklung und Bau von Testständen zur Validierung von neuartigen Hochtemperaturelektrolyse Modulen (Small Test Module sowie Proof-of-Concept des Full-Scale Moduls). Für die Validierung von zwei Small-Test Modulen in HTm.1.7 war die Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme eines Teststandes notwendig. Dazu wurden folgende Arbeiten durchgeführt und die Ergebnisse dokumentiert: Erstellung eines R&I-Fließschemas, Durchführung einer HAZOP und Komponentenauswahl, Spezifizierung der Leistungselektronik, Erstellung eines Wartungskonzeptes sowie 3D-Engineering und Electrical Engineering, Programmierung der Software sowie Erstellung von Zeichnungen, Schaltplänen und der technischen Dokumentation.
Mit der Beschaffung der Teststandkomponenten, dem Bau und der letztendlich finalen *Inbetriebnahme* konnte der *Teststand für die Validierung* in HTm.1.7 übergeben und Meilenstein *MS1.6.SF.1* erreicht werden.

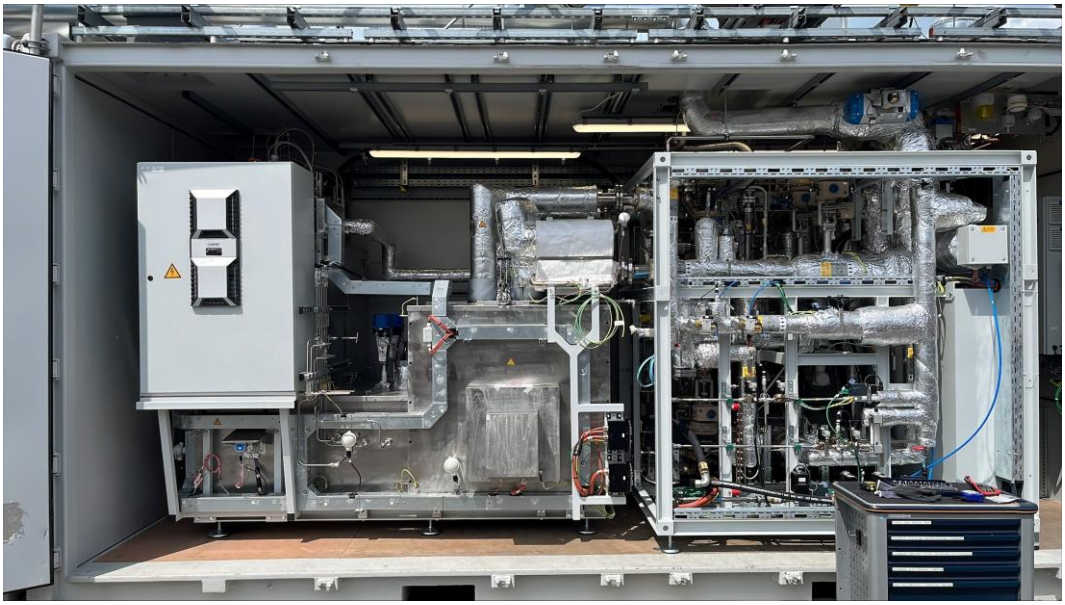

Abbildung 4: STM-Teststand mit bereits integriertem STM (© Sunfire SE).

Für das PoC-FSM wurde ein Heißbetrieb-Teststand intern aufgebaut und in Betrieb genommen (MS1.6.SF.2), um die Funktionalität der PoC-Hotbox unter realen Thermozyklen nachzuweisen. Nach *Aufbau dieses Heißbetrieb-Teststandes* bei Sunfire wurde dieser für die funktionale Verifikation des PoCs in HTm.1.8 übergeben.

Abbildung 5: Heißbetriebsteststand mit bereits installierte PoC-Hotbox auf Sunfires internen Testfeld (© Sunfire SE)

HTm.1.7: Entwicklung, Bau und Validierung der Small-Test-Module

Ziel des Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Small-Test-Moduls sowie der Bau und Validierung von zwei STMs als Versuchsträger zum Nachweis der Umsetzbarkeit neuer Technologieansätze sowie der Erreichung von festgelegten Zielparametern, wie Degradation.

Für das Small Test Module (STM) wurden Massen- und Energiebilanzen als Auslegungsgrundlage auf Basis stationärer Systemsimulationen erstellt. Außerdem wurde ein R&I-Fließschema des STM erstellt und durch eine HAZOP-Studie revisioniert. Eine Risikobeurteilung wurde durchgeführt und ein Sicherheitskonzept erstellt. Das Modul und seine Hauptkomponenten wurden dimensioniert die Komponenten des Moduls wurden ausgewählt sowie eine Detailkonstruktion durchgeführt (siehe Abbildung 6).

