

Kurzbericht zum Verbundvorhaben

LivingH2

**Verbundvorhaben LivingH2: Komponentenentwicklung für ein
Brennstoffzellen-BHKW und Analyse
der gebäudeinternen Wasserstoffinfrastruktur**



**Fördermaßnahme: 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung
„Innovationen für die Energiewende“**

Förderkennzeichen: 03SF0587B

Laufzeit: 01.10.2019 bis 31.03.2024

Berichtender Verbundpartner:

**DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Str. 34, 09599 Freiberg**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

I. Kurzbericht

I.1. Aufgabenstellung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „LivingH2“ wurde im Zeitraum vom 1. Oktober 2019 bis zum 31. März 2024 bearbeitet. Es ist ein gemeinsames Projekt zwischen französischen und deutschen Partnern, das aus einem Förderaufruf für nachhaltige Energie hervorgegangen ist.

Französischer Partner	Deutscher Partner
ENGIE Lab CRIGEN (ENGIE)	inhouse engineering GmbH (INHOUSE)
CEA Liten (CEA)	Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (OTH)
	DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI)

Ziel des Projekts war es, ein Wasserstoffversorgungssystem zu entwickeln und zu testen, welches in einem typischen Wohnhaus sicher installiert und betrieben werden kann. Das System wurde in einem „Living Lab“ umgesetzt – einer Art Testlabor beim Projektpartner ENGIE Lab CRIGEN (ENGIE) in Paris. Das Gesamtsystem in Paris besteht aus folgenden Einzelkomponenten:

- Photovoltaikanlage zur Nutzung von Solarenergie,
- einem Elektrolyseur zur Herstellung von grünem Wasserstoff mittels PV-Strom,
- einem Speichersystem für den erzeugten Wasserstoff,
- einer Einheit zur Geruchsbeimischung (Odorierung),
- einem Brennstoffzellen-Heizkraftwerkwerk (PEM-BZ-BHKW) zur Erzeugung von Strom und Wärme zur Hausenergieversorgung,
- sowie einem Datenaufzeichnungssystem mit Datenfernübertragung.

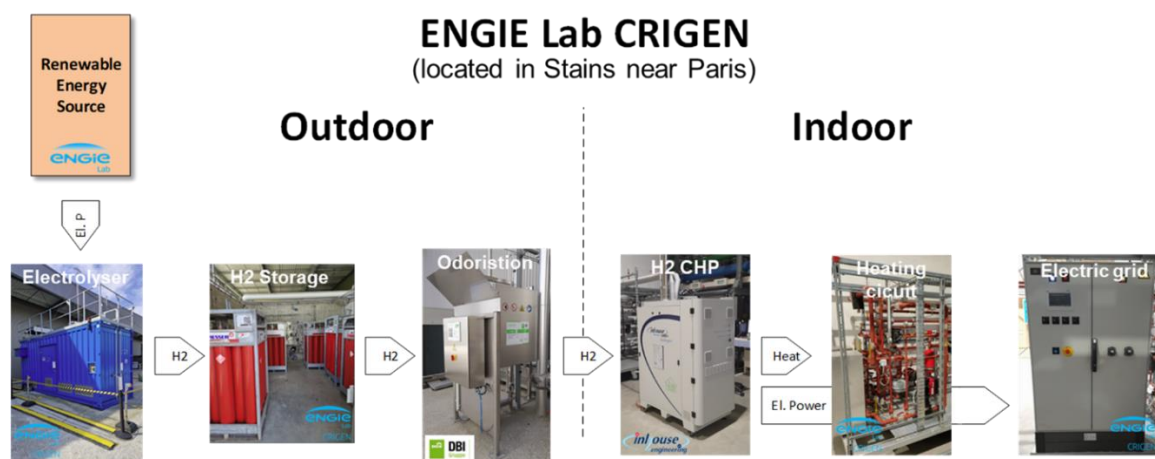


Abbildung 1: Überblick Gesamtsystem im Testlabor ENGIE Lab CRIGEN (ENGIE) in Paris

Das Projekt untergliedert sich in fünf Hauptaufgabengebiete:

1. Verbesserung von speziellen Bauteilen (MEAs) für die Brennstoffzelle der KWK-Einheit
2. Einbau und Test dieser MEAs in die Brennstoffzelle
3. Entwicklung eines Wasserstoffbrenners zur Abdeckung von Spitzenlasten
4. Aufbau und Test des kompletten Systems – von der Wasserstoffproduktion aus Sonnenenergie bis hin zur Nutzung von Strom und Wärme im Haus.
5. Untersuchung der Wirtschaftlichkeit, Umweltfreundlichkeit und Akzeptanz der Lösung.

Die Einzelkomponenten wurden von den Projektpartnern entwickelt und anschließend als Gesamtsystem in Paris installiert und betrieben.

I.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Deutschland verfügt neben Japan über den höchsten technologischen Stand der stationären Versorgung mit Brennstoffzellen. In Japan ist die Markteinführung mit fast 300.000 verkauften Systemen seit 2009 am weitesten fortgeschritten.

Für die Odorierung von Wasserstoff können prinzipiell die für die Erdgasodorierung bekannten und zugelassenen Geruchsstoffe verwendet werden. Schwefel als ein zentraler Bestandteil dieser Geruchsstoffe ist jedoch ein Gift für den Katalysator in der Brennstoffzellen-MEA. Ein zertifiziertes schwefelfreies Odoriermittel ist Gasodor® S-Free. Ein anderes, noch nicht zertifiziertes, ebenfalls schwefelfreies Odoriermittel ist Gasodor® Hydrogen.

Wasserstoffbrenner sind derzeit im Haushaltsbereich nicht sehr verbreitet, werden aber gegenwärtig von verschiedenen Herstellern entwickelt.

I.3. Ablauf des Vorhabens

Als Projektkoordinator fungierte inhouse engineering GmbH.

Es fanden halbjährliche Projekttreffen sowie monatliche Telefonkonferenzen mit allen Partnern statt. Darüber hinaus gab es nach Bedarf Telefonkonferenzen zwischen einzelnen Partnern innerhalb der Arbeitspakete zur Abstimmung von Teilaufgaben.

Aufgrund der COVID-19-Pandemie und den damit verbundenen Einschränkungen (Lockdown, Betriebsschließungen, Home-Office) kam es zu starken Verzögerungen in der Bearbeitung der Projektaufgaben im Vergleich zum ursprünglichen Projektantrag. Dank der bewilligten Projektverlängerung konnte das Gesamtsystem von PEM-Brennstoffzellen-BHKW mit Odorierstation dennoch über ein Jahr im ENGIE Lab CRIGEN in Paris betrieben werden.

I.4. Wesentliche Ergebnisse

Folgende wesentlichen Arbeitsschwerpunkte wurden vom Antragsteller DBI im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erfolgreich realisiert:

1. Entwicklung, Bau und Betrieb einer Micro-Odorierstation zur Odorierung kleiner H_2 -Volumenströme im Bereich 3 – 25 m^3/h
2. Fertigung und Integration einer Deodorierungslösung in das H_2 -BHKW
3. Entwicklung, Bau und Betrieb eines katalytischen Brenners zur thermischen Umsetzung des H_2 -haltigen Purgegas der PEM-Brennstoffzelle
4. Entwicklung und Integration eines H_2 -Spitzenlastbrenners in das H_2 -BHKW

Die einzelnen Komponenten wurden zunächst ausgelegt und gefertigt. Anschließend erfolgten zahlreiche Tests der Einzelkomponenten an verschiedenen Versuchsständen zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit bei allen geforderten Randbedingungen.

Nach erfolgreichem Test der Einzelkomponenten katalytischer Purgegasbrenner und Spitzenlastbrenner wurden diese in Berlin beim Projektpartner inhouse in das PEM-Brennstoffzellensystem integriert. Ebenso wurde die Deodoriereinheit nach Auslegung und Test im Labor in das BZ-System integriert. Parallel dazu erfolgte die Installation und Inbetriebnahme der von DBI entwickelten Odorierstation auf dem Testgelände in Paris.

Die finale Inbetriebnahme des Brennstoffzellen-BHKW erfolgte im Dezember 2022 in Paris.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Gesamtprojekt profitierte von einer sehr guten französisch - deutschen Zusammenarbeit. Dabei wurde von deutscher Seite mit INHOUSE und DBI eine starke Expertise im Bereich Entwicklung von BZ-Systemen beigegeben und mit der OTH die sozialen, ökonomischen und ökologischen Aspekte bewertet. ENGIE als weltweit engagierter Anbieter von Energielösungen mit Wasserstoff stellte das Testlabor und die Wasserstoffinfrastruktur zur Verfügung.

Schlussbericht zum Verbundvorhaben

LivingH2

**Verbundvorhaben LivingH2: Komponentenentwicklung für ein
Brennstoffzellen-BHKW und Analyse
der gebäudeinternen Wasserstoffinfrastruktur**



**Fördermaßnahme: 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung
„Innovationen für die Energiewende“**

Förderkennzeichen: 03SF0587B

Laufzeit: 01.10.2019 bis 31.03.2024

Berichtender Verbundpartner:

**DBI - Gasttechnologisches Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Str. 34, 09599 Freiberg**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

II. Eingehende Darstellung	3
<i>II.1. Verwendung der Zuwendung / Erzielte Ergebnisse.....</i>	<i>3</i>
II.1.1. Arbeitspaket 4 - Entwicklung eines Systems zur Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden auf Basis von Wasserstoff	3
II.1.2. Arbeitspaket 5 - Installation, Test und Inbetriebnahme des Gesamtsystems im Living Lab ..	26
II.1.3. Arbeitspaket 7 - Verwertung und Veröffentlichung der Ergebnisse	31
<i>II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises</i>	<i>32</i>
<i>II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</i>	<i>32</i>
<i>II.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans</i>	<i>32</i>
<i>II.5. während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</i>	<i>33</i>
<i>II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse</i>	<i>33</i>
Abbildungsverzeichnis	34
Tabellenverzeichnis.....	34

II. Eingehende Darstellung

II.1. Verwendung der Zuwendung / Erzielte Ergebnisse

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden arbeitspaketweise die Ergebnisse des Projektpartner DBI ausführlich dargelegt. Gemäß Aufgabenplanung wurden dabei schwerpunktmäßig die Arbeitspakete 4 und 5, sowie das Arbeitspaket 7 bearbeitet, welche sich mit den Themen katalytische Nachverbrennung, Spitzenlastbrenner, sowie Odorierung von Wasserstoff und Systembetrieb beschäftigen. Die Arbeitspakete mit den Themen Optimierung und Betrieb des PEM-Brennstoffzellensystem wird im Bericht des Projektpartner INHOUSE näher beschrieben.

