

Publizierbarer Endbericht

Gilt für das Programm „Muster- und Leuchtturmprojekte Photovoltaik“

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Projekttitel:	PH ₂ ÖNIX – Photovoltaikanlage mit direkt gekoppelter, elektrolytischer Wasserstoffproduktion zur Energiespeicherung und Rückverstromung mittels Brennstoffzellensystem
Programm:	Muster- und Leuchtturmprojekte Photovoltaik
Projektdauer:	01.02.2022 bis 30.06.2024
KoordinatorIn/ ProjekteintreicherIn	AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Kontaktperson Name:	Philipp Mayer-Ullmann, M.Sc.
Kontaktperson Adresse:	Giefinggasse 4, 1210 Wien
Kontaktperson Telefon:	+43 664 88390717
Kontaktperson E-Mail:	Philipp.mayer-ullmann@ait.ac.at
Projekt- und Kooperationspartner (inkl. Bundesland):	keine
Adresse:	An der Bundesstraße 60, 2444 Seibersdorf
Projektwebseite:	www.ait.ac.at/themen/hybrid-power-plants/projekte/ph2oenix-pv-anlage-mit-wasserelektrolyse
Schlagwörter:	Photovoltaik, Wasserstoff, Elektrolyse, Sektorkopplung, Degradation, Effizienz
Projektgesamtkosten:	871.500 €
Fördersumme:	106.700 €
Leistung:	401,85 kW _p
Klimafonds-Nr.:	C198014
Erstellt am:	20.09.2024

B) Projektübersicht

1 Kurzzusammenfassung

Das Projekt PH₂ÖNIX entwickelt eine innovative Photovoltaikanlage, die direkt mit einem Wasserstoff-Elektrolysesystem gekoppelt ist. Ziel ist die Speicherung von überschüssiger Solarenergie in Form von grünem Wasserstoff, der bei Bedarf in einer Brennstoffzelle rückverstromt werden kann. Dieses "Power-to-Power"-System (P2P) soll unabhängig vom Stromnetz betrieben werden und so die Sektorkopplung und Flexibilität in der Energieversorgung vorantreiben.

Das System besteht aus einer PV-Anlage mit 402 kW_p, von der 63 kW_p direkt für die Wasserstoffproduktion in zwei Elektrolyseuren à 10 kW genutzt werden. Es integriert modernste Photovoltaik und Wasserstofftechnologien. Ein zentraler Aspekt ist die Untersuchung der Effizienz, des Alterungsverhaltens und der Kompatibilität der Systemkomponenten.

Das Projekt dient als Modell für die dezentrale und nachhaltige Energieerzeugung und -speicherung. Es bietet Antworten auf zentrale Herausforderungen der Energiewende, wie die Integration volatiler erneuerbarer Energien in das Energiesystem zur Erhöhung der Versorgungssicherheit. Der innovative Ansatz einer direkten, netzfernen Kopplung hebt PH₂ÖNIX von bisherigen Ansätzen ab, die meist auf netzgebundene Systeme setzen. Als Leuchtturmprojekt zeigt PH₂ÖNIX die technische und wirtschaftliche Machbarkeit solcher Systeme und trägt zur Weiterentwicklung der europäischen Wasserstofftechnologie bei.

- Direkte Kopplung: Die PV-Anlage speist direkt die Wasserstoff-Elektrolyse, ohne Netzanschluss.
- Technologievielfalt: Nutzung von zwei unterschiedlichen Elektrolyse-Technologien (PEM, AEM) und einer Brennstoffzelle.
- Pionierarbeit: Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Systemkopplung und Optimierung von Effizienz und Degradation.
- Feldtestlabor: Der Demonstrator ist in einem Container integriert und wird umfangreich überwacht.
- Replikationspotenzial: Die Ergebnisse sollen in zukünftigen industriellen Anwendungen eingesetzt werden.

Das Projekt PH₂ÖNIX positioniert sich als wegweisendes Beispiel für nachhaltige Energiesysteme, die eine tragende Rolle in der Dekarbonisierung spielen können.

2 Hintergrund und Zielsetzung

Ausgangslage

Für das Ziel einer klimaneutralen Energieversorgung sind noch viele Herausforderungen zu meistern. Es braucht den massiven Ausbau von Solar- oder Windenergie sowie die weitere Technologieentwicklung in Bezug auf Leistung, Zuverlässigkeit und Flexibilität. Darüber hinaus sind saubere, praxiserprobte Lösungen für die Sektorkopplung gefragt. Hier kann Wasserstoff (H_2) als zentrale Brücke zwischen der volatilen Energie aus Sonne oder Wind und dem noch immer dominanten kohlenwasserstoffbasierten Energiesystem fungieren.

Die Produktion von grünem erneuerbarem Wasserstoff ist ein wichtiger Teil der österreichischen Klimapolitik. Der Einsatz von grünem Wasserstoff als Ersatz für fossile Energieträger ist unter anderem für industrielle Prozesse aufgrund ihres hohen Energiebedarfs von großer Bedeutung. Für Industriebetriebe besteht meist die Notwendigkeit, Strom und Wasserstoff am Standort bereitzustellen. Das Forschungsprojekt PH₂ÖNIX untersuchte daher den Einsatz von Photovoltaik und Wasserstoffherzeugung mit realen Komponenten für Industriestandorte.

Aufgabenstellung

PH₂ÖNIX untersucht Systemszenarien für direkte, netzferne Kopplung von PV-Systemen mit Wasserelektrolyseuren. Das Projekt zielt darauf ab, ein photovoltaisches Erzeugungssystem in ein wasserstoffbasiertes Energiesystem zu integrieren. Im Gegensatz zu herkömmlichen Konzepten, bei denen der Elektrolyseur zur Erhöhung seiner Volllaststunden an das Stromnetz angeschlossen wird, bezieht der PH₂ÖNIX „P2P H₂-Demonstrator“ seinen Strom für die Wasserstoffproduktion daher ausschließlich aus einer PV-Anlage. Ein Teil der erzeugten Energie wird als Wasserstoff gespeichert und in Zeiten ohne PV-Erzeugung effizient und bedarfsgerecht für die Stromversorgung genutzt.