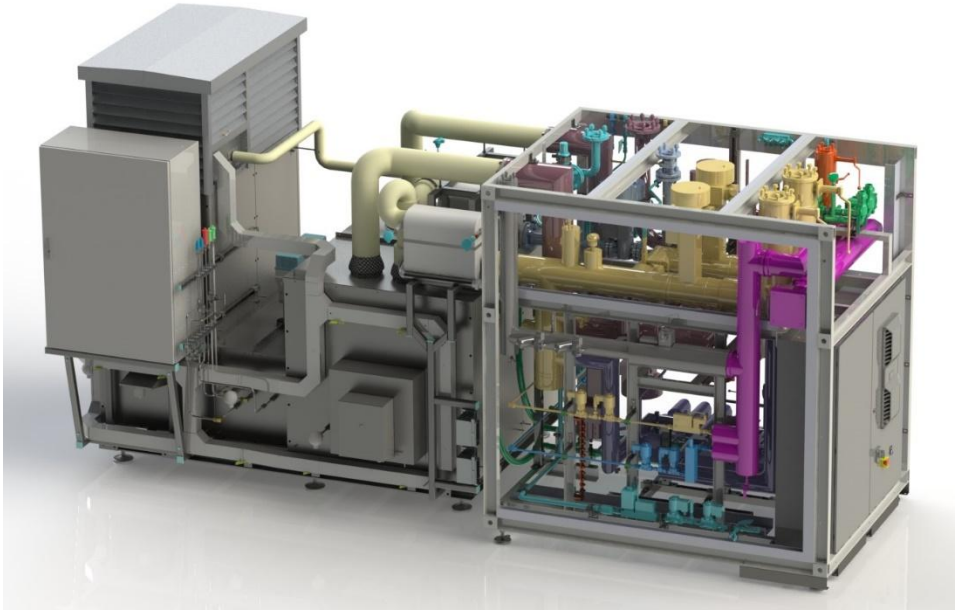

Abbildung 6: 3D-Modell des Small-Test-Modules bestehend, aus Stack Unit, Gas Processing Unit, Coldbox und Schaltschrank (© Sunfire SE)

Komplettiert wurde die Entwicklung durch eine Elektro- und Schaltschrankplanung und die Erstellung des Wartungskonzeptes sowie der technischen Dokumentation.
Auf Basis der oben genannten Arbeiten wurden die Zeichnungen und der Schaltplan entsprechend der Sunfire-internen Standards freigegeben, damit wurde der Meilenstein *MS.1.7.SF.1 - Zeichnungen freigegeben für das Small-Test-Modul* erfolgreich erreicht. In diesem Zusammenhang wurde gemeinsam mit dem Projektpartner SMA Solar Technology AG auf Basis der Small-Test-Module-Spezifika ein Gleichrichtersystem und die dazugehörige Betriebssteuerung spezifiziert. Die Funktionalität der durch SMA Solar Technology AG entwickelt und gebauten Gleichrichtereinheiten und die zugehörige Betriebssteuerung konnten im Labortest bei SMA Solar Technology AG nachgewiesen werden. *Vom STM* wurde in Sunfires Prototypenfertigung *zwei Exemplare gebaut* und *im dafür gebauten Teststand (vgl. HTm.1.7) integriert* und im Rahmen des Sunfire-eigenen Testfeldes getestet (Abbildung 7. *MS.1.7.SF.2 und 3*).

Abbildung 7: Hotbox und Coldbox des zweiten STM in Sunfire's Produktion (© Sunfire SE)

Für den Testbetrieb der STMs wurde ein umfangreicher Validierungsplan mit allen durchzuführenden Versuchen erstellt, durchgeführt und die Versuche ausgewertet. Dabei wurde insbesondere eine Optimierung der Druck-, Durchfluss-, und Heizerregelungen sowie der gesamten Betriebsführung durchgeführt. Insbesondere konnten ca. 3500 Betriebsstunden die für den Stack definierten Grenzwerte in Bezug auf Temperatur, Druck und Stromdichte erfolgreich angefahren werden. Auch die durch SMA Solar Technology AG entwickelte Leistungselektronik konnte bei Sunfire erfolgreich in Betrieb genommen und die Funktionsfähigkeit bei Volllastbetrieb des Small-Test-Module nachgewiesen werden.