II.1.1. Arbeitspaket 4 - Entwicklung eines Systems zur Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden auf Basis von Wasserstoff

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung eines wasserstoffbasierten Energieversorgungssystems in Form eines H₂-betriebenen PEM-Brennstoffzellensystems für Gebäude. Dabei soll die kompletten Energiewandlungskette von der H₂-Erzeugung bis zur Verwendung im H₂-BHKW demonstriert werden. Die Produktion des grünen Wasserstoffs mittels Ökostroms wird von einem Elektrolyseur realisiert, welcher vom Projektpartner ENGIE beigestellt wird. Schwankungen beim Verbrauch oder der regenerativen, fluktuierenden Stromerzeugung werden durch den Einsatz von H₂-Speichern gepuffert. Die im Objekt benötigten Mengen an Strom und Wärme werden über das im Projekt entwickelte H₂-KWK-System bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt. Hierbei wird ebenfalls ein Warmwasserspeicher zur Entkoppelung von Strom und Wärmebedarf eingesetzt.

Folgende Aufgaben wurden vom Zuwendungsempfänger im Rahmen des Arbeitspaket 4 dieses Projektes realisiert:

- a) Entwicklung, Bau und Betrieb einer Micro-Odorierstation zur Odorierung kleiner H₂-Volumenströme im Bereich 3 – 25 m³/h
- b) Fertigung, Betrieb und Analyse einer Deodorierungseinheit für das H₂-BHKW
- c) Entwicklung, Bau und Betrieb eines katalytischen Brenners zur thermischen Umsetzung des H₂-haltigen Purgegas der PEM-Brennstoffzelle
- d) Entwicklung und Integration eines H₂-Spitzenlastbrenners in das H₂-BHKW zur Bereitstellung von Wärme unabhängig vom Brennstoffzellenbetrieb

Nachfolgend werden die einzelnen Systemkomponenten ausführlich beschrieben.

a) Entwicklung, Bau und Betrieb einer Micro-Odorierstation zur Odorierung kleiner H₂-Volumenströme im Bereich 3 – 25 m³/h

Da reiner Wasserstoff farblos, geruchlos und für den Menschen nicht wahrnehmbar ist, soll dieser im Rahmen des Projektes odoriert werden. Ziel der Odorierung ist die Erhöhung der Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff und Schaffung bzw. Stärkung der Akzeptanz des Energieträgers bei der Allgemeinheit. Hierbei steht im Fokus, dass Wasserstoff in seiner Verwendung durch technische Laien so sicher wie etablierte Energieträger (Erdgas, Benzin) ist.

Ziel ist die Konzeptionierung, Errichtung und Inbetriebnahme eines Micro-Odoriersystems, welches als kompakte Einheit ins Gesamtsystem zu integrieren ist. Die besondere Herausforderung besteht in den geringen Volumenströmen und den hohen Anforderungen an die Dosierung der Geruchsstoffe.

Konkret war ein vorhandenes Konzept unter ausführungstechnischen Aspekten weiterzuentwickeln. Dazu gehört die Durchführung von Berechnungen und Dimensionierungen. Ein R&I-Schema des Odoriersystems wurde erstellt, inklusive der dazugehörigen Stücklisten und Kenndaten. Es wurden eindeutige Beschreibungen aller Anlagenbauteile und anderer Einrichtungen angefertigt. Hierzu gehören Bedienungsanleitungen und Sicherheitsdokumente. In Bezug auf die Odorierstation konnte das DBI auf Erfahrungen aus früheren Projekten zurückgreifen. Das Design wurde entsprechend der Betriebserfahrung verbessert.

Bei der Konzeptionierung einer geeigneten Anlage zur Odorierung des Wasserstoffs musste berücksichtigt werden, dass der Einsatz von unterschiedlichen Odoriermitteln in der Anlage möglich ist, um die Auswirkungen der verschiedenen Stoffe auf die Wasserstoffanwendungen untersuchen zu können. Insbesondere wurde hierbei der Einfluss von Odoriermitteln (schwefelhaltig und schwefelfrei) auf Membran-Elektroden-Anordnungen (MEA) untersucht, sowie die Möglichkeiten zur adsorptiven Entfernung. Die Odorierung erfolgt nicht primär als Sicherheitsmaßnahme, sondern zu Forschungszwecken.

Als Odoriermittel stehen schwefelhaltige und schwefelfreie Odoriermittel zur Auswahl. In Frankreich sind für Erdgasnetze derzeit nur schwefelhaltige Odoriermittel zulässig. Weiterhin gibt es eine Vorschrift, dass in einem Heizungsraum nur ein Brennstoff zulässig ist. Daher konnte das BZ-BHKW nicht, wie ursprünglich geplant, im Heizungsraum aufgestellt werden. Um die Wärme dennoch in den Heizkreis einkoppeln zu können, wurde die Anlage im „Nachbarraum“, der Laborhalle, installiert, sodass nur die Heizungsrohre durch die Wand gehen. Diese Lösung hatte allerdings den positiven Nebeneffekt, dass die Wahl des Odoriermittels nicht an Regularien gebunden ist. Im Ergebnis der Bewertungen, welches Odoriermittel Anwendung finden kann wurde sich auf Grund der regulatorischen Gegebenheiten und des Entwicklungsstandes auf die Verwendung von GASODOR S-FREE verständigt.

Das Odoriersystem wurde so gestaltet, dass eine Odorierung der geringen Wasserstoffmengen von 3 bis 25 Nm³/h möglich ist. Bei einer Dosierrate von ca. 15 µl/m³ entspricht das einen Dosiervolumenstrom von ca. 45 bis 375 µl/h, bzw. ca. 0,75 bis 6,25 µl/min. Damit sind die kommerziell erhältlichen Odoriersysteme nicht für den gegebenen Anwendungsfall geeignet, so dass die Konzeptionierung eines speziellen Odoriersystems notwendig ist.

Die Odorierstation wurde gemäß der erfolgten Festlegungen mit allen Projektpartnern mit folgenden Parametern ausgelegt:

Kriterium	Einheit	Wert
Medium/Gas		Wasserstoff
Gasfluss	m ³ /h	max. 25
Auslegungsdruck	bar	10
Odorant		Gasodor S-Free
Konzentration	mg/m ³	max. 25
Umgebungstemperatur (extern)		-5 bis +30
Umgebungstemperatur (intern)	°C	+5 bis+40
Eingangssignal	V	1 – 5
Dosierrate	mg/m ³	10
Volumenstrom Odorant	µl/min	4,5

Die Anlage sollte in wesentlichen Teilen den Vorgaben des DVGW Arbeitsblattes G 280 (A) „Gasodorierung“ entsprechen. Das Odoriermittel wird in einem Vorratsbehälter gelagert. Der Vorratsbehälter wird mit Druckluft beaufschlagt, um ein Austausch mit der Umgebungsluft zu verhindern, ein einfacheres Dosieren zu ermöglichen und Blasenbildung zu vermeiden. Von dem Vorratsbehälter wird das Odoriermittel von einer Dosierpumpe in die Impfleitung und anschließend zur Impfdüse gefördert. Die Bauteile und Verbindungsleitungen bestehen aus Edelstahl.

Zunächst wurde für die Odorierstation ein R&I erstellt. Die benötigten Komponenten wurden beschafft und der Aufbau der Anlage realisiert.

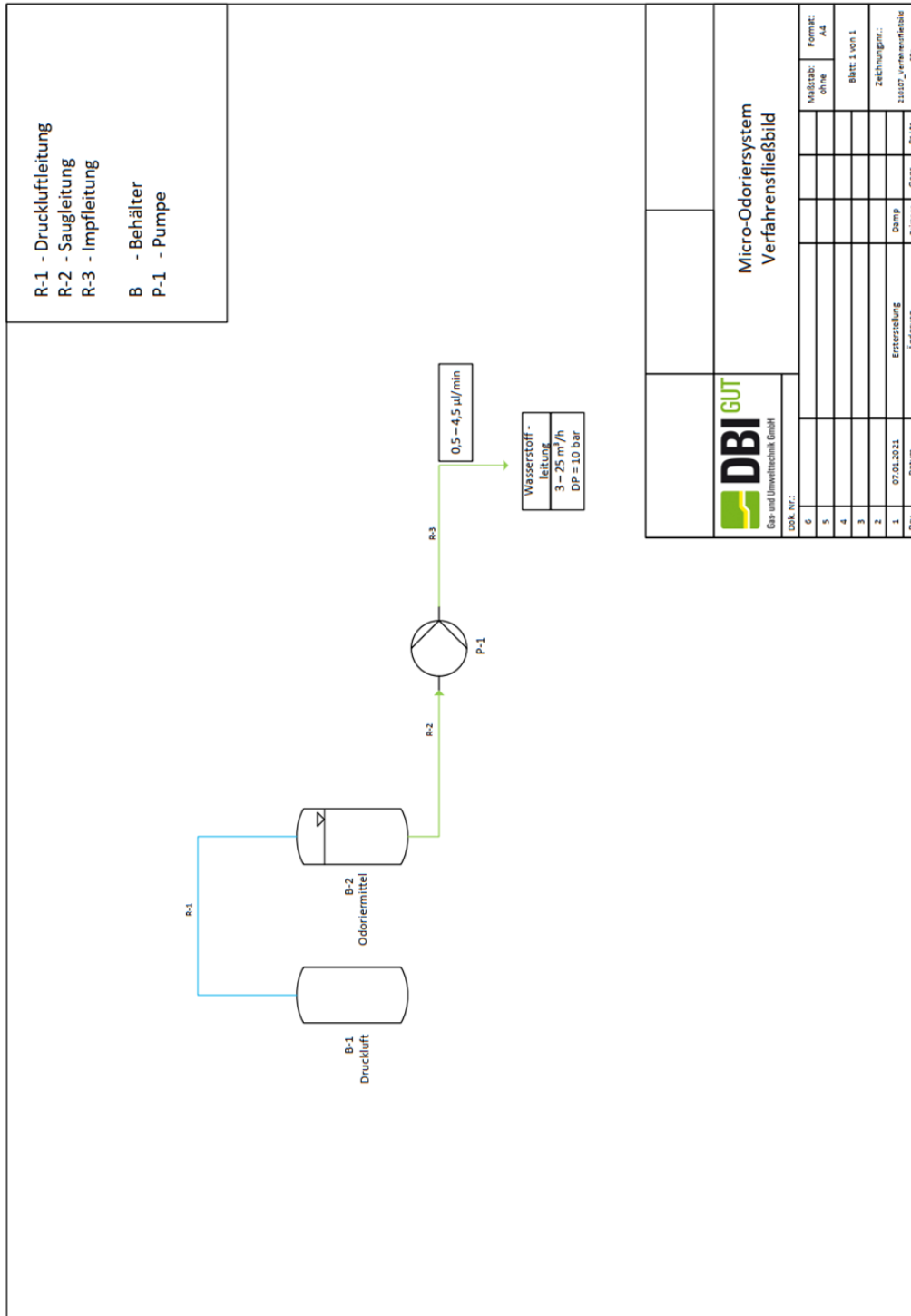


Abbildung 1: Verfahrensfließbild

Rechtliche Rahmenbedingungen

Energierrecht

Odorieranlagen sind meist Teil von Gasdruckregel- und Messanlagen, welche als Energieanlagen gemäß § 3 Nr. 15 des Gesetzes über Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG) gelten. Nach § 49 Abs. 1 EnWG wird die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik für die Errichtung und den Betrieb von Energieanlagen gefordert. § 49 Abs. 2 EnWG stellt fest, dass die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik vermutet wird, wenn die technischen Regeln des DVGW eingehalten werden.