Das Projekt besteht aus zwei Teilen: dem Investitionsprojekt und der Begleitforschung. Im vorliegenden ersten Teil wird auf die Anschaffung der Komponenten und der Errichtung der PV-Anlage und des H₂-Demonstrators eingegangen.

Zielsetzung

Der Mehrgewinn dieses Projekts liegt in der Verbesserung von PV-Nutzungspotenzialen durch Energiespeicherung mit Wasserstoff. Dadurch kann PV-Strom auch zu Zeiten mit wenig Sonneneinstrahlung genutzt werden. Das Projekt PH₂ÖNIX zeigt somit, wie mit erneuerbaren Energien und innovativen Technologien die Energieversorgung auch in Zukunft nachhaltig und zuverlässig sichergestellt werden kann.

3 Projekthinhalt

Elektrolyseure werden im Idealfall rund um die Uhr mit Netzstrom betrieben. Es können jedoch Szenarien auftreten, in denen eine Vor-Ort-Wasserstoffproduktion mit Netzanschluss nicht möglich oder erwünscht ist, wie z. B. in netzfernen Gebieten, bei zukünftigen Wasserstoff-Versorgungsengpässen oder bei schwacher Netzinfrastuktur.

Das Projekt PH₂ÖNIX untersucht diese weniger erforschten Systemszenarien und konzentriert sich dabei auf die direkte netzunabhängige Kopplung von PV-Anlagen mit Wasserelektrolyseuren. Ziel des gegenständlichen Projektvorhabens ist es, eine Photovoltaikanlage in ein wasserstoffbasiertes Energiesystem herstellerunabhängig zu integrieren und alle Schnittstellen im Detail zu untersuchen. Dies unterscheidet sich grundlegend von früheren Ansätzen, die nur einzelne Komponenten wie Photovoltaik, Elektrolyse, Brennstoffzellen oder Speicher betrachteten und nicht das dynamische Verhalten des Gesamtsystems. Die Elektrolyse wird nicht netzgekoppelt betrieben, sondern rein an die Photovoltaik gekoppelt, um Erfahrungen mit dem Kopplungsverhalten der beiden Teilsysteme zu sammeln.

Im Rahmen des Projekts werden verschiedene PV-Technologien und -Topologien sowie verschiedene Wasserstofferzeugungstechnologien durch präzise Messungen hinsichtlich ihres Verhaltens untersucht. Zu den wichtigsten Forschungsfragen gehören:

- Anfängliches Alterungsverhalten von modernen PV-Modultechnologien
- Ertragseignung (d. h. Produktionsprofil) verschiedener PV-Systemtopologien für Wasserstoffanwendungen
- Eigenverbrauchsrate im realen Betrieb
- Auswirkungen der direkten Systemkopplung (ohne netzgespeiste Elektrolyse) auf die Wasserstoffproduktion
- Gesamtwirkungsgrad und Teillastfähigkeit
- Systemkompatibilität von Photovoltaik-Technologien
- Systemkonfigurationen und Elektrolyse-Technologien

Im Rahmen eines neuen Feldtestlabors und Forschungs- und Entwicklungsumgebung für Wasserstofftechnologien und hybride Kraftwerke, dem AIT H₂LAB, wurde nun am AIT Forschungscampus in Seibersdorf eine Demonstrationsanlage errichtet: Der „P2P H₂-Demonstrator“.

Im PH₂ÖNIX-Projekt untersucht dieser H₂-Demonstrator das Betriebsverhalten zweier Elektrolyse-Technologien unter einem dynamischen Lastprofil, das insbesondere durch die volatile Stromerzeugung der Photovoltaik gegeben ist. Der entstehende Wasserstoff wird zwischengespeichert und zeitversetzt mit Hilfe einer Brennstoffzelle wieder rückverstromt. Der Umwandlungskreis vom Strom über

Wasserstoff und zurück zu Strom, bzw. Strom zu Strom, wird geschlossen (engl. power-to-power, P2P).

Im Projekt werden verschiedene Forschungsfragen bearbeitet, welche mehrere Komponenten der Kopplung von PV-Systemen und H₂-Elektrolysesystemen untersuchen. Dazu zählen unter anderem das Alterungsverhalten moderner PV-Modultechnologien, die Ertragseignung unterschiedlicher PV-Anlagevarianten für H₂-Anwendungen, die Eigenverbrauchsanteile im Realbetrieb sowie der Einfluss direkter Systemkopplung auf die H₂-Erzeugung.

Die Forschungsfragen in diesem Projekt werden durch eine detaillierte Vorprüfung der Komponenten und eine genaue Anlagenüberwachung beantwortet. Das Überwachungskonzept umfasst die Standard-Anlagenüberwachung (z. B. Wechselrichter- und Betriebsüberwachung) sowie hochwertige kalibrierte und rückverfolgbare Messungen im Labor, um die Forschungsziele in Bezug auf die Effizienzanalyse und die Alterungsanalyse zu erreichen.

Die umfassenden Überwachungsstrategien im Projekt umfassen eine Reihe von strengen Qualitätsprüfungen und detaillierten Analysen, um die Zuverlässigkeit und Leistung sowohl der PV-Module als auch der Wasserstofferzeugungseinheiten zu verfolgen:

- a) Qualitätsprüfung der PV-Module vor der Installation der PV-Anlage:
 - Leistungsmessung im PV-Labor des AIT und Elektrolumineszenz-Messungen an ausgewählten PV-Modulen (neue Produkte)
 - Mechanischer Belastungstest an einem PV-Modul
- b) Qualitätsprüfung der PV-Module nach der Installation der PV-Anlage:
 - Sichtprüfung der PV-Module, der Verkabelung, des Montagesystems usw.
 - Leistungsmessung (Messung der Strom-Spannungs-Kurve) und (nächtliche) Elektrolumineszenz-Messungen vor Ort an montierten Modulgruppen
- c) Qualitätskontrolle der Wasserstofferzeugungseinheiten nach der Installation:
 - Messung des Spitzenstromverbrauchs und der Menge der H₂-Produktion
 - Messung des leistungsabhängigen Umwandlungswirkungsgrades
 - Analyse der anfänglichen H₂-Produktgasqualität
- d) Überwachung und Datenanalyse der PV-Betriebsdaten:
 - Auslesen, Verarbeiten und Bereinigen der Überwachungsdaten
 - Analyse der Betriebsdaten und Auswertung der Ergebnisse: Identifizierung von Fehlern, Defekten, Degradation und Betriebsereignissen
 - Analyse der Ertragsprofile der PV-Anlagen hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte H₂-Technologien

e) Erste Degradationsanalyse von PV-Modulen:

- Hochauflösende Messung und Datenvergleich der Werte vor der Installation und nach der Installation nach 6 Monaten und 12 Monaten
- Synchronisierung der lokalen Wetterdaten mit den Überwachungsdaten
- Erstellung eines digitalen Zwillings der PV-Anlage auf der Grundlage der Daten der ersten Monate, um eine Bewertung der Anlage zu ermöglichen
- Analyse des Beginns der Degradation durch Vergleich der Überwachungsdaten und der Ergebnisse des digitalen Zwillings
- Aufzeichnung von Einzelereignissen, die zu Ertragsminderungen im Anlagenbetrieb führen
- Bewertung von 10 ausgewählten Modulen aus den besten und schlechtesten Strängen durch Dunkelstrom-Spannungsmessungen und Labormessungen

f) Funktionsanalyse der gekoppelten Wasserstofferzeugung:

- Analyse der Wasserstoffausbeute in Abhängigkeit von der PV-Erzeugung
- Analyse des Umwandlungswirkungsgrades in Abhängigkeit vom Lastpunkt (z. B. Teillast erzwungen durch Minderertrag der PV-Anlage)
- Statistische Auswertung von Betriebszuständen in Korrelation mit dem Zustand der PV-Anlage
- Untersuchung der Abhängigkeit der H₂-Produktion und des Wirkungsgrades von verschiedenen PV-Anlagendimensionen (z. B. Reduktion der angeschlossenen Anzahl an Strings im Netz)
- Analyse der Effizienzverluste bei der Speicherung und Rückwandlung durch Energiebilanzen
- Kontinuierliche Online-Überwachung der Gasqualität während des Betriebs
- Regelmäßige eingehende Analyse der H₂-Reinheit im AIT-Labor
- Vergleich der eingesetzten H₂-Elektrolyse-Technologien (PEM, AEM)

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Status

PH₂ÖNIX untersucht die Auswirkungen der direkten Kopplung von PV-Anlagen und Wasserelektrolyse-Systemen verschiedener Technologien. Durch die Beantwortung damit zusammenhängender aktueller Forschungsfragen, wie z. B. die Ertragstauglichkeit von PV-Systemen für Wasserstoffanwendungen, reale Eigenverbrauchsdaten oder die Gesamtsystemeffizienz, wird PH₂ÖNIX einen wertvollen Beitrag zur europäischen Wasserstoffforschung, -entwicklung und -innovation leisten. Eine finale Schlussfolgerung aus dem Projekt wird im Abschlussbericht nach der Monitoringphase der Begleitforschung im zweiten Projektteil gegeben werden.

Schlussfolgerungen aus der Errichtung

Das vorliegende Investitionsprojekt konnte nur mit Verzögerung erfolgreich abgeschlossen werden. Zu Beginn des Projekts im Jahr 2022 waren die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie noch spürbar. Einige Lieferketten, insbesondere elektronischer Bauteile aus Fernost, waren noch gestört. Dazu kam direkt nach Projektstart der Überfall der russischen Armee auf die Ukraine, was einen starken Anstieg relevanter Rohstoffpreise in ganz Europa auslöste. Insbesondere der Anstieg der Preise für Erdöl und Erdgas sowie für in Russland produzierte Industriemetalle wie Nickel und Aluminium setzte eine Preisspirale in Gang, die sich zuerst immens auf die Energiepreise und in der direkten Folge auch auf die Anschaffungskosten für technische Produkte auswirkte. Die Inflationsrate der Eurozone betrug im Jahr 2022 8,4 %, in Österreich sogar 8,6 %.

Aufgrund dieser globalen Ereignisse wurde um eine zeitliche Anpassung des Projektplanes angesucht. Die Photovoltaikanlage wurde gemäß dem neuen Projektplan noch im Jahr 2023 installiert. Die Integration des P2P H₂-Demonstrators in das neu zu errichtende AIT H₂LAB konnte jedoch nicht erfolgen. Daher wurde er in eine von der Laborinfrastruktur unabhängige Containerlösung umkonzipiert und so umgesetzt. Dementsprechend waren einige Mehrarbeiten für die Bereitstellung der eigenen Infrastruktur nötig: Eigene Strom- und Wasserversorgung, eigene IT-Infrastruktur und insbesondere eigene Steuerung des H₂-Demonstrators im Container und der Kopplung an die PV-Anlage.

Zu einer weiteren Verzögerung des Projekts kam es bei der Inbetriebnahme der PV-Anlage. Es war trotz zahlreicher Anläufe nicht gelungen mit der EVN einen Abnahme- und Freischaltetermin zeitnah zur Fertigstellung Ende 2023 zu erreichen. Schlussendlich ging die PV-Anlage mit dem Beginn der Monitoringphase Anfang Juni 2024 ans Netz. Die Voraussetzungen für die Produktion von grünem Wasserstoff am Campus Seibersdorf sind also mit Abschluss des Investitionsprojekt gegeben.

Schlussfolgerungen aus dem Betrieb

Um den Markteintritt innovativer Wasserstoffanwendungen zu beschleunigen, besteht ein wesentlicher Aspekt der Bewertung der PH₂ÖNIX-Demonstrationsanlage darin, die Erkenntnisse in replizierbare Anwendungsfälle zu übertragen, die sich aus der direkten Kopplung von Photovoltaik und Elektrolyse ergeben. Im Rahmen des Projekts werden verschiedene PV-H₂-Anwendungsszenarien auf Basis von Systemkombinationen und Monitoring bewertet. Es werden Anwendungsfälle für Industriestandorte erstellt und hinsichtlich der technischen Voraussetzungen und Wirtschaftlichkeitsschwellen bewertet. Durch die Errichtungsverzögerung werden ein Großteil der wissenschaftlichen Schlussfolgerungen erst nach Erreichen einer gewissen Datenmenge der Betriebsdaten am Ende der Monitoringphase erfolgen.