HTm.1.8: Entwicklung, Bau und Validierung des Full-Scale-Moduls Gen3.0 (Proof-of-Concept)

Dieses Arbeitspaket widmete sich der Entwicklung, Bau und Validierung eines Proof-of-Concepts der neuesten Generation des Hochtemperaturelektrolyse Moduls zur funktionalen Verifikation der neuartigen Hotbox in einer Testumgebung.
Im Rahmen diese Arbeitspacktes wurde ein PoC-Module Gen3.0 (1,3 MW Modul, bestehend aus Coldbox, Hotbox, Module Control Cabinet und Leistungselektronik) entwickelt. Mit der Fertigstellung der Fertigungsunterlagen sowie der Übergabe der Dokumente an die Produktion und Beschaffung wurde der *MS.1.8.SF.1* erreicht. Die *PoC-Modulunits wurden gefertigt (MS.1.8.SF.2)* und die Hotbox mit 9 Stacks auf

Sunfires internem Testfeld installiert, um eine initiale Validierung durchzuführen. Ein verbessertes Wärmemanagement reduzierte den Dampfbedarf um ~10 %.

Im *Heißtest (MS.1.8.SF.3)* konnten während mehreren Thermozyklen die Betriebsmodi Heat-up, Cool-Down, Hot Idling und Cold Idling getestet werden. Auch eine ECDP (elektrochemische Dichtheitsprüfung) wurde durchgeführt. Der Test wurde voll automatisiert abgefahren und die Zieltemperaturen konnte mit allen Komponenten erreicht werden. Dabei wurden auch neu entwickelte Regelkonzepte für die Strahlungsheizer und die Gasvorheizer der Hotbox verifiziert und optimiert, so dass jeweils eine stabile Temperaturführung und eine minimale Regelabweichung erreicht wurde. Außerdem konnte die Design-Performance der Wärmeübertrager bestätigt werden. Durch thermografische Aufnahmen wurden außerdem die Wärmedämmung der Hotbox bewertet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Wärmeverluste sehr gut zur Auslegungrechnung passen und es keine Wärmebrücken gibt, die auf Konstruktionsfehler schließen lassen würden. Damit wurde das *Modul* für weitere Tests *freigegeben (MS.HTm.4)*.

Abbildung 8: 3D-Konstruktion des 1.3 MW PoC-Moduls zum Test einer einzelnen Hotbox (© Sunfire SE)

Für das Full-Scale-Module (10 MW Modul) wurde ein neues, vom Basic Engineering in HTm.1.4. abweichendes Modulkonzept entworfen, um die ambitionierten Kostenziele und Markanforderungen erreichen zu können. Auf Basis dieses neuen Konzeptes wurde ein Basic Engineering Package erfolgreich erstellt. Dieses enthält neben den Konzeptentwürfen entsprechende verfahrenstechnische Fließbilder, Massen- und Energiebilanzen sowie Sicherheitsanalysen. In das neue Modulkonzept wurde außerdem ein verbesserte Wärmemanagementsystem integriert, die es ermöglicht den Dampfbedarf des Moduls um ca. 10 % zu senken.

Zusätzlich wurde mit DNV ein Fire and Risk Assessment durchgeführt und Verbesserungspotentiale im Bereich der Branderkennung identifiziert. Gemeinsam mit dem Projektpartner SMA Solar Technology AG wurde auf Basis der Full-Scale-Module Spezifika ein Gleichrichtersystem und die dazugehörige Betriebssteuerung spezifiziert. Auf Basis der Anforderungen für eine Validierung wurde in

Zusammenarbeit mit SMA Solar Technology AG hinsichtlich Betriebsführung, Erdung des DC System und Fehlerbetrachtung ein Gleichrichterkonzept erarbeitet, welche die Möglichkeit der Einprägung von Erdpotential in Abhängigkeit der Einzelstack-Zustände ermöglicht.
Das neue Modullayout basiert auf 10 MW-Modulen, die eine Skalierung durch Multiplikation zu 100 MW-Systemen ermöglichen und damit der geänderten Kundennachfrage entsprechen, die eine schnelleres Scale-Up fordern.