Bei einem Auslegungsdruck (DP) von mehr als 16 bar fallen Energieanlagen zusätzlich in den Geltungsbereich der Verordnung über Gashochdruckleitungen (Gashochdruckleitungsverordnung – GasHDrLtGV). Nach § 2 Abs. 1 GasHDrLtGV müssen Anlagen nach dem Stand der Technik errichtet werden. Die Vermutung zur Einhaltung des Stands der Technik ist nach § 2 Abs. 2 GasHDrLtGV bei Einhaltung des geltenden DVGW-Regelwerks gegeben.

Die Errichtung und der Betrieb von Odorieranlagen sind Gegenstand der technischen Regel DVGW Arbeitsblatt G 280 (A) „Gasodorierung“. Die Anforderungen der technischen Regel sind im Kapitel Odorieranlage ausgeführt. Die Micro-Odorieranlage wird nach den Maßgaben dieser technischen Regel ausgeführt.

Durch den Betreiber ist bei der zuständigen Behörde eine Anzeige gemäß § 43f EnWG über eine unwesentliche Änderung durchzuführen. Diese gilt anstelle des Planfeststellungsverfahrens nach § 43 EnWG. Eine Änderung gilt als unwesentlich, wenn nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung dafür keine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen ist sowie andere öffentliche Belange nicht berührt sind. Für die Anzeige sind Stellungnahmen von Trägern öffentlicher Belange einzuholen, wie beispielsweise die Untere Wasserbehörde oder die Untere Naturschutzbehörde, die die Freistellung vom Planfeststellungsverfahren bestätigen.

Wasserrecht

Odoriermittel sind gemäß der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) als wassergefährdende Stoffe eingestuft. Nach § 1 Abs. 3 AwSV findet die Verordnung keine Anwendung auf oberirdische Anlagen mit einem Volumen von weniger als 0,22 m³. Die Odorieranlage mit einem Gesamtvolumen von weniger als 2 Litern unterfällt damit nicht dieser Verordnung.

Im Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz, WHG) werden die Maßstäbe für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen festgelegt. Gemäß dem Besorgnisgrundsatz nach § 62 Abs. 1 WHG müssen solche Anlagen so errichtet, unterhalten, betrieben und stillgelegt werden, dass eine nachteilige Veränderung der Eigenschaften von Gewässern nicht zu besorgen ist.

Die Anlage wird technisch dicht ausgeführt und eine Auffangwanne für durch Havarie bedingt austretendes Odoriermittel besitzen, so dass die Anforderungen an die primäre und sekundäre Sicherheit erfüllt sind.

Europäisches Recht

In der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG werden die Anforderungen an Maschinen und die Dokumentationspflichten sowie die Durchführung des EG-Konformitätsbewertungsverfahrens festgeschrieben. Die Odorieranlage zählt laut Definition als Gesamtheit von Maschinen, da ein

produktions- und sicherheitstechnischer Zusammenhang zwischen den einzelnen Bestandteilen besteht und diese auf das gemeinsame Ziel der Förderung von Odoriermittel ausgerichtet sind. Die Odorieranlage dient der Forschung und Entwicklung, damit besteht gemäß Artikel 1 Abs. 2 Buchstabe h Richtlinie 2006/42/EG keine Erforderlichkeit der Anwendung dieser Richtlinie.

Im Falle des kommerziellen Inverkehrbringens und Betriebs dieser Anlage gelten die Anforderungen der Maschinenrichtlinie. So müssen nach Artikel 5 Richtlinie 2006/42/EG die in Anhang I der Richtlinie ausgeführten Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllt sein. Des Weiteren müssen die in Anhang VII Teil A der Richtlinie aufgeführten technischen Unterlagen verfügbar gemacht werden, insbesondere die Betriebsanleitung. Es muss ein zutreffendes Konformitätsbewertungsverfahren gemäß Artikel 12 durchgeführt sowie eine EG-Konformitätserklärung gemäß Anhang II Teil 1 Abschnitt A ausgestellt und der Maschine beigelegt werden. Des Weiteren muss die CE-Kennzeichnung gemäß Artikel 16 an die Maschine angebracht werden.

Die Odorieranlage besitzt einen Behälter mit einem Volumen von kleiner als 1 Liter, der mit Luft befüllt und mit einem Druck von maximal 2 bar beaufschlagt ist. Luft zählt im Sinne der Druckgeräte richtlinie 2014/68/EU als Fluid der Gruppe 2. Nach Artikel 4 Abs. 3 muss dieser Behälter nach der geltenden guten Ingenieurpraxis ausgelegt und hergestellt sein.

Das Odoriermittel zählt im Sinne der Druckgeräte richtlinie 2014/68/EU als Fluid der Gruppe 1. Je nach Odoriermittel liegt der Dampfdruck bei maximaler Einsatztemperatur unter oder über 0,5 bar. Durch die Pumpe kann der Druck in der Impfleitung auf maximal 200 bar ansteigen, durch technische Maßnahmen wird ein Erreichen dieses Druckniveaus zuverlässig verhindert. Das Gesamtvolumen der Impfleitung ist deutlich geringer als ein Liter. Die unter Druck stehende Impfleitung fällt damit nicht in den Geltungsbereich von Artikel 4 Abs. 1 oder Abs. 2 der genannten Richtlinie. Somit müssen nach Artikel 4 Abs. 3 die Druckgeräte nach der geltenden guten Ingenieurspraxis ausgelegt und hergestellt sein. Eine CE-Kennzeichnung nach der Druckgeräte richtlinie ist somit für die Odorieranlage nicht zulässig. Der Hersteller muss nach Artikel 6 Abs. 1 zum Inverkehrbringen der Druckgeräte eine Gewährleistung über die Einhaltung der guten Ingenieurspraxis ausstellen. Gemäß Artikel 6 Abs. 5 muss eine Kennzeichnung zur Identifikation an dem Druckgerät oder den Unterlagen beigelegt sein. Nach Abs. 4 muss der Name, eingetragener Handelsname und Anschrift auf dem Druckgerät oder den beigelegten Unterlagen vermerkt sein. Gemäß Abs. 7 muss eine Betriebsanleitung beigelegt sein.

Gewerberecht und Stoffrecht

Nach § 5 des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) ist der Arbeitgeber verpflichtet, eine Beurteilung der für den Arbeitnehmer auftretenden Gefährdungen vor Aufnahme der Tätigkeit vorzunehmen und daraus Maßnahmen des Arbeitsschutzes abzuleiten. Nach §6 ArbSchG muss das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung, die festgelegten Maßnahmen sowie das Ergebnis der Überprüfung der Maßnahmen dokumentiert werden.

Für die Odorieranlage sind die Gefährdungen, die durch die verwendeten Arbeitsmittel ausgehen, gemäß § 3 Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) zu beurteilen. Die Anlage muss gemäß § 15 und Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 4.1 BetrSichV vor Inbetriebnahme, nach wesentlichen Änderungen sowie wiederkehrend mindestens alle sechs Jahre auf Explosionssicherheit geprüft werden.

Besondere Gefährdungen gehen von dem Umgang mit Odoriermittel aus. Nach § 6 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) ist der Arbeitgeber für die Beurteilung der Gefährdung bei Umgang mit den Gefahrstoffen verantwortlich. Die Schutzmaßnahmen nach §§ 8 und 9 GefStoffV sind zu beachten. Bei Brand- und Explosionsgefährdungen sind nach §11 GefStoffV

zusätzlich die Maßgaben nach Anhang I Nummer 1 und 5 zu beachten. Es ist eine Betriebsanweisung gemäß § 14 GefStoffV zu erstellen und die Mitarbeiter sind vor Arbeitsantritt zu unterweisen.

Ausführungsplanung

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung unter Beachtung der Rahmenbedingungen aufgezeigt. Des Weiteren wird ein Explosionsschutzkonzept vorgestellt, welches das erforderliche Maß an Sicherheit gewährleistet. Anschließend folgen Anweisungen für die Inbetriebnahme sowie zur Wartung und Instandhaltung.

Dimensionierung und Komponentenfestlegung

Abgeleitet von den Vorgaben wird in *Tabelle 1* die genaue Dosierate und die erforderliche Menge an Odoriermittel am Beispiel von Gasodor S-free für einen Projektzeitraum von 6970 h berechnet.

Tabelle 1: Dosierate und Menge Odoriermittel für Projektzeitraum

Odoriermittel:	Gasodor S-free
----------------	----------------

Beispielbedarf Gasodor-S-free

Odoriermittel	S-free		
Dichte	933	kg/m ³	
mittlere Molmasse	88,17	g/mol	
Molares Volumen	22,4	l/mol	
Dosierate	10	mg/m ³	
	10,7	µl (fl.)/m ³	
	2,5	ppm	
Versuchszeitraum	6970	Betr.-h	

Zu odorierendes Gas	Wasserstoff		
---------------------	-------------	--	--

	Minimum	Maximum	
Wasserstoff-Volumenstrom	50	416,7	l/min
	3	25	Nm ³ /h
Massenstrom Odoriermittel	0,5	4,2	mg/min
	30	250	mg/h
	720	6000	mg/d
Dosiervolumenstrom	0,5	4,5	µl/min
Odoriermittel	32,2	268,0	µl/h
	771,7	6.430,9	µl/d
	224,1	1.867,6	ml/Projektzeitraum

Der Odoriermittelbehälter hat Volumen von 0,5 Liter und ist als zylindrischer Probenahmebehälter ausgeführt. So wird ausreichend Odoriermittel für einen längeren Zeitraum bereitgestellt, bei einer Nachfüllung des Odoriermittels kann zugleich eine visuelle Überprüfung der Anlage vorgenommen werden. Der Odoriermittelbehälter ist durch Ventile absperrbar und herausnehmbar. Beim Nachfüllen wird der leere Odoriermittelbehälter abgesperrt, aus der Leitung entnommen, aufgefüllt und wiedereingesetzt.

Der Odoriermittelbehälter wird mit Druckluft beaufschlagt. Druckluft wird in einem zylindrischen Behälter der Firma Swagelok mit einem Volumen von 0,3 Liter vorgehalten. Dieser wird manuell auf einen Druck von ca. 2 bar aufgefüllt. Anschließend wird der Druck über einen Druckminderer auf ca. 50 mbar reduziert.

Da die konventionell erhältlichen Membrankolbenpumpen keine präzise Dosierung im vorgesehenen Mengbereich erlauben, muss eine Abweichung von den Vorgaben des DVGW Arbeitsblattes G 280 hinsichtlich der Dosierpumpe erfolgen. Für die Micro-Odorieranlage wird die Dosierung über eine Spritzenpumpe erfolgen. Bei dieser wird üblicherweise die Drehbewegung eines Elektromotors über einen Spindeltrieb in eine lineare Bewegung des Kolbens der Spritze übersetzt. Abbildung 2 zeigt die Spritzenpumpe neMESYS 1000N der Firma Cetoni, welche in der Anlage verbaut wird.