Im Zuge der Laufzeit folgen technische Analysen und darauf aufbauend Schlussfolgerungen zu:

- Dimensionierungsfaktoren von PV-Systemen,
- Gekoppelte H₂-Produktion in Abhängigkeit von PV-Erzeugung
- Funktion der Speicherung und Rückwandlungseinheiten
- Anteil der erhöhten Eigenverbrauchsrate von PV-Strom
- Deckungsgrade und Speicheranforderungen (z. B. Spitzenlastverschiebung)

Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und öffentlich zugänglich gemacht, z. B. in Form eines White Papers über direkt gekoppelte PV-H₂-Systeme oder in Form von Handlungsempfehlungen.

Empfehlungen

Empfehlungen können auch hinsichtlich des Aufbaus gekoppelter Energiesysteme mit PV- und H₂-Systemteilen gegeben werden. Insbesondere sind folgende Abstimmung hinsichtlich Errichtung zu beachten:

- Exakte Auslegungsgrößen für späteren optimierten Betrieb
- Zulassungsanforderungen der Errichtung durch hohe Spannungen, Ströme und brennbare Gase
- Beachtung der Technologieentwicklung zwischen Planungs- und Ausführungsphase
- Abstimmung der Komponenten (Teilsysteme) nicht nur hinsichtlich nominaler Werte, aber auch hinsichtlich Kommunikation, Arbeitsbereiche und Regelung
- Abstimmung von Gewerken in der Frühplanungsphase gewinnt mit Systemkomplexität zunehmend an Bedeutung und muss zeitlich und organisatorisch eingeplant werden.

- Etwaige Modellierung als Unterstützung der Planung zeigt ebenfalls steigende Komplexität und würde im Idealfall Methoden wie z. B. modellbasiertes Systemengineering benötigen.

Werden Themen wie die genannten berücksichtigt können optimierte Systeme in multiplizierbarer Weise zuverlässig errichtet werden.

C) Projektdetails

5 Technische Details des Projektes

Strom einer nahegelegenen PV-Dachanlage versorgt zwei Elektrolyseure gleicher Leistungsgröße. Jeder Elektrolyseur hat eine elektrische Leistung von **10 kW**. Zwei verschiedene Elektrolysetechnologien werden untersucht: Die PEM- und die neuere AEM-Technologie (Protonenaustauschmembran, engl. proton-exchange membrane, bzw. Anionenaustauschmembran, engl. anion-exchange membrane). Die PEM-Technologie ist für ihre Lastflexibilität bekannt und daher in der Lage, sich schnell an die schwankende Strombereitstellung durch die PV-Anlage anzupassen. Die AEM-Technologie hingegen beansprucht, in Bezug auf die schnelle Reaktion auf Laständerungen genauso gut zu sein wie die PEM-Technologie, jedoch zu geringeren Systemkosten, da weniger Edelmetalle benötigt werden. Abbildung 1 zeigt ein Diagramm des Prozesses, der im H₂-Demonstrator untersucht wird.

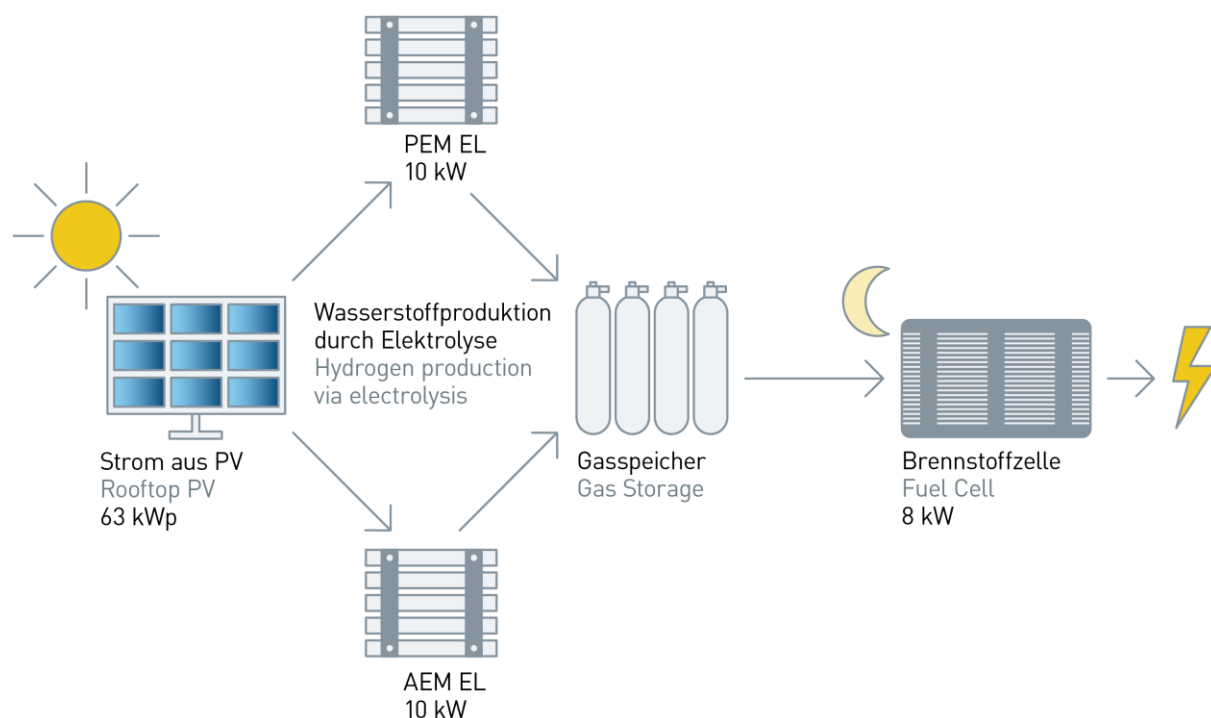


Abbildung 1: Schaubild des P2P H₂-Demonstrator-Prozesses.