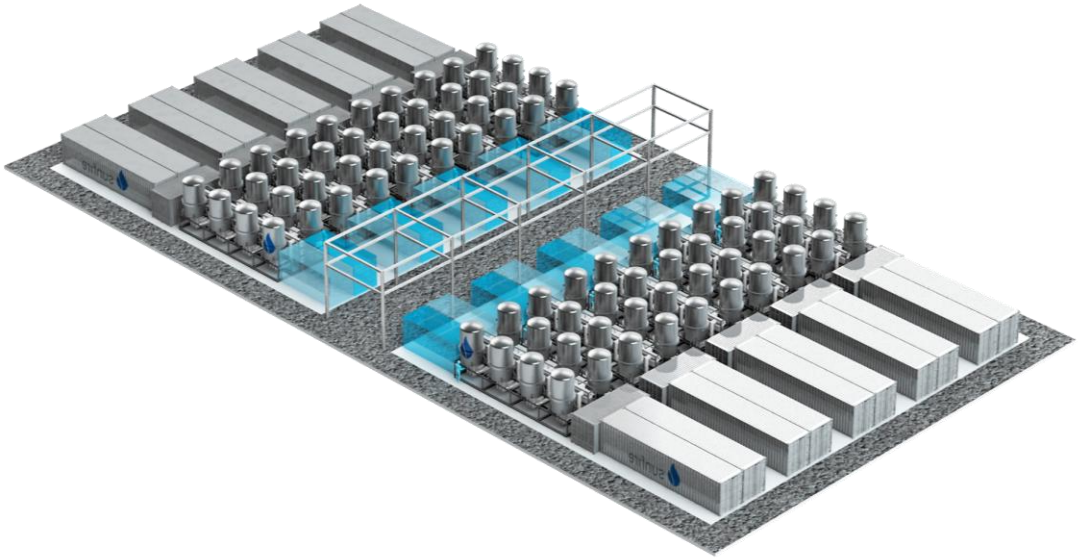

Abbildung 9: 100 MW-Systemkonzept bestehend aus 10 Modulen nach dem aktualisierten Modulkonzept (©Sunfire SE)

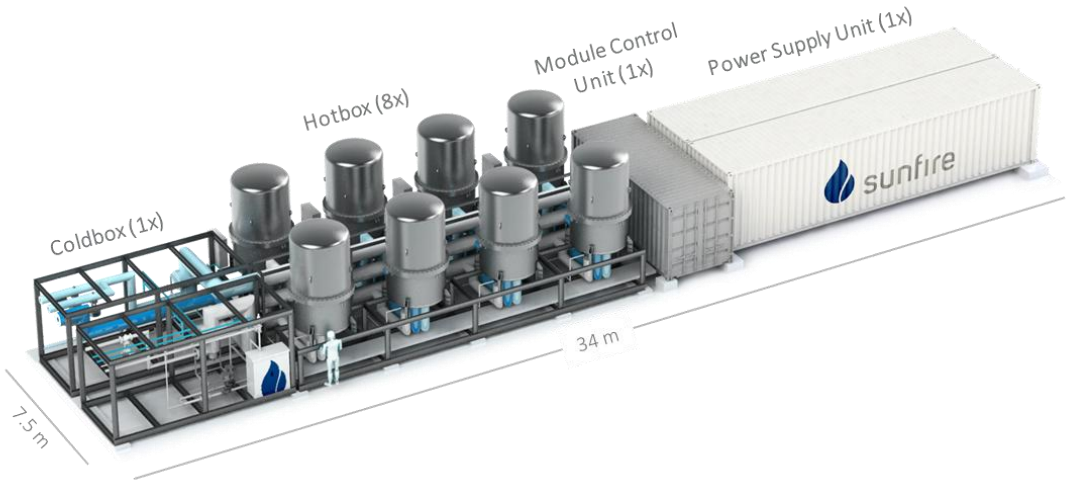

Abbildung 10: Modulkonzept mit acht Hotboxen und 10 MW Nennleistung (©Sunfire SE)

HTm.1.9: Optimierung des HTEL-Systems für eine zukünftige Serientauglichkeit (Gen3.1 - Prototyp)

Auf Basis des STM-Betriebs und der PoC-Modul-Fertigung sowie neuester Market Intelligence wurden Optimierungsmaßnahmen zur Kostensenkung abgeleitet.

Dazu zählen insbesondere die Optimierung der elektrischen Verschaltung der Stacks und Hotboxen im Modul zur Kostensenkung Leistungselektronik, aber auch die Optimierung des Feed-Conversion-Regelsystems mit Entfall diverser Sensoren und Aktoren. Zusätzlich wurde ein neues Wärmemanagementsystem integriert, das es ermöglicht das Modul zu vereinfachen und gleichzeitig den Wärmeverbrauch pro Nm3 Wasserstoff reduziert. Auch die Sicherheit des Moduls wurde weiter erhöht, indem entsprechend der Ergebnisse des Fire and Explosion Risk Assesments ein Brandmeldesystem im Modul integriert wurde.
Zusammen mit weiteren Learnings wurde so ein optimiertes Modulkonzept definiert und freigegeben und damit der *MS.1.9.SF.1* erreicht.