Abbildung 2: Spritzenpumpe neMESYS 1000N der Firma Cetoni [\[76\]](#)

Die Regelung erfolgt über einen Positionssensor, mit welchem in bestimmten zeitlichen Abständen der Drehwinkel des Motors bestimmt und dieser Wert anschließend mit einem Soll-Wert verglichen wird. Aus einer Abweichung erfolgt eine Nachregelung des Stellantriebs. Bei entsprechend hoher Auflösung können mit Spritzenpumpen sehr geringe, auch pulsationsfreie Fluidströme erreicht werden. Bei einer geringen Auflösung des Positionssensors und einer langsamen Bewegung des Motors kann es zu Schwankungen in der Einstellung des Stellantriebs kommen. Die Folge wären Geschwindigkeitsschwankungen der linearen Bewegung, welche in Pulsation der Fluidströmung resultieren.

In Tabelle 2 sind die Kenndaten der Spritzenpumpe neMYSES 1000 N mit einer 3 ml Edelstahlspritze der Firma Cetoni dargestellt. Mit dieser können eine große Bandbreite von Gasvolumenströmen von theoretisch minimal 0,02 m³/h bis hin zu 100.000 m³/h odoriert werden.

Tabelle 2: Kenndaten Spritzenpumpe neMYSES 1000 N mit 3 ml Spritze der Firma Cetoni und dosierbare Gasmenge bei 10 mg/m³ S-free

Geschwindigkeiten			Minimal [µm/min]	Minimal Pulsationsfrei [µm/min]	Maximal [mm/s]
			0,069	60,282	6
Spritze	Nennhub / Maximalhub [mm]	Druck Max.	Flussraten		
			Minimal [nl/min]	Minimal Pulsationsfrei [µl/min]	Maximal [ml/s]
3 ml	59,64 / 61	199 bar	3,5	3,032	0,3
Odorierbares Gas					
Minimal [m ³ /h]	Minimal Pulsationsfrei [m ³ /h]	Maximal [m ³ /h]			
0,02	16,97	100.764,00			

Die Spritzenpumpe ist nach der bestimmungsgemäßen Verwendung nicht für die Förderung von brennbaren Flüssigkeiten geeignet. Eine spezielle EX-Schutz-Ausführung kann nach Anfrage an den Hersteller nicht angeboten werden. Um das erforderliche Maß an Sicherheit zu gewährleisten, sind zusätzliche Explosionsschutzmaßnahmen erforderlich. So wird eine Kolbenhinterspülung mit Stickstoff erfolgen. Im Falle eines Versagens der Kolbendichtung, würde das austretende Odoriermittel vom Stickstoff aufgefangen werden. Die Kolbenhinterspülung ist mit einer 1/8" Edelstahlrohrleitung sowie einen zylindrischem Pufferbehälter mit einem Volumen von 0,05 Liter der Firma Swagelok realisiert.

Des Weiteren wurden spezielle Explosionsschutzmaßnahmen mit der Firma BARTEC GmbH abgestimmt.

In der Saugleitung ist ein T-Filter mit feinmaschigem Gitter der Firma Swagelok verbaut, um die Pumpe vor Verunreinigungen aus der Saugleitung zu schützen. Vor die Pumpe ist ein 2/3 Wege-Ventil mit Stellantrieb geschaltet. Zur Befüllung der Spritze schaltet dieses auf die Saugleitung. Bei Beginn der Dosierung schaltet das Ventil auf die Impfleitung um. Im Falle eines geregelten Ausschaltens wird das Ventil auf die Saugleitung schalten, so dass der Weg aus der Impfleitung versperrt ist.

Die Impfdüse besteht aus zwei Absperrhähnen, einem Rückschlagventil und einem Spülanschluss mit Absperrhahn.

Um im Falle einer Havarie austretendes Odoriermittel sicher aufzufangen, wurde eine Auffangwanne vorgesehen. Diese ist gegen das Odoriermittel beständig und muss die gesamte vorhandene Menge Odoriermittel auffangen können. Gewählt wurde eine Edelstahlwanne mit einem Gesamtaufangvolumen von 7 Litern.

Die Druckluftleitung besitzt eine Nennweite von 6 mm. Die Saugleitung eine Nennweite von 1/8 ". Die Spritzenpumpe sowie das 3/2-Wege-Ventil verfügen einen Anschluss von 1/16 ", so dass vor der Spritzenpumpe eine Reduzierung von 1/8 " auf 1/16 " erfolgt. Die Impfleitung hat eine Nennweite von 1/16 ". In Tabelle 3 sind Berechnungen zu Strömungsgeschwindigkeiten und Verweilzeiten dargestellt. Es ist zu bemerken, dass trotz der sehr geringen Nennweite der Impfleitung nur eine geringe Strömungsgeschwindigkeit vorliegt und die Verweilzeiten in den Leitungen vergleichsweise hoch liegen.

Tabelle 3: Fließgeschwindigkeiten und Verweilzeiten

Gasvolumenstrom	3	m ³ /h	Zeit bis Entleerung bei 500 ml						
Dosierrate	15	µl/m ³	11111,1	h					
Dosiervolumenstrom	45	µl/h	463	d					
	Rohr	Rohrlänge	Durchm. Außen	Wandstärke	Durchm. Innen	Volumen	Verweilzeit	Fließgeschw.	
	NW	l	d _a	ws	d _i	V _i	t	w	
		m	mm	mm	mm	ml	h	m/s	mm/min
Saugleitung	1/8 "	1,15	3,175	0,889	1,397	1,76	39,2	8,16E-06	0,49
Impfleitung	1/16 "	6	1,588	0,508	0,572	1,54	34,3	4,86E-05	2,92

Als Verbindung zwischen den Bauteilen und Rohrstücken werden ausschließlich Doppelklemmringrohrverschraubungen verwendet. Diese zählen als technisch dicht und sind bei Bedarf einfach zu lösen. Zum Verschließen einzelner Rohrleitungsabschnitte kommen Kugelhähne der 42er Serie der Firma Swagelok zum Einsatz.

Der Odorierschrank ist mit einer EX-Schutz Heizung der Firma INTERTEC-Hess GmbH ausgestattet. Diese dient dem Frostschutz der Anlage. Zusätzlich ist der Odorierschrank von innen isoliert.

Trotzdem sind Temperaturschwankungen insbesondere zwischen Tag und Nacht möglich. Dies kann eine Volumenänderung des Odoriermittels und daraus folgend eine Beeinflussung der Dosierleistung nach sich ziehen. Bei einem Spritzenvolumen von 3 ml und einer angenommenen Volumenschwankung von 1 % zwischen Tag und Nacht infolge der Temperaturänderung entspricht dies einer graduellen Ab- oder Zunahme von ca. 2,5 µl/h.

Die Unterbringung des Industrie-PC zur Steuerung und Regelung der Pumpe und Komponenten, sowie die Spannungsanschlüsse sind in einem separaten Schaltschrank realisiert.

MSR-Konzept

Der Wasserstoffmengenstrom wird über einen in der H₂-Versorgungsleitung installierten MFC erfasst. Über einen Mengenumwerter wird der Messwert in ein analoges 1 – 5 V Signal, entsprechend einem Volumenstrom von 0 bis 30 m³/h, gewandelt und als Führungsgröße an die Pumpe übertragen, so dass eine mengenproportionale Dosierung des Odoriermittels erfolgen kann. Die Steuerung der Pumpe erfolgt über einen Industrie-PC mit der vom Pumpenhersteller CETONI zur Verfügung gestellten Software QMIX ELEMENTS. Das 3/2-Wege-Ventil wird mit der Steuerung der Pumpe gekoppelt, so dass beim Füllvorgang auf den Odoriermittelbehälter geschaltet wird und bei der Dosierung auf die Impfleitung. Der Befüllvorgang ist einstellbar und im Verhältnis zum Dosiervorgang zeitlich kurz, so dass von einer hohen Verfügbarkeit und entsprechender Kontinuität der Dosierung ausgegangen werden kann.

In der Impfleitung, unmittelbar nach der Pumpe ist ein Drucksensor installiert. Bei Übersteigerung eines bestimmten Druckniveaus wird die Pumpe abgeschaltet. Der Drucksensor wird vom Pumpenhersteller bereitgestellt und ebenfalls über den IPC angesteuert. Durch den Drucksensor ist gewährleistet, dass die Pumpe nicht ihren maximalen Druck erreichen kann. Die Pumpenansteuerung ist direkt mit der Funktionalität des Sensors gekoppelt. Ist der Sensor nicht aktiv, erfolgt keine Dosierung durch die Pumpe. Das Signal des Drucksensors erfolgt in Form eines analogen 0,5 – 4,5 V Signals, entsprechend einem Druck von 0 – 10 bar.

Zur Einstellung des Drucks in der Luftdruckleitung ist ein Manometer vor und ein Manometer hinter dem Druckminderer installiert. Der Druckminderer der Firma Swagelok erlaubt ein Anbringen der Manometer direkt am Ventil zum Anzeigen des hohen und niedrigen Druckniveaus. Die Anzeige erfolgt mit einem Rohrfederanometer der Firma Wika, Genauigkeitsklasse 2,5, auf Seite des hohen Druckniveaus im Anzeigebereich von 0 – 10 bar, auf Seite des niedrigen Druckniveaus im Anzeigebereich von 0 – 1 bar.

Um den Bestand des Odoriermittels ablesen und einen Verbrauch ermitteln zu können, ist eine 50 ml Messbürette der Firma Billfinger als kommunizierende Röhre neben den Odoriermittelbehälter verbaut.

In der Hinterspülung wurde eine Überdruckschutzsicherung und daran anschließend ein Manometer jeweils von der Firma Wika vorgesehen. Steigt der Druck in der Hinterspülung in Folge einer Leckage, so schließt die Überdruckschutzvorrichtung und das Manometer zeigt den Schließdruck an. So kann visuell auf das Vorhandensein einer Leckage geschlossen werden und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Der Schließdruck ist einstellbar im Bereich von 0,4 bis 2,5 bar, das Rohrfederanometer besitzt einen Anzeigebereich von 0 – 2,5 bar, Genauigkeitsklasse 2,5.

Nach Finalisierung des R&I und Durchführung der HAZOP-Studie für die μ -Odorierstation erfolgte der Aufbau und die Inbetriebnahme der Anlage im DBI Labor, siehe *Abbildung 3*.



Abbildung 3: μ -Odorierstation inkl. Steuerungseinheit im DBI Labor

Die μ -Odorierstation wurde im Labor erfolgreich getestet, eine Dokumentation erstellt und an ENGIE versendet. Für den Betrieb der Anlage in Paris wurden verschiedene Aufstellungsvarianten mit den Partnern ENGIE und INHOUSE diskutiert und deren Realisierbarkeit vor Ort von ENGIE geprüft. Weiterhin wurden die Schnittstellen zur Regelung der μ -Odorierstation, sowie zur Messwerterfassung und Datenfernübertragung fixiert.

Die Errichtung und Erstinbetriebnahme der Anlage erfolgte im April 2022.