Der tagsüber produzierte Wasserstoff wird in Gasflaschen beim Ausgangsdruck der Elektrolyseure von **30 bar** gespeichert. In der Nacht oder am späten Nachmittag nutzt eine PEM-Brennstoffzelle mit **8 kW** elektrischer Leistung den gespeicherten Wasserstoff zur Stromerzeugung und schließt damit den Kreis der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff zu Strom, P2P.

Aber nicht nur die Wasserstofferzeugung wird in diesem Projekt untersucht: Die PV-Aufdachanlage mit einer Gesamtleistung von ca. **402 kW_p** besteht aus PV-Modulen mit neuartigen n-Typ-Zellen. Bei dieser Zelltechnologie wird das Hauptmaterial Silizium mit einem anderen Material dotiert als bei den üblicherweise verwendeten p-Typ-Zellen. Die Dotierung mit Phosphor anstelle von Bor in p-Typ-Zellen verleiht der Grundfläche der Zelle eine leicht negative Ladung, daher die Bezeichnung n-Typ. N-Typ-Zellen sind weniger anfällig für lichtinduzierte Degradation, sind aber etwas teurer.

Die PV-Module bestehen aus modernen, hocheffizienten Halbzellen und weisen eine Nennleistung von **475 W_p** auf. Eine Stichprobe von sechs Modulen zeigte bei Standardtestbedingungen (STC) im PV-Labor des AIT eine Wirkleistung von jeweils ca. 470 W am Maximum Power Point (MPP), was innerhalb der Herstellertoleranz liegt. Der gemessene **Wirkungsgrad** beträgt **21,7 %**.

Von der gesamten installierten Nennleistung sind ca. **63 kW_p** direkt dem H₂-Demonstrator zugeordnet. Dieser Anlagenteil liefert also den für die Wasserstofferzeugung benötigten Strom. Die Module in diesem Bereich sind in verschiedenen Ausrichtungen, nämlich Südost und Nordwest, installiert, um längere Produktionsstunden am Tag zu erreichen. Es wird eine P2P-**Umwandlungseffizienz** von **50 %** erwartet. Der **Auslegungsfaktor** zwischen der gesamten elektrischen Elektrolyseleistung (20 kW) und der installierten PV-Spitzenleistung beträgt **1:20**. Die übrigen Module sind über weitere Dächer am Forschungscampus in weiteren Ausrichtungen verteilt.

Tabelle 1 fasst die Hauptkomponenten des H₂-Demonstrators zusammen und gibt einen Überblick über technische Details, Hersteller und Herkunftsländer.

Tabelle 1: Primärkomponenten des PH₂ÖNIX P2P H₂-Demonstrators

Komponente	Hersteller	Herkunft	Kennwerte
PEM-Elektrolyseur	Ostermeier Hydrogen Solutions	Deutschland	10 kW, 35 bar, 1,8 Nm ³ /h
AEM-Elektrolyseur	H2 Core Systems / Enapter	Deutschland / Italien	9,6 kW, 35 bar, 2 Nm ³ /h
PEM-Brennstoffzelle	Proton Motor Fuel Cell	Deutschland	8 kW
DC/AC Brennstoffzelle	Itech	Taiwan	300 V, 150 A
Photovoltaikmodule	Astronergy	China	475 W _p
PV-Wechselrichter	Huawei	China	20-100 kW
Gasanalysator	LFE	Deutschland	99,5...100 % H ₂
Gasspeicher (Bündel)	Vítkovice Cylinders	Tschechien	600 L, 300 bar

Die meisten Komponenten des H₂-Demonstrators, wie z. B. die Elektrolyseure, sind in einem 20-Fuß-Container untergebracht. Der Container ist mit allen erforderlichen Anschlüssen für Brauchwasser, Strom und Wasserstoff sowie mit Abwasserleitungen und Entlüftungsleitungen für Wasserstoff und Sauerstoff ausgestattet. Der erzeugte Wasserstoff wird außerhalb des Behälters in einem handelsüblichen Gasflaschenbündel sicher gespeichert. Auf den folgenden Abbildung 2 bis Abbildung 6 werden die installierten Hauptkomponenten des PH₂ÖNIX-Projekts gezeigt.



Abbildung 2: Ein Teil der dem H₂-Demonstrator zugeordneten Abschnitt der PV-Anlage (63 kW_p). Ausrichtung der n-Typ-Module ist Südost und Nordwest.



Abbildung 3: P2P H₂-Demonstrator im Container.



Abbildung 4: Links PEM-Elektrolyseur, Mitte AEM-Elektrolyseur, rechts Schaltschrank mit Mess- und Steuerungstechnik, Brennstoffzelle und Gasanalyse.



Abbildung 5: Rückansicht des H₂-Demonstrators mit Gasspeicher und Rückkühler. An der Containerseite ist eine Infotafel zum Projekt angebracht.