HTm.2.1: Entwicklung und Erprobung von Prozessabläufen für die Großserienfertigung von HTEL-Modulen

Ziel des Arbeitspaketes war die Entwicklung effizienter Montageabläufe für HTEL-MODULE der Generation 3 und deren effiziente Bestückung mit Stacks.
Zusammen mit dem Projektpartner XENON Automatisierungstechnik GmbH wurde die Fertigbarkeit sowie Produktionskonzepte für eine Volumenproduktion der Hotbox (Generation 3) im Vergleich zur Vorgängerversion der SOEC Gen 2 bewertet. In engmaschigen Reviews mit Entwicklung, Fertigung und Arbeitsvorbereitung wurde das in HTm.1.5 entwickelte Design der Hotbox mit dem Fokus auf DFMA (Design for Manufacturing & Assembly) überprüft DFMA-Workshops führten zu Vereinfachungen bei Schweißen, Elektromontage, Fertigungsprüfungen und Stackintegration.
Für das Fertigungskonzept wurden 7 Unterbaugruppen inkl. Einzelteile sowie Vormontagestrategien definiert sowie die Montagereihenfolge abgeleitet. Zusätzlich wurden als Voraussetzung für die Simulation der Serienfertigung unter HTm.2.2 die erforderlichen Arbeitsplätze und Vorrichtungen definiert. Damit konnte der Meilensteil *MS.2.1.SF.1 – Erfolgreicher Abschluss der Konzeptentwicklung zur Simulation einer großserientauglichen Modulmontage* erreicht werden.
Zusätzlich wurde eine Liste erforderlicher Qualitätssicherungsparameter der Hotboxmontage inkl. Prüfverfahren erstellt. Es wurden 29 Prüfaufgaben mit Umsetzungsmaßnahmen, QM Parameter, Mess-/Prüfmittel und Nacharbeit bei Nichterreichung definiert. Mit der erstmaligen *erfolgreichen Fertigung der Hotbox des PoCs* (*MS.HTm.5*) wurden die vorher definierten Fertigungsschritte und Qualitätssicherungsmaßnahmen verifiziert und Verbesserungsansätze dokumentiert.

HTm.2.2: Konzeptentwicklung einer vollautomatisierten 200MW Fabrik inklusive notwendiger Infrastruktur und CAPEX/OPEX Analysen sowie Optimierung

Das Arbeitspaket widmete sich der Konzeptentwicklung einer 200 MW Fabrik für die Modulproduktion unter Bewertung des Automatisierungsgrades.
Gemeinsam mit dem Projektpartner imk Industrial Intelligence GmbH wurden zwei Fertigungsszenarien (max. Eigenfertigung / max. Zukauf) entwickelt und 3D-simulationstechnisch bewertet. Szenario „maximaler Zukauf“ zeigte deutliche Kostenvorteile (*MS.2.2.SF.2 – Kostenanalyse abgeschlossen)*.
Entgegen der ursprünglichen Annahme zeigte sich zudem, dass eine vollautomatisierte Fertigung der Hotbox aufgrund von Fertigungstätigkeiten und Stückzahlen nicht ökonomisch sinnvoll ist. Die Serienfertigung der Module (exkl. Stacks) sollte zukünftig zu großen Teilen manuell erfolgen. Darüber hinaus zeigte sich ebenfalls, dass keine ökonomisch sinnvolle Teilautomatisierung bei Schweißbaugruppen identifiziert werden konnten.

Auf Basis der Simulationen von imk Industrial Intelligence GmbH wurde ein sk*alierungsfähiges Fertigungslayout für die Fertigung von Hotboxen* in Serie erstellt (*MS.2.2.SF.1*).

HTm.2.3: QM Systementwicklung zur Bewertung und Umsetzung von Prozess- und Messfähigkeit

Das Arbeitspaket HTm.2.3 widmete sich der Entwicklung und praxisgerechten Umsetzung eines Industrie-4.0-fähigen Konzepts zur Erfassung, Übertragung, Absicherung und Auswertung von Prozess- und Produktionsdaten. Zentrales Element des Ansatzes war eine skalierbare Cloud-Datenarchitektur als gemeinsame Datensenke, ergänzt durch definierte Standards für Datenqualität, Schnittstellenharmonisierung und IT-Sicherheit. Das Arbeitspaket wurde in enger Abstimmung mit Kontron AIS durchgeführt.