Die am DBI entwickelt und getestete μ -Odorierstation wurde ins H_2 -Lab von ENGIE nach Paris transportiert und dort in die existierende H_2 -Versorgungsleitung für das H_2 -BHKW integriert, siehe *Abbildung 4*. Dazu waren diverse Anpassungsarbeiten zur optimalen Aufstellung der Anlage an diesem Standort notwendig. Es erfolgte eine Inbetriebnahme der μ -Odorierstation

bei ENGIE in Paris sowie die Anbindung an die Messwerterfassung und die Datenfernübertragung zum Monitoring des Anlagenbetriebes aus der Ferne.



Abbildung 4: μ -Odorierstation inkl. Steuerungseinheit im H_2 -Lab von ENGIE in Paris



Abbildung 5: μ - Odorierstation – Dosiereinheit und Impfstelle

Der Betrieb der Anlage, das Einstellen der Betriebsparameter, sowie das Monitoring der Messdaten erfolgten durch DBI mittels Fernzugriff. Routinemäßige Wartungs- und Kontrollmaßnahmen wurden unter Anleitung von DBI durch Fachpersonal vor Ort ausgeführt.

b) Fertigung, Betrieb und Analyse einer Deodorierungseinheit für das H₂-BHKW

Nach derzeitigem Kenntnisstand eignen sich herkömmliche Odoriermittel für den Einsatz in Wasserstoff hinsichtlich der olfaktorischen Wirkung und längerfristigen Stabilität. Schwefelhaltige Odoriermittel führen zu einer irreversiblen Degradierung von Brennstoffzellen mit verbundenem Spannungsverlust. Bei Brenngasanwendungen ist dagegen mit keiner odoriermittelbedingter Einschränkung zu rechnen.

Das Odoriermittel kann aus dem Wasserstoff entfernt werden, wenn dies bei der Anwendung eine schädliche Auswirkung haben würde. Dies kann durch direkte Adsorption oder durch eine katalytische Umsetzung des Odoriermittels und anschließende Adsorption geschehen.

Für die Deodorierung eignen sich Molsiebe und Zeolithe, für Aktivkohle konnten zumindest für Erdgasanwendungen keine ausreichenden Beladungen festgestellt werden. Für die adsorptive Entfernung können Schüttungen aus Metalloxiden, dotierte Zeolithe oder Molsiebe verwendet werden. Die verschiedenen Adsorbentien weisen unterschiedliches Potential zur Entfernung der Odoriermittel auf, in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen (Temperatur, Druck, Gaszusammensetzung und -feuchte) und des zu entfernenden Odoriermittels. Für die Adsorption von Gasodor®S-Free eignen sich Molsiebe. Aktivkohlen sind auf Grund einer geringen Beladungskapazität weniger geeignet.

Die Deodorierungsanlage wurde von DBI dimensioniert und vom Projektpartner INHOUSE in das KWK-System eingebaut. Konkret handelt es sich hierbei um einen Festbettadsorber. Dieser wurde entsprechend der Gasvolumenströme für einen Betriebszeitraum bzw. einer Standzeit von rund 5 Monaten ausgelegt. Die Deodorierungsanlage wurde im PEM-Brennstoffzellen-BHKW unmittelbar nach dem Wasserstoffanschluss integriert. Die Deodorierungsanlage wurde so in die H₂-Versorgungsleitung eingebunden, dass man mittels Kugelhahn wählen kann, ob der Wasserstoff durch die Deodorierung fließt, oder diese umgeht. Weiterhin wurden drei Probenahmestellen zur Analyse der Gaszusammensetzung installiert.

1. Unmittelbar vor der Deodorierung
2. In der Mitte der Deodorierung
3. Nach der Deodorierung

Dadurch ist es möglich, die Gasqualität im laufenden Betrieb sowohl am Eintritt in die Brennstoffzellenanlage als auch nach der Deodorierung zu kontrollieren. Wird bei der Analyse des Wasserstoffs in der Mitte der Deodorierung Odorierungsmittel nachgewiesen, kann man feststellen, dass die Hälfte der maximalen Beladungskapazität der Deodorierung erreicht ist. Ein Weiterbetrieb der Anlage ist dennoch möglich und man hat genügend Zeit, den Austausch der Deodorierungseinheit zu organisieren.

Das PEM-Brennstoffzellensystem inklusive Deodorierung mit den Probenahmestellen ist in Abbildung 6 dargestellt.

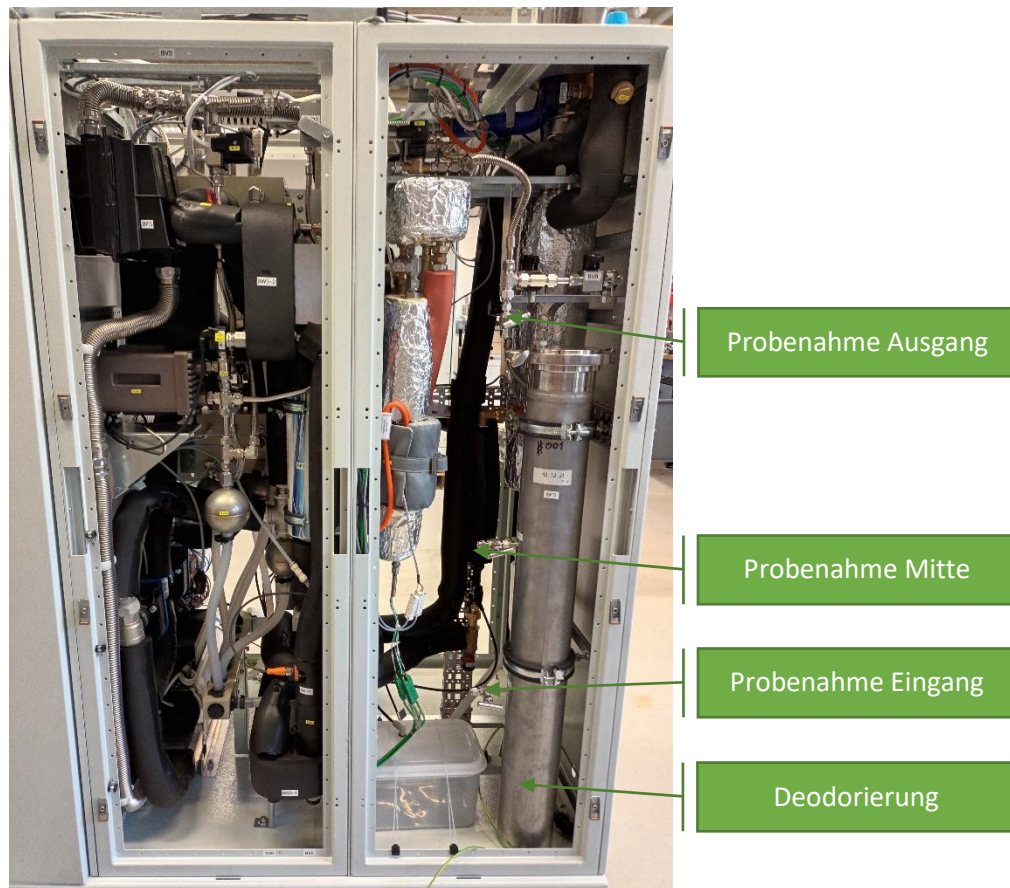


Abbildung 6: Deodorierungseinheit im Brennstoffzellenmodul

c) Entwicklung, Bau und Betrieb eines katalytischen Brenners zur thermischen Umsetzung des H₂-haltigen Purgegas der PEM-Brennstoffzelle

Die Aufgabe des katalytischen Purgebrenners ist die Nachverbrennung eines kontinuierlichen Wasserstoffstroms, der während des Brennstoffzellenbetriebs als Nebenprodukt anfällt.

Der katalytische Purgegasbrenner erfordert eine Vormischung von Luft und Wasserstoff sowie einen geeigneten Katalysator, welcher das Luft-Wasserstoffgemisch möglichst vollständig thermisch umsetzen kann. Folgende Aufgabenstellungen wurden durch DBI bearbeitet:

- Katalysatortests zur Ermittlung eines geeigneten Katalysators und der optimalen Betriebsbedingung am Katalysatorversuchsstand,
- Auslegung und Prozessdesign des katalytischen Brenners,
- Konstruktion und Fertigung katalytischer Brenner,
- Test katalytischer Brenner am Versuchsstand,
- Integration und Inbetriebnahme des Purgegasbrenner im Brennstoffzellen-BHKW.

Katalysatortest

Ziel der Katalysatortests war das Finden eines Katalysators, welcher für die Wasserstoffverbrennung geeignet ist. Folgende Kriterien wurden als Zielkriterien definiert:

- Möglichst niedrige Anspringtemperatur (Reaktionsstart)
- Hoher Umsatz / Niedrige H₂-Emissionen

- Langzeitstabilität / keine Degradation über den Testzeitraum
- Niedrige Materialkosten

Zur Auslegung der Katalysatorschüttung wurden Tests von verschiedenen Materialien im Versuchstand durchgeführt. Dafür wurde das Material in einen Reaktor gefüllt, sodass gewisse Verhältnisse in Bezug auf Durchmesser, Höhe, Partikelgröße eingehalten wurden. Die Dosierung der Gase (Luft, Stickstoff, Wasserstoff) wurden mit MFCs (Massendurchflussregler) eingestellt. Mit einem Klapprohrfen wurde die Schüttung beheizt, um die Reaktion zu starten. Bei Einsetzen der exothermen Reaktion kann die Heizung abhängig von dem Wärmeverlust der Schüttung reduziert bzw. ausgeschaltet werden, während sich die Reaktion selbst erhält. Mit einem WLD (Wärmeleitfähigkeitsdetektor) wurde die H₂-Konzentration am Reaktorausgang gemessen. Der schematische Aufbau des Versuchstandes ist in der folgenden Abbildung 7 dargestellt.