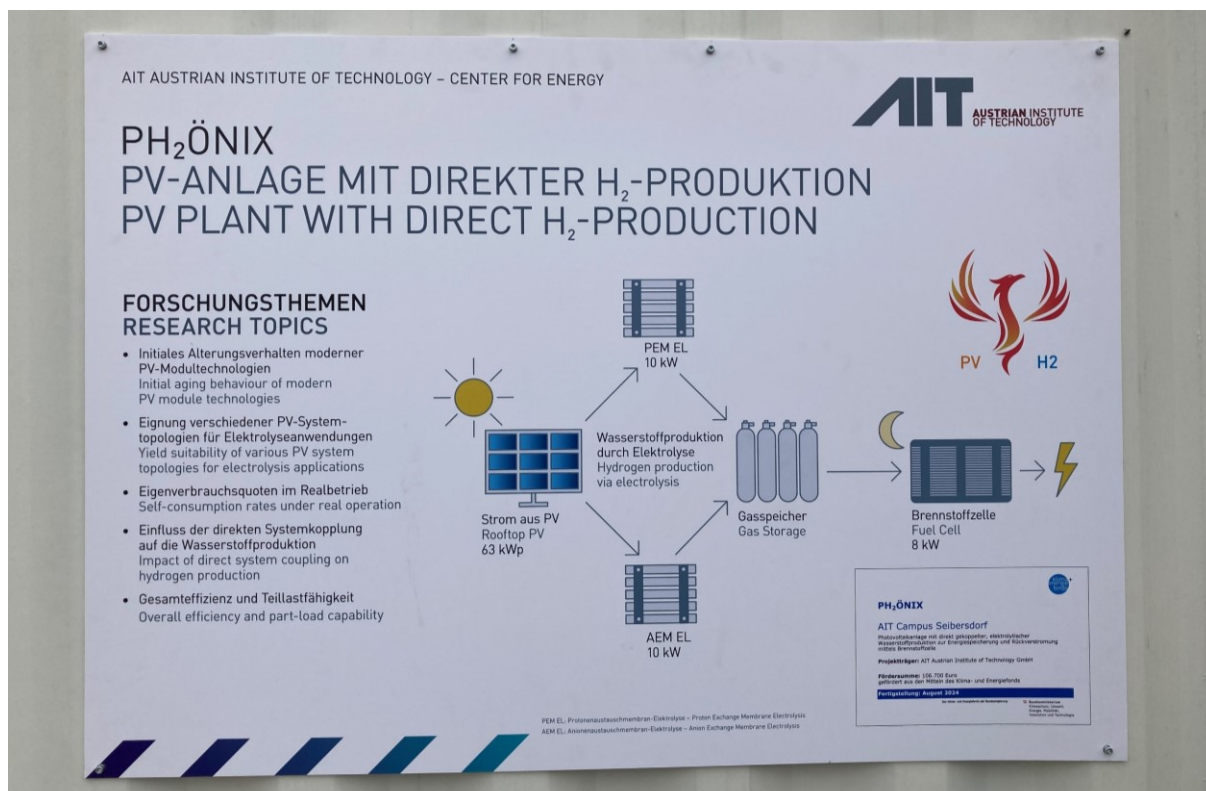


Abbildung 6: Infotafel zum PH₂ÖNIX-Projekt mit KLIEN-Bautafel.

Herausforderungen

Herausforderungen lagen in der Integration der Brennstoffzelle in die Infrastruktur und Steuerungstechnik des H₂-Demonstrators sowie die genaue Nachführung der Elektrolyseleistung nach der Stromproduktion der PV-Anlage. Bezüglich des Betriebs der PV-gekoppelten Wasserelektrolyse zeichnete sich bereits ab, dass nicht die Flexibilität der Elektrolyse, sondern die der Peripheriegeräte limitierend für die reaktionsschnelle Nachführung sein könnten. So ist z. B. die Kaltstartfähigkeit beider Elektrolyseure bei Sonnenaufgang nur eingeschränkt. Die Elektrolyseure müssen zuerst auf Betriebstemperatur gebracht werden, was durch geringe PV-Erträge und damit niedrige Stromvorgabe an die Elektrolyseure noch langsamer abläuft. Außerdem werden die Mindestlast sowie die Laständerungsgradienten der Elektrolyseure durch die Programmierung der Maschinen begrenzt. Genauere Analysen der Flexibilität des Gesamtsystems P2P H₂-Demonstrator werden nach dem Abschluss der Monitoringphase möglich sein.

6 Kaufmännische Details des Projektes

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Projekt wurde auf zwei Arten durchgeführt. Zum einen wurden die Herstellungskosten für Strom der Gesamtanlage PV-H₂ durch eine LCOE-Rechnung (LCOE: engl. Levelised Cost of Energy, Stromgestehungskosten) mit den gesamten Investitionskosten durchgeführt, zum anderen wurde die Amortisationszeit berechnet.

Wirtschaftlichkeitsberechnung

Für die LCOE-Rechnung wurde eine Abschreibungsdauer von 20 Jahren ohne Restwert angenommen, durchschnittliche Betriebskosten, keine Fremdfinanzierung (finanziert aus Überschüssen des AIT als Investition) und die Investitionskosten für die 402-kW_p-PV-Anlage plus die Investition für den H₂-Demonstrator. Die Investitionskosten für den H₂-Demonstrator umfassen dabei nicht nur die Hauptkomponenten (Elektrolyseure, Gasspeicher, Brennstoffzelle), sondern alle Materialkosten von den Rohrleitungen über Elektronik bis hin zum Container. Diese LCOE-Rechnung wird in Tabelle 2 dargestellt.

Die **Gesamtkosten** der Anlage betrugen **871.500 €**, was ca. **2.170 €/kW_p** bezogen auf die Nennleistung der PV-Anlage entspricht. Davon entfallen 1.546,30 €/kW_p auf die PV-Anlage und 622,12 €/kW_p auf den H₂-Demonstrator. Bezogen auf die installierte Elektrolyseleistung betrugen die spezifischen Investitionskosten für den H₂-Demonstrator 12.755 €/kW.

Der spezifische Ertrag der PV-Anlage beträgt nach der PV'SOL-Simulation des Errichters 896,4 kWh/kW_p. Verglichen mit dem über das erste Halbjahr 2021 gemittelten Bruttostrompreis am Standort von 93,50 €/MWh ist die Anlage mit

Stromgestehungskosten von **162,11 €/MWh** somit ohne Förderung nicht rentabel.

Tabelle 2: LCOE-Rechnung für das PH₂ÖNIX-Projekt.