Eine validierte Datenqualität, sowie standardisierte Spezifikationen für Messgrößen, Metadaten und Schnittstellen ermöglichen standortübergreifende Prozessfähigkeitsanalysen. Ein Proof-of-Concept (PoC) *Datenkonzept zur Cloud-Architektur* wurde erfolgreich *umgesetzt (MS.2.3.SF.1)* und die ersten Teststände wurden erfolgreich angebunden. Zudem wurde ein Simulationsframework zur Vorvalidierung aufgebaut. Es erfolgte die Definition und Absicherung von externen Anforderungen zur Integrität und Vertraulichkeit der Messdaten als wichtiger Schritt für verteilte Szenarien (Kunden-/Partnerumgebungen, ausgelagerte Produktion). Darauf aufbauend lag der Schwerpunkt auf der Standardisierung und Harmonisierung. Die entwickelte Architektur bildet eine durchgängige Kette von der Datenerfassung bis zur Analyse, inkl. Rückverfolgbarkeit über alle Standorte hinweg.

HTm.2.4: Aufbau, Inbetriebnahme & Validierung einer initialen Prozesslinie für Serienproduktion

Ziel dieses Arbeitspaketes lag im Aufbau, Inbetriebnahme sowie Validierung der ersten initialen Prozesslinie der Hotbox des Hochtemperaturelektrolyse Moduls.

Auf Basis des definierten manuellen Fertigungsprozesses (HTm.2.2) wurden Produktionshilfsmittel und Vorrichtungen (Eigenbau/Zukauf) definiert, eine Equipmentliste bestehend aus 17 Einträgen erstellt und beschafft (*MS.2.4.SF.1 Lieferantenauswahl für Produktionsanlagen abgeschlossen*). Davon sind 30% Eigenfertigung und 70% Zukauf. Im Anschluss erfolgte die Einrichtung des Fertigungsbereiches, die Fertigung der Hotbox sowie Dokumentation von Verbesserungspotenzialen.

HTm.2.5: eines Multiplikationskonzeptes für eine weitere Vervielfachung des Fabrikkonzeptes

Basierend auf der Test-Prozesskette wurde in diesem Arbeitspaket die erste Hotbox-Montage aus der initialen Prozesslinie (vgl. HTm.2.4) ausgewertet um Verbesserungspotenziale für die Serie aufzuzeigen und Konzepte für eine weitere Skalierung zu entwerfen.

Die Erstmontage der Hotbox zeigte keine kritischen Auffälligkeiten. Nichts destotrotz war es erforderlich komplexe Schweißbauteile bei Schweißverbindungen unterschiedlichen Materials mehrfach nachzuarbeiten um die dauerhafte Festigkeit zu sichern. Durch eine angepasste Vorfertigung verkürzt sich die Endmontage in der Serie.

Lernerfahrungen bei der Handhabung der deutlich größeren Unterbaugruppen, wie bspw. thermische Dämmung, Dichtungselemente, oder Drückbehälterhaube bilden wichtige Erkenntnisse für Folgefertigungen.

Die anvisierte zukünftige Produktionsskalierung erfolgt stufenweise. Basierend auf der im Rahmen des Vorhabens errichteten Pilotlinie wird die Fertigungslinie schrittweise hochskaliert. Auf einer Kleinserienfertigung im zweistelligen MW-Bereich sollen die ersten Kundenprojekte umgesetzt werden. Das Layoutkonzept der Kleinserienfertigung orientiert sich hier an den in HTm.2.2 gewonnenen Erkenntnisse (Layoutkonzept für eine 200 MW Fertigung/Jahr durch imk).
Für eine weitere Skalierung auf > 400 MW/Jahr werden die Zwischenlagerplätze sowie Vor- und Endmontageplätze entsprechend des imk-Layouts vervielfacht. Das Hauptlager bleibt zentral und wird entsprechend des Fertigungsvolumens erweitert. Die gewählte Fertigungstiefe, maximaler Zukauf wird zunächst bestehen bleiben, allerdings werden die Make-or-Buy Entscheidungen für einzelne Komponenten entsprechend der vorliegenden Lieferangebote und Kostenreview regelmäßig überprüft. Damit wurde der Meilenstein *MS.2.5.SF.1 Multiplikationskonzept* erreicht.