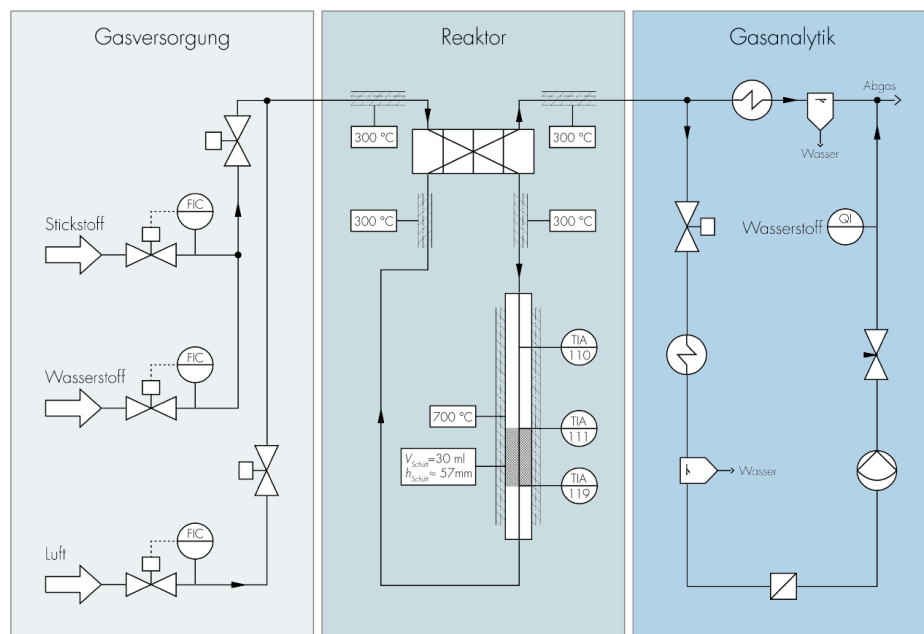


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Katalysatorversuchsstands

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Tests für verschiedene untersuchte Katalysatormaterialien dargestellt:

- Eisen(III)-Oxidhydroxid:
 - Mit den niedrigen Materialkosten und der quasi Schwefelresistenz ist es für die Anwendung sehr vielversprechend. Es wurden Tests in einem Temperaturbereich von 300 ... 800 °C; 1,5 ... 7,5 Vol-% H₂ in Luft; und Raumgeschwindigkeit (GHSV) 16.000 ... 67.000 h⁻¹ durchgeführt.
 - Die gemessene Starttemperatur der Reaktion konnte im Bereich 200 ... 300 °C ermittelt werden, während der H₂-Umsatz über 99,9% mit quasi null NO_x-Emissionen (unterhalb Nachweisgrenze) positiv bestimmt werden konnte. Im Versuch zeigte sich allerdings eine temperaturbedingte Degradierung der Schüttung, sodass das Material für diese Anwendung nicht geeignet ist.
- Nickel(II)-oxid:
 - Als industrieübliches Material kann Nickel in der Form als Nickeloxid mit mittleren Materialkosten bezogen werden. Es wurden Versuche mit 12,5 Vol-% H₂ in Luft bei einer GHSV von 67.000 h⁻¹ durchgeführt.
 - Die Zündtemperatur wurde mit 450 °C ermittelt, ab 500 °C wurde ein Umsatz über 99,9% erzielt.

- Aluminiumoxid (Inertschüttung):
 - Vorteilhaft bei diesem Material sind die Schwefeltoleranz, äußerst niedrigen Materialkosten und Zyklenbeständigkeit. Über Festkörperstrahlung kann die Verbrennung theoretisch im Material stabilisiert werden. Durch Versuche im Bereich GHSV 16.000 ... 67.000 h⁻¹ bei variierenden H₂ -Volumenanteilen im Bereich 5 ... 12,5 Vol-% konnte keine Stabilisierung im Material bei 700°C Reaktortemperatur erzielt werden.
- Edelmetallkatalysatoren:
 - Bekannt für eine hohe katalytische Aktivität (bereits 1981 untersucht durch M. Haruta und H. Sanozur), aber teils schwer beschaffbar und teuer. Da alle vorhergehenden Versuche gescheitert waren, wurde ein Katalysator mit 0,55 Palladium auf Al₂O₃ getestet. Um den Materialeinsatz gering zu halten, wurde mit einer deutlich höheren GHSV (80.000 bzw. 150.000) getestet, bei der bei einem H₂-Anteil größer 2 Vol% ein H₂-Umsatz größer 96% erzielt werden konnte.

Im Ergebnis der zahlreichen Untersuchungen wurde sich für den Edelmetallkatalysator entschieden, da dieser die niedrigen H₂-Anteile von 1 – 2 Vol% in Luft bereits bei geringen Temperaturen zuverlässig umsetzt und dadurch keine zusätzliche Beheizung des Purdegasbrenners benötigt wird.

Es wurde ein 3-D-Modell des Brenners als Grundlage zur Erstellung von Fertigungszeichnungen erstellt. Nach Fertigstellung des Stahlbaus für den katalytischen Brenner wurde dieser mit einem 4-fach Multithermoelement ausgestattet, dem Katalysator befüllt und am Versuchsstand auf die Kriterien Zündverhalten, H₂-Umsatz, und Druckverlust getestet.

In Abbildung 8 sind das 3-D-Modell, eine schematische Darstellung und der Stahlbau des katalytischen Purdegasbrenners dargestellt.

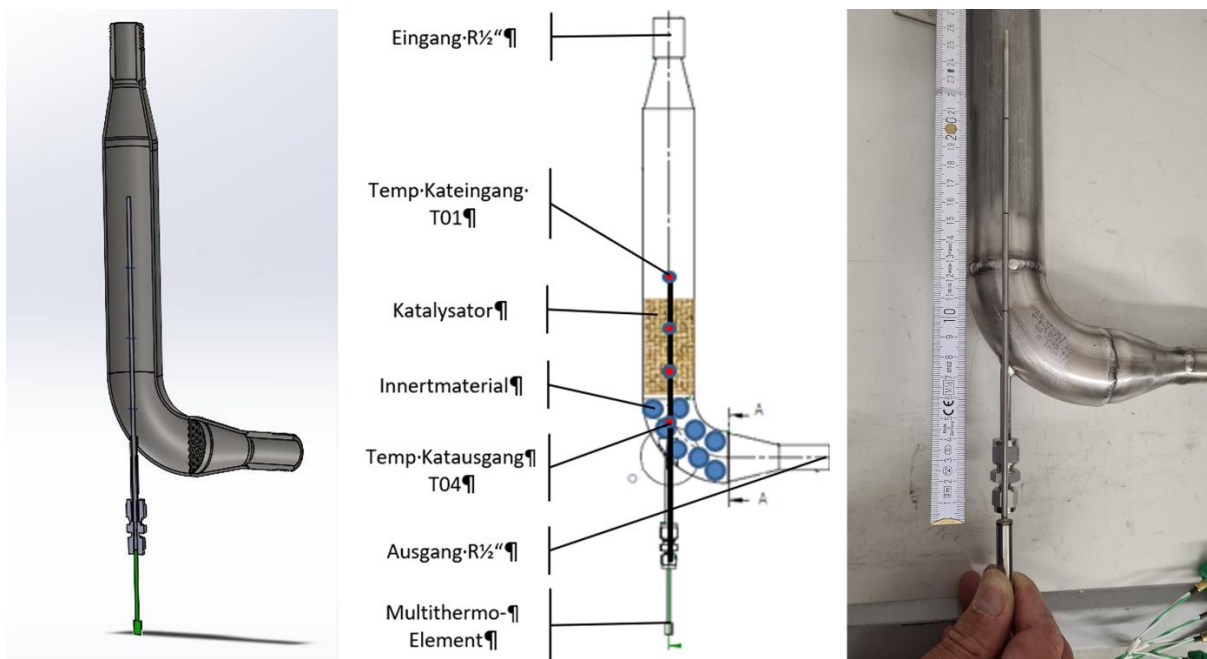


Abbildung 8: Modell und Stahlbau des katalytischen Purdegasbrenners

Bei der Charakterisierung des katalytischen Purdegasbrenners wurden die aus den Vorversuchen ermittelten Kenngrößen (Raumgeschwindigkeit, minimale Eintrittstemperatur des Gasgemischs) am Versuchsstand eingestellt. Als Variablen wurden die Eintrittstemperatur

und die H_2 -Konzentration im Gasgemisch untersucht. Exemplarisch sind in Abbildung 9 der H_2 -Umsatz sowie die Temperaturen und die Temperaturdifferenz im katalytischen Purgegasbrenner dargestellt.

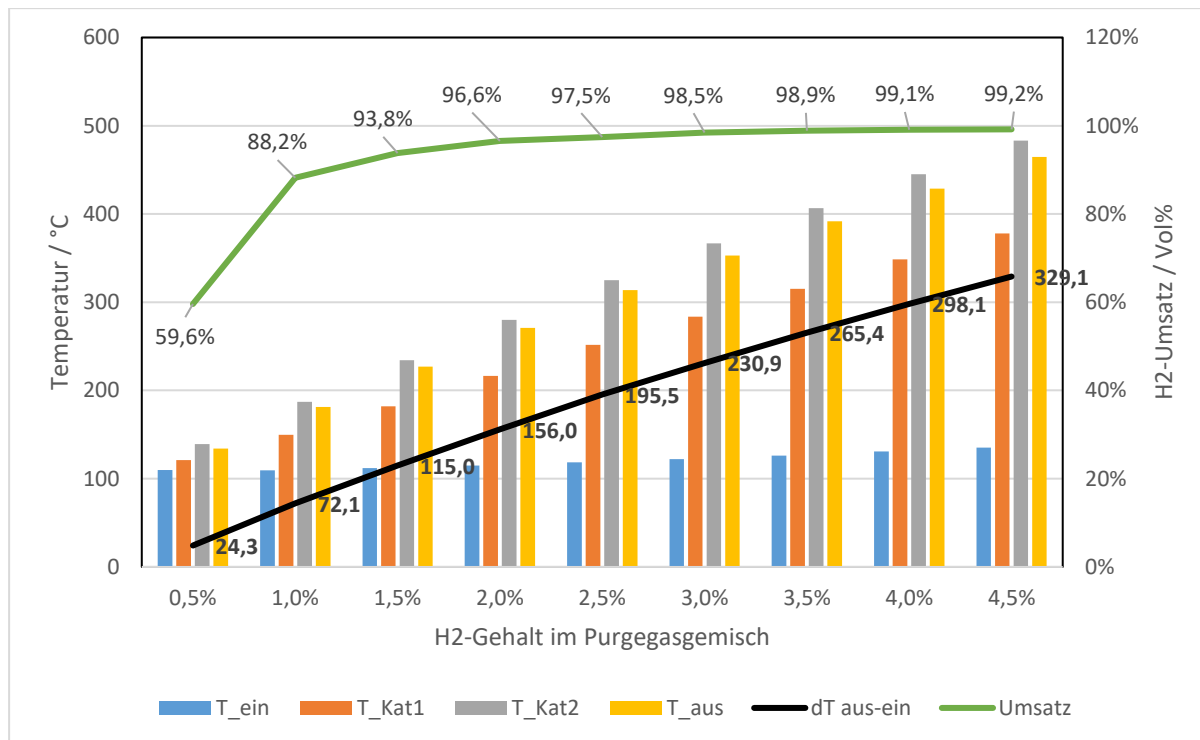


Abbildung 9: Temperaturen und Umsatz abhängig vom H_2 -Gehalt im Purgegasgemisch

So werden beispielsweise bei einem H_2 -Gehalt von 2 Vol-% im Purgegas und einer Eintrittstemperatur von $110\text{ }^{\circ}C$ ca. 96,6 % des H_2 umgesetzt und das Gasgemisch verlässt den Katbrenner mit einer Austrittstemperatur von ca. $270\text{ }^{\circ}C$. Die Abwärme auf entsprechendem Temperaturniveau dient dann in der BZ-Anlage zur Erwärmung des Purgegas-Luftgemischs. Der bei den Versuchen ermittelte maximale Druckverlust des katalytischen Purgegasbrenner lag bei 25 mbar und entsprach damit den Vorgaben.