Anlagenspezifikation:		
Nennleistung	401,85	kW _p
Spezifischer Jahresertrag	896,4	kWh/kW _p
Engpassleistung	0,350	MW
Stromerzeugung (netto)	360,22	MWh
Volllaststunden	1029,20	h/a
Kostenparameter:		
Investitionskosten gesamt	2168,72	€/kW _p
	871500,00	€
hiervon:		
PV-Anlage	621500,00	€
	1546,60	€/kW _p
H ₂ -Demonstrator	250000,00	€
	622,12	€/kW _p
Betriebskosten gesamt (Pauschale)	8,80	€/MWh
Finanzierungsbedingungen:		
Externe Finanzierungskosten	0,00%	%
Inflation	2,20%	%
Mittlere Abschreibedauer (mAd)	20	a
Levelised Cost of Electricity		
LCOE₂₀ ohne Anlagenrestwert		162,11 €/MWh

Umweltrelevante Mehrkosten

Die umweltrelevanten Mehrkosten bzw. die Mehrinvestitionskosten (MIK) bei Anlagen aus erneuerbaren Energien beschreiben die zusätzlichen Investitionskosten einer Anlage, die im Vergleich zu einer Referenzanlage mit konventionellen (fossilen) Technologien vergleichbarer Nennleistung entstehen. In Tabelle 3 wird die Berechnung der umweltrelevanten Mehrkosten für das PH₂ÖNIX-Projekt gezeigt.

Tabelle 3: Umweltrelevante Mehrkosten (MIK) des PH₂ÖNIX-Projekts

Nennleistung PV-Anlage		401,85 kW _p
Kosten PV-Anlage		1546,60 €/kW _p
Kosten PV-H ₂ -Anlage	bezogen auf PV-Leistung	2168,72 €/kW _p
Referenzkosten	BHKW ÖMAG-Studie 2018	300,00 €/kW
Differenz BHKW	zu PV	1246,60 €/kW _p
Differenz BHKW	zu PV-H ₂	1868,72 €/kW _p
Umweltrelevante Mehrkosten	PV	500946,21 €
Umweltrelevante Mehrkosten	PV-H₂	750945,13 €

Mit den Gesamtkosten der Anlage von 871.500 €, den spezifischen Systemkosten je kW_p PV von ca. 2.170 €/kW_p und entgegengestellten Kosten für vergleichbare fossile Erzeugungstechnologien nach der ÖMAG-Studie von 2018 von ca. **300 €/kW** für ein Blockheizkraftwerk (BHKW) verbleiben **umweltrelevante Mehrkosten** (MIK) von **750.945,13 €** oder ca. **1.870 €/kW_p**.

Mit der erhaltenen **Förderung** der Ausschreibung von **106.700 €** resultiert dann ein Investitionsbedarf von ca. **764.800 €**, bzw. **1.903,20 €/kW_p**. Der Fördersatz beträgt ca. 14 % der umweltrelevanten Mehrkosten.

Amortisationsberechnung

Die Amortisationszeitrechnung stellt die Wirtschaftlichkeit als Funktion einer Kostenneutralität gegenüber der Investition dar. Üblich sind für PV-Anlagen 10-13 Jahre mit über 20 Jahren für sehr spezifische Bauwerkklösungen. Die Amortisationsrechnung für die Vollkostenrechnung und die geförderte Anlage wird in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Amortisationsberechnung für das PH₂ÖNIX-Projekt

		ohne Förderung	mit Förderung
Strompreis		93,50	93,50 €/MWh
Kosten PV-H ₂ System		871500,00	871500,00 €
Bewilligte Förderung		0,00	106700,00 €
Ertrag pro Jahr	Energie	360,22	360,22 MWh/a
Ertrag je Jahr	Kapital	33680,57	33680,57 €/a
Amortisation	in Jahren	25,88	22,71 a

Die statische **Amortisationszeit** ohne Förderung beträgt beinahe 26 Jahre und mit Förderung ca. **23 Jahre**. Nicht einberechnet wurde die Reduktion des Spitzenlastbezugs des Forschungscampus Seibersdorf durch die PV-Anlage zur Mittagszeit. Es wird erwartet, dass durch die PV-Stromerzeugung der Bezug von hochpreisigem Spitzenlaststrom aus dem Netz zurückgeht und daher weitere dynamische Stromkosteneinsparungen zustande kommen. Dies wird die Amortisationszeit weiter reduzieren.

7 Monitoring

Das Monitoringkonzept beinhaltet standardmäßige Anlagenüberwachung (z. B. Wechselrichter oder Betriebsüberwachung), aber auch hochqualitative kalibrierte und rückführbare Messungen, um die Forschungsziele hinsichtlich Effizienzanalyse und Alterungsanalyse zu erreichen. Für das Monitoring stehen folgende Messgrößen zur Verfügung:

1. Anlagenparameter der PV-Anlage:
 - a. Wechselrichterdaten
 - b. Qualitätsprüfung der Module vor und nach der Installation
2. Meteorologische Daten:
 - a. Wetterdaten an der Anlage (Einstrahlung, Modultemperatur)
 - b. Wetterdaten der Wetterstation am Campus Seibersdorf (Lufttemperatur, Windstärke)
3. Anlagenparameter der H₂-Anlage:
 - a. Gaserzeugung, Strombezug und Gasqualität der Elektrolyseure
 - b. Gasdrücke und -temperaturen
 - c. Daten der Brennstoffzelle: Gasverbrauch, Strombereitstellung

Abbildung 7 gibt einen Überblick über die verschiedenen Messstellen im Projekt.