HTm.3.1: Administrative und technische Gesamtkoordination

Die Gesamtkoordination der technischen, wissenschaftlichen und organisatorischen Projektaktivitäten zwischen den Partnern des Verbundvorhabens oblag Sunfire. Halbjährlich stattfindende Projekttreffen zwischen den Partnern ermöglichten die Präsentation der Zwischenergebnisse jedes Partners und Formulierungen der nächsten Schritte. Diese Meetings sowie weitere regelmäßige bilaterale Meetings zwischen den Partnern dienten der Sicherstellung von qualitativ hochwertigen Arbeitsergebnissen, der Festlegung weiterer Arbeitsschritte, der frühzeitigen Identifikation und proaktiven Minderung von Risiken und Verzögerungen in den involvierten Arbeitspaketen sowie der fortlaufenden Überwachung der verschiedenen Forschungsfragen inklusive der engen Zusammenarbeit mit den Partnern zur Sicherstellung des erfolgreichen Abschlusses der Arbeiten und Meilensteine.
Weiterhin fungierte Sunfire als administrative Schnittstelle zwischen der Technologieplattform H2Giga und den Partnern des Verbundes zur Gewährleistung einer aktiven Zusammenarbeit über den Verbund hinaus. Um die Ergebnisse einem breiten Publikum zur Verfügung zu stellen, präsentierte Sunfire Highlights des Verbundes auf den alljährlichen H2Giga Statuskonferenzen und unterstützte bei Bedarf die Projektpartner bei der Veröffentlichung ihrer Projektergebnisse auf beispielsweise Konferenzen und Journals. Die Planung und Realisierung eines anschaulichen 3D SOEC Moduls des 10 MW Full-Scale Moduls ergänzte die Ergebnispräsentation auf der H2Giga-Abschlusskonferenz und dient heute als geeignetes Schulungs- und Demonstrationsobjekt für Messen und weiteren Konferenzen.
Teilnahmen am H2Giga Lenkungskreis, H2Giga Statuskonferenzen, sowie Teilnahmen an Meetings auf der Technologieplattform (u.a. QT2.1 Degrad-EL3, QT3.1 ReNaRe, QT6.2 Fluid Condition Monitoring) dienten der Vernetzung und dem Austausch zwischen den Verbunden innerhalb der Technologieplattform H2Giga.

Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Kostentreiber des Teilvorhabens lag bei den Personalausgaben. Für die Realisierung der definierten Teilaufgaben war ein interdisziplinäres Team mit themenspezifischer Fachexpertise aus Entwicklung, Produktmanagement, Fertigung, Qualitätsmanagement, Testing, Projektmanagement etc. erforderlich. Der zweitgrößte Kostentreiber des Teilvorhabens waren die Materialausgaben. Diese liegen im Wesentlichen begründet im Bau von zwei Small-Test Modulen (inkl. Stacks) sowie einer Hotbox des Full-Scale Moduls (inkl. Stacks) sowie weiteren Test- und Hilfsmitteln.

Reiseaufwendungen zu beispielsweise Lieferanten, Testanlagen sowie zu den H2Giga Konferenzen, Patentkosten, für die im Vorhaben generierten Erkenntnisse, die Anschaffung von Fertigungsequipment sowie kleinere sonstige Dienstleistungen (z.B. Sicherheitsstudie, Schweißanalysen- und Arbeiten, Lizenzen etc) komplettierten die Ausgaben.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die für dieses Teilvorhaben geplanten Aufgaben mit dem Ziel einer erfolgreichen Entwicklung eines großserientauglichen SOEC-Moduls sowie zugehörigen Fertigungskonzepte für eine zukünftige Produktionshochskalierung in den dreistelligen MW-Bereich waren nur durch ein erfahrenes, hochqualifiziertes Team an Ingenieuren und Technikern und die fachliche Expertise des Verbundes bei gleichzeitig sehr hohen Aufwendungen in Personal und Material umsetzbar. Zudem beinhalteten die wesentlichen FuE-Schritte weder bei Sunfire noch bei Wettbewerbern bisher bekannte durchgeführte Entwicklungen, die naturgemäß hohen technischen Risiken unterliegen. Ohne eine Förderung des Projektes durch das BMFTR wäre eine Durchführung der Arbeiten im Verbund sowie des Teilvorhabens nicht möglich gewesen. Mit den zur Verfügung gestellten Fördermitteln wurde bedacht und sparsam umgegangen.

Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der konkrete wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertungsplan kann dem Erfolgskontrollbericht entnommen werden.

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

Die Technologie der SOEC ist weltweit noch nicht in industriellem Umfang als Stand der Technik in der Praxis etabliert, wie bspw. die PEM und die AEL. Lediglich erste Prototyp- und Demonstrationsprojekte sind geplant oder realisiert.

Durch das Leitprojekt H2Giga konnten zahlreiche nationale Akteure im Wasserstoffsektor einen deutlichen Entwicklungsschub erzielen. Im Bereich der Hochtemperaturelektrolyse zählt Sunfire zu den führenden deutschen Unternehmen. In der Vergangenheit konnte Sunfire wichtige Demonstrationsprojekte umsetzen. Im Rahmen des Projekts GrInHy2.0 (Start 2019) lieferte Sunfire das weltweit größte SOEC-System an die Salzgitter Flachstahl GmbH. Die Funktionalität von 0,7 MW konnte hier zum ersten Mal in einer industriellen Stahlerzeugungsumgebung mit einer validierten Systemlaufzeit von zwei Jahren unter Beweis gestellt werden. Im Jahr 2022 konnte das System den SOEC-Weltrekord einer Wasserstoffproduktion von 200 Nm³/h bei einem Wirkungsgrad von 84 % nachweisen.[1] Dieses Projekt ist der Grundstein für die Demonstration einer 2,6-MW-SOEC-Anlage im Rahmen des Projekts

[1] Pressemitteilung von Sunfire, 19.04.2022; Weltweit größter Hochtemperatur-Elektrolyseur erzielt RekordWirkungsgrad - Sunfire (Sunfire Webseite: https://www.sunfire.de/de/news/detail/weltweit-groessterhochtemperatur-elektrolyseurerzieltrekord-wirkungsgrad)

MultiPLHY, die in der Rotterdamer Bioraffinerie von NESTE installiert wurde (Projektstart 2020). Darüber hinaus betrachtet gehören u.a. Bloom Energy und Topsoe zu internationalen Elektrolyseurherstellern mit geplanten Produktionskapazitäten von 500 MW[2]

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

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren
07.09.2022	Konferenz	H2Giga-Konferenz, Vortrag_ HTEL-Stacks und HTEL-MODULE – Ready for Gigawatt	Giacomo Kolks
20.09.2023	Konferenz	H2Giga-Konferenz, Vortrag_ HTEL-Stacks und HTEL-MODULE – Ready for Gigawatt	Sylvia Odoj
17.09.2024	Konferenz	H2Giga Konferenz; Vortrag: HTEL-Stacks und HTEL-Module – Ready for Gigawatt	Sylvia Odoj
02.07.2025	Konferenz	H2Giga – Abschlusskonferenz; Vortrag: Entwicklung und Hochskalierung von SOEC-Elektrolyseuren für den Gigawatt-Maßstab	Sylvia Odoj
k.A.	Broschüre	H2Giga Projektbroschüre; Das Wasserstoff Leitprojekt H2Giga Wasserelektrolyse für Grünen - Wasserstoff im Gigawatt-Maßstab, Beitrag zum Projekt HTEL-MODULE	Bettina Stark-Watzinger
k.A.(Q1 2026)	Broschüre	H2GIga Ergebnisbroschüre, Beitrag zum Projekt HTEL-MODULE	k.A.

Der breiten Öffentlichkeit stehen die technischen Basisinformationen zur großskaligen SOEC-Technologie auf der Webseite zur Verfügung. Gleichzeitig wurde das großskalige 10 MW Modul (vgl. HTm.1.8) in den vergangenen Jahren in Form eines 3D Messemodels auf diversen Messen einem interessierten Fachpublikum präsentiert (bspw. 2024: World Hydrogen Congress Rotterdam, DBI Fachforum H2 Technologien, Hydrogen Tech Expo Hamburg, European Hydrogen Week; 2025: Hydrogen Summit & Expo Tampere, Hannovermesse Deutscher Wasserstoffverband, World Hydrogen Congress, VDI-VDE Fachausschuss, H2Giga Abschlusskonferenz). Durch die Anmeldung von dato 29 Patenten (exkl. Nachanmeldungen) werden die gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse zu schützen.

[2] Pressemitteilung von Topsoe, 30.10.2025, Topsoe inaugurates Europe's largest SOEC manufacturing facility - Topsoe inaugurates Europe's largest SOEC manufacturing facility