Nach Abschluss aller Versuche wurde der katalytischen Purgegasbrenner dem Projektpartner inhouse engineering übergeben und in das Brennstoffzellensystem integriert. Abbildung 10 zeigt ein Foto der Brennstoffzellenanlage mit dem rot umrandeten katalytischen Purgegasbrenner inkl. elektrische Heizmanschette. Die elektrische Vorheizung ist nur im Startbetrieb notwendig, damit der Brenner sein optimales Betriebsfenster erreicht. Wird die Anlage dauerhaft betrieben, ist keine elektrische Beheizung notwendig.

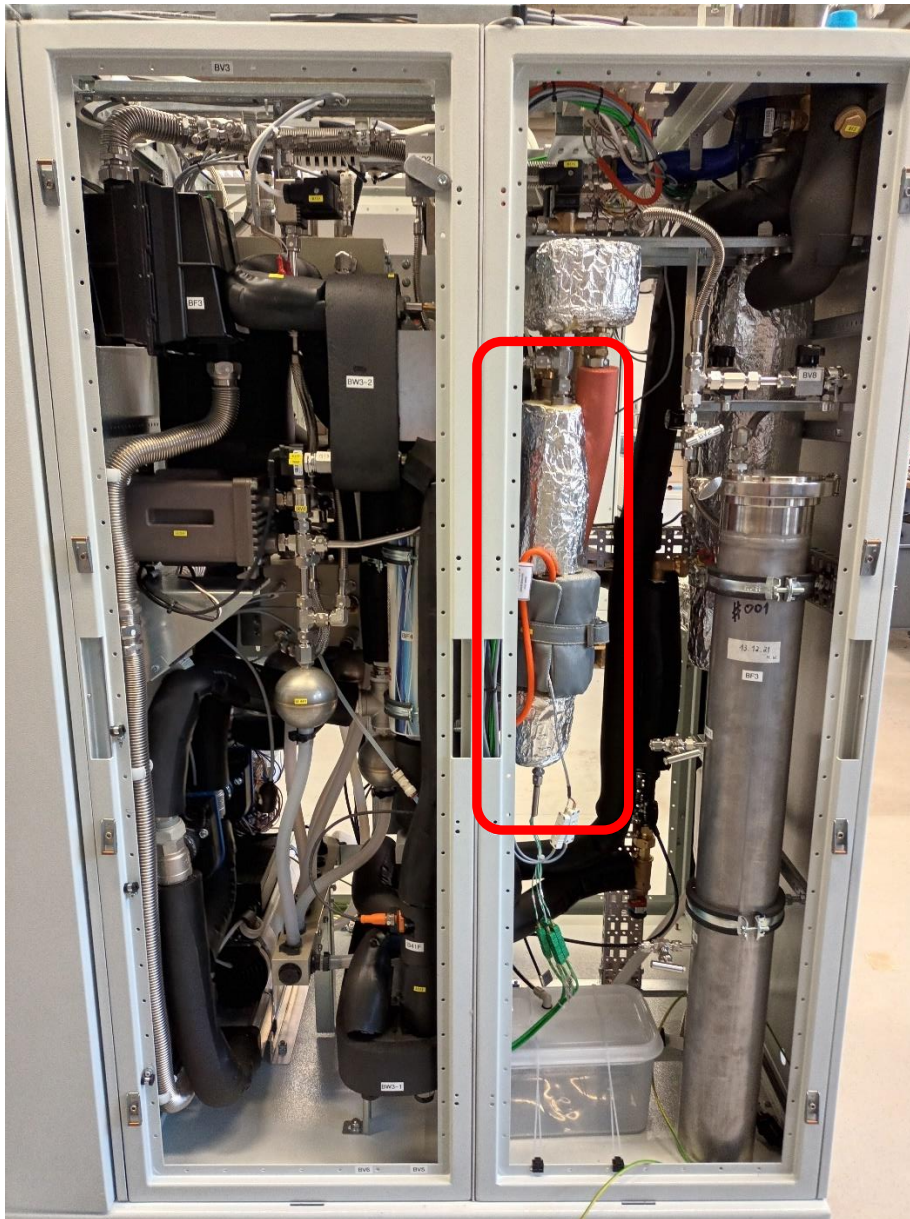


Abbildung 10: Brennstoffzellen-Anlage inkl. katalytischen Purgegasbrenner

Der Purgegasbrenner wurde im 1. Quartal 2022 mechanisch, sicherheitstechnisch und elektrisch beim Projektpartner inhouse engineering in das H₂-BHKW eingebaut. Nach der Inbetriebnahme konnte der Funktionstest erfolgreich abgeschlossen werden. Das H₂-BHKW inkl. katalytische Purgegasbrenner wurde im 2. Quartal 2022 an das ENGIE Lab Crigen in Paris geliefert und die Erst-Inbetriebnahme des Gesamt-Systems fand im Juni 2022 bei ENGIE unter teilweise noch provisorischen BHKW-Anschlussbedingungen statt.

Die finale Inbetriebnahme der H₂-BHKW erfolgte im Dezember 2022, nachdem ein sicherheitstechnisches Gutachten wurde unter Mitwirkung von Bureau Veritas, ENGIE Lab Crigen und INHOUSE erstellt und dieses vom zuständigen Sicherheitsingenieur abgenommen wurde.

Nach der Inbetriebnahme der H₂-BHKW im Dezember 2022 bei Engie in Paris arbeitete der katalytische Purgegasbrenner zuverlässig und störungsfrei. Eine zusätzliche Beheizung des Purgegasbrenner zur Einhaltung der Betriebstemperatur war im Dauerbetrieb nicht notwendig.

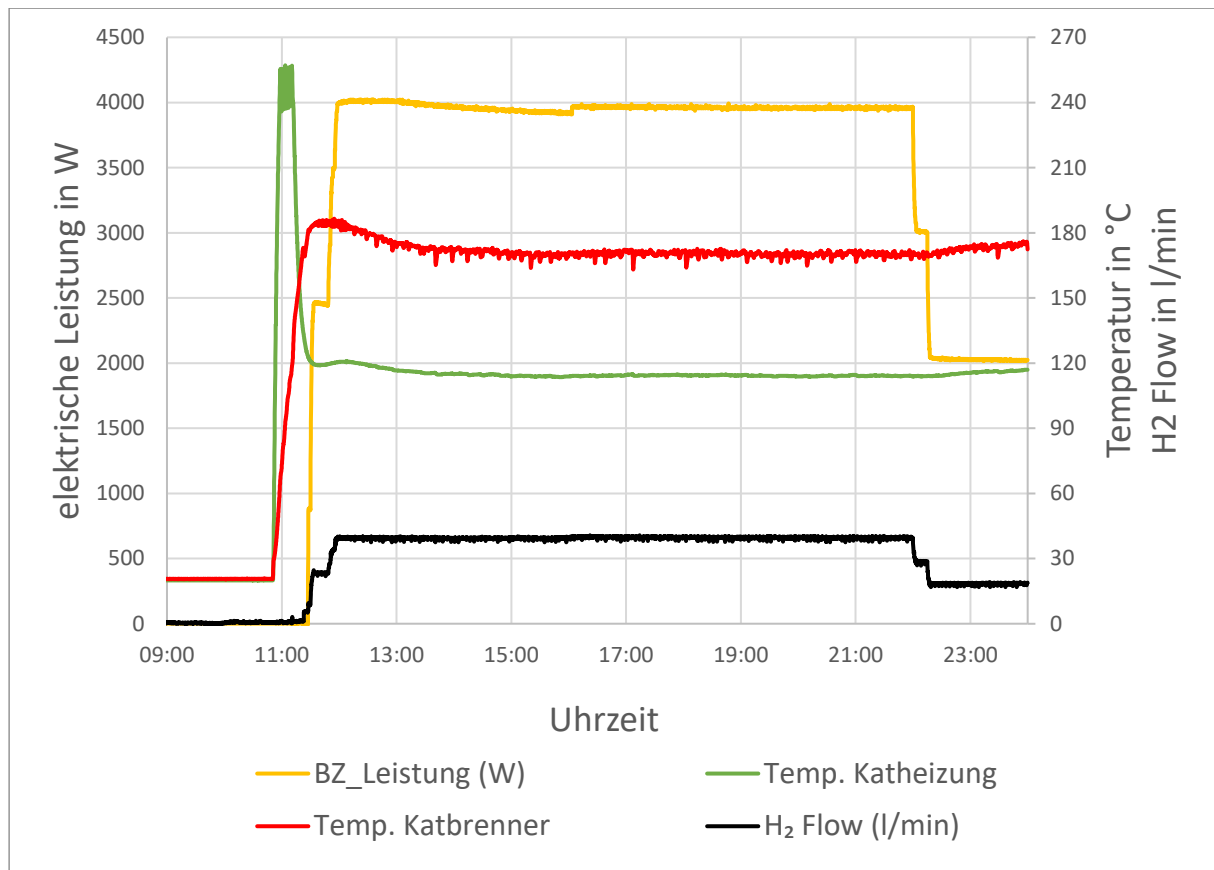


Abbildung 11: Temperaturverlauf im katalytischen Brenner im Brennstoffzellenbetrieb

In Abbildung 11 ist der typische Verlauf bei Start der Brennstoffzelle dargestellt. Kurz vor 11 Uhr wird die Anlage gestartet, was gut am Anstieg der grünen Kurve (Temperatur Katalysatorheizung) zu erkennen ist. Dadurch wird der Katalysator (rote Kurve) elektrisch bis auf 120 °C aufgeheizt. Dann kann dem Katalysator H₂ zugeführt werden, welcher dort umgesetzt wird und einen weiteren Temperaturanstieg im Katalysator auf ca. 180 °C bewirkt. Die elektrische Beheizung ist dann bereits aus, die Brennstoffzellenanlage verbraucht H₂ (schwarze Kurve steigt auf ca. 20 l/min) und produziert Strom (gelbe Kurve steigt auf 2500 W). Im nachfolgenden Brennstoffzellenbetrieb mit wechselnder Brennstoffzellenleistung bleibt die Katalysatortemperatur konstant bei ca. 170 °C.

Dieser Temperaturverlauf ist reproduzierbar im gesamten bisherigen Anlagenbetrieb, was auf eine stabile thermische Umsetzung des Purge-H₂ im katalytischen Brenner schließen lässt.

Während des gesamten Betriebszeitraum kam es zu keinen Störungen beim Betrieb des katalytischen Purgegasbrenners und auch eine Degradation des Katalysators konnte nicht festgestellt werden.

d) Entwicklung und Integration eines H₂-Spitzenlastbrenners in das H₂-BHKW zur Bereitstellung von Wärme unabhängig vom Brennstoffzellenbetrieb

Die Aufgabe des Spitzenlastbrenners ist die Bereitstellung von Wärme unabhängig vom Brennstoffzellenbetrieb. Damit soll sichergestellt werden, dass die Wärmeversorgung des Gebäudes jederzeit sichergestellt werden kann, auch wenn die Abwärme der Brennstoffzelle z.B. im Winter nicht ausreichend ist.

Im ersten Schritt wurde ein Konzept eines katalytischen Brenners untersucht, mit dem Ziel, nur einen Brenner für die katalytische Nachverbrennung des im Brennstoffzellenbetrieb anfallenden wasserstoffhaltigen Purgegas und den Spitzenlastbrenner zu realisieren.

Es wurde ein Modell des Brenners erstellt, um durch Parametervariationen die optimale Brennerkonstruktion zu ermitteln, bei der eine gute Vermischung der Gasströme bei möglichst geringen Druckverlusten erreicht werden kann, siehe Abbildung 12.

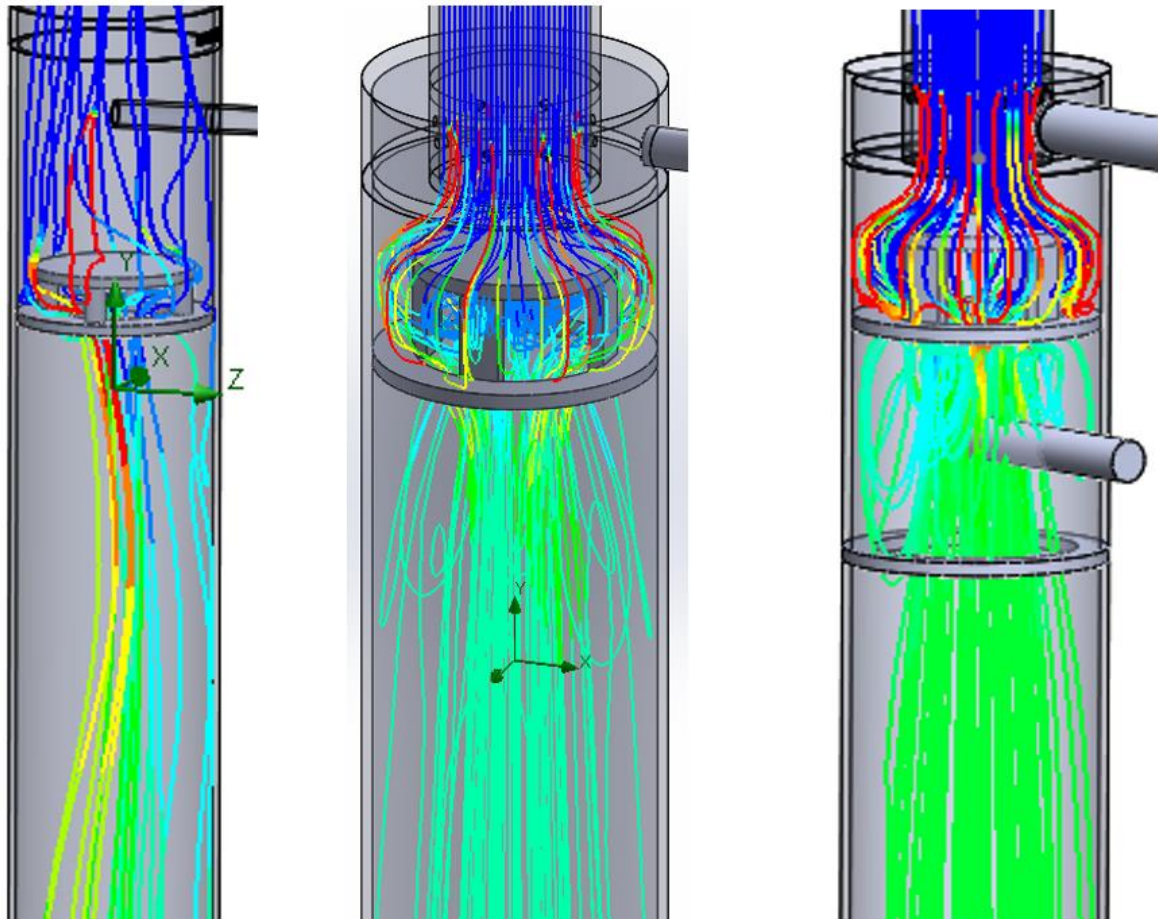


Abbildung 12: Qualitative Darstellung der simulierten Stromlinien des Brenners

In Abbildung 12 ist die H_2 -Konzentration in Regenbogenkodierung (blau=Luft, Rot= H_2), ausgewählte Iterationsstufen dargestellt: zentrale H_2 -Zuführung (links), H_2 -Zuführung über Ringspalt (Mitte), H_2 -Zuführung über Ringspalt mit zusätzlicher Prallplatte für optimierte Vermischung (rechts).

Es ist erkennbar, dass aufgrund des geringen Impulses von Wasserstoff eine einfache zentrale Zuführung keine gute Vermischung gewährleistet, sodass die Entwicklung einer aufwändigen Verteilkammer notwendig wurde. Diese beinhaltet mehrere Wasserstoffzuführungen in Kombination mit mehreren spontanen Querschnittänderungen und gewährleistet eine perfekte Durchmischung auf einer Wegstrecke von weniger als 100 mm.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen insgesamt Schwachstellen bzgl. Betriebsstabilität im angestrebten Leistungsbereich auf. Ein Rückzünden des katalytischen Brenners in die Mischkammer konnte nicht sicher ausgeschlossen werden, womit die Betriebssicherheit nicht gewährleistet werden kann. Umfangreiche Versuche zur Vormischkammer wären notwendig gewesen, um weitere sicherheitstechnischen Maßnahmen zu überprüfen und das Prozessverhalten der Vormischkammer zu identifizieren und damit die Simulation zu

validieren. Auch das Verhalten der sicherheitstechnischen Überwachung des Startbrenners, der den katalytischen Brenner startet, sowie das Verhalten beim Purgebetrieb konnte ohne Laborversuche nicht geklärt werden. Durch die massiven Covid19-bedingten Einschränkungen im Labor, die offenen Unsicherheiten und den dadurch entstandenen Zeitverzug, wurde entschieden, das Konzept eines katalytischen Spitzenlastbrenners nicht weiter zu verfolgen. Als Alternative wurde das Konzept eines Diffusionsbrenners verfolgt, von dem bekannt ist, dass es Standardsicherheitskomponenten gibt und kein Rückzünden stattfinden kann.

Durch den beschriebenen Konzeptwechsel beim Spitzenlastbrenner (Wechsel vom katalytischen Brenner zu einem Diffusionsbrenner) musste ein komplett neues Brennerkonzept erstellt werden, welches mit den Partnern, insbesondere inhouse engineering als Ersteller des Gesamtsystems (Brennstoffzellensystem inkl. H₂-Spitzenlastkessel), abgestimmt wurde.

Dies betraf alle konstruktiven Maßnahmen, die einen reibungsfreien Einbau des H₂-Spitzenlastkessel in die Anlage gewährleisten (Ergonomie, Wartungsarbeiten, Platzbedarf, Medienschnittstellen, Messstellen, usw.) und auch das Sicherheitskonzept der Gesamtanlage. Gemeinsam mit allen Partnern wurden umfangreiche HAZOP Analysen durchgeführt und ein finales Sicherheitskonzept erstellt. Parallel dazu wurde mit der Detailplanung und Erstellung der Konstruktionsunterlagen für den H₂-Spitzenlastbrenner begonnen. In enger Abstimmung mit dem Projektpartner inhouse engineering wurden alle Schnittstellen zwischen Brennstoffzellenmodul und H₂-Spitzenlastbrenner definiert und ein 3-D Modell der Gesamtanlage erstellt. In *Abbildung 13* ist das CAD Modell des H₂-Spitzenlastbrenners inkl. Abgasführung sowie Zünd- und Überwachungseinrichtungen dargestellt. Bei der Konstruktion wurde ein besonderer Schwerpunkt auf eine gute Integration des Brenners in die Brennstoffzellenanlage gelegt, um optimale Wege zum Anschluss aller Medien (H₂, Abluft vom Stack, Luftzufuhr vom Verbrennungsluftgebläse, Kühlkreislauf, Abgas) garantieren zu können. Weiterhin sollte eine gute Zugänglichkeit zu den Komponenten gewährleistet werden, welche im Rahmen einer Wartung geprüft/gewechselt werden müssen (Zündelektrode, UV-Überwachung, Sauerstoffsonde).

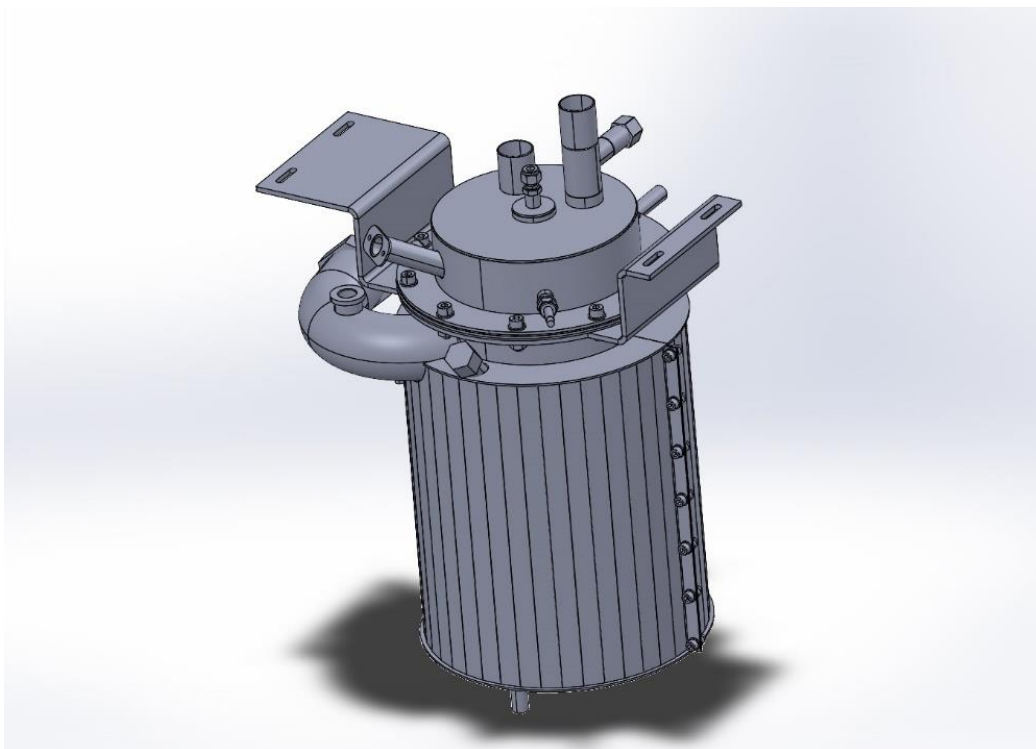


Abbildung 13: 3D- Modell des Spitzenlastbrenners

Nach Abschluss der 3D-Konstruktion wurden Details zur Fertigung (Materialauswahl, Schweißreihfolge) mit dem Fertiger abgestimmt und anschließend die Fertigungszeichnungen erstellt.

Leider verzögerte sich die Fertigstellung des H₂-Brenners durch den Lieferanten aufgrund von Krankheit und Beschränkungen durch die COVID-19-Pandemie. Der Montage des H₂-Spitzenlastbrenners wurde im 3. Quartal 2021 fertiggestellt und anschließend am DBI-Brennerversuchsstand montiert. In Abbildung 14 sind die Montage des Brenners und die Integration auf dem Brennerprüfstand dargestellt.



Abbildung 14: H₂-Spitzenlastbrenner beim Schweißen und