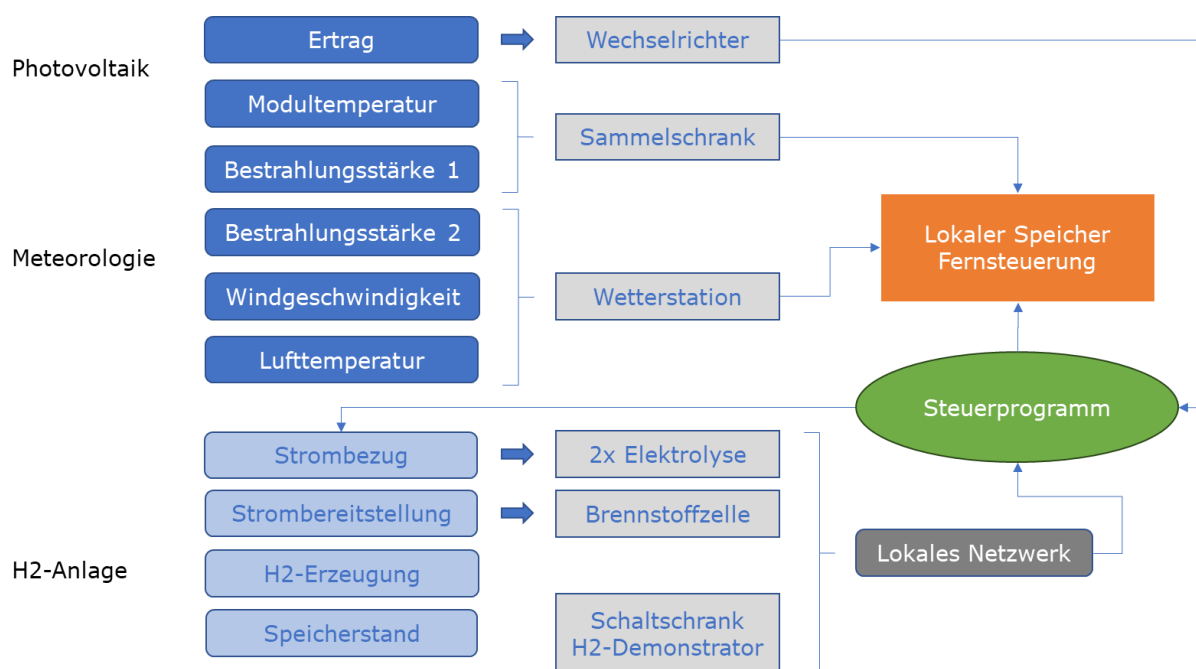


Abbildung 7: Messstellendiagramm für des PH₂ÖNIX-Projekts

Die Ertragsmessung der PV-Anlage stellt der Wechselrichter zur Verfügung. Über das Steuerprogramm wird die aktuelle Wechselstromleistung an die Elektrolyse der H₂-Anlage gesendet. Dort werden die beiden Elektrolyseure entsprechend der vorliegenden Leistung paritätisch nachgeführt. Alle Erzeugungsdaten werden über Messinstrumente in der Anlage aufgenommen (Drücke, Temperaturen, Durchflüsse, Gasqualität). Der Speicherstand im H₂-Bündel wird als Druckwert ebenfalls aufgezeichnet. Zu Zeiten der Rückverstromung erhält die Brennstoffzelle eine Stromwertvorgabe aus dem Steuerprogramm, der tatsächliche Istwert der Stromerzeugung wird wiederum zusammen mit allen H₂-Parametern über ein lokales Netzwerk zurück an das Steuerprogramm des H₂-Demonstrators gegeben. Auf einem lokalen Speicher werden dann alle Betriebsdaten der PV-H₂-Anlage sowie der meteorologischen Daten der PV-Anlage sowie der Wetterstation am Campus Seibersdorf zusammengeführt.

Die Ergebnisse des Monitorings der PV-Anlage mit direkt gekoppelter Wasserstofferzeugung wird im Folgeprojekt C143223 „Begleitforschung für Innovationsprojekt PH₂ÖNIX“ bearbeitet und nach Projektabschluss detailliert dokumentiert.

8 Arbeits- und Zeitplan

Tabelle 5 fasst den Zeitplan des PH₂ÖNIX-Projekts zusammen. Aufgeführt werden auch die Planungsaktivitäten für das AIT H2LAB zur Vorbereitung des H₂-Demonstrators und die besonders lange Genehmigungsphase für die Inbetriebnahme der PV-Anlage.

Tabelle 5: Gantt-Diagramm des PH₂ÖNIX-Projekts mit AIT H2LAB

	2023											
Gantt PH₂ÖNIX	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Führungsplanung AIT H2LAB												
Ausschreibungsprozess PV-Anlage												
Behördliche Genehmigungen												
Errichtung PV-Anlage												
Inbetriebnahme PV-Anlage												
Errichtung H ₂ -Demonstrator												
Inbetriebnahme H ₂ -Demonstrator												
Monitoring PH ₂ ÖNIX												
Evaluierung Gesamtanlage												

	2024											
Gantt PH₂ÖNIX	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Führungsplanung AIT H2LAB												
Ausschreibungsprozess PV-Anlage												
Behördliche Genehmigungen												
Errichtung PV-Anlage												
Inbetriebnahme PV-Anlage												
Errichtung H ₂ -Demonstrator												
Inbetriebnahme H ₂ -Demonstrator												
Monitoring PH ₂ ÖNIX												
Evaluierung Gesamtanlage												

	2025											
Gantt PH₂ÖNIX	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Führungsplanung AIT H2LAB												
Ausschreibungsprozess PV-Anlage												
Behördliche Genehmigungen												
Errichtung PV-Anlage												
Inbetriebnahme PV-Anlage												
Errichtung H ₂ -Demonstrator												
Inbetriebnahme H ₂ -Demonstrator												
Monitoring PH ₂ ÖNIX												
Evaluierung Gesamtanlage												

9 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Das PH₂ÖNIX-Projekt wurde bereits als innovatives Leuchtturmprojekt im November 2023 auf der Fachtagung für Photovoltaik und Stromspeicherung der Technologieplattform Photovoltaik (TPPV) mit dem PV Austria in Graz präsentiert.

Am 25.09.2024 stellte Dr. Marcus Rennhofer den PH₂ÖNIX als Leuchtturmprojekt der Photovoltaik des Klima- und Energiefonds auf der 41. EU PVSEC in Wien vor.

Ein Beitrag zum Newsletter des Klima- und Energiefonds wurde zum Zeitpunkt der Berichtsverfassung eingereicht. Dieser erschien am 29.10.2024.

Das Projekt gewann den Hydrogen Europe Research Contest zum Thema "Hydrogen Frontiers: The Future EU Landscape" in der Kategorie „Future“, in der visionäre Lösungen für aufkommende Herausforderungen und Möglichkeiten in der Entwicklung der Wasserstofftechnologien ausgezeichnet werden. PH₂ÖNIX wird als Gewinner des Wettbewerbs u.a. auf der Hydrogen Week in Brüssel vom 18. bis zum 22. November 2024 präsentiert werden.

Ein Abstract zur Vorstellung des Projekts auf dem Green Hydrogen Forum der The smarter E Europe in München vom 6. bis zum 9. Mai 2025 wurde eingereicht.

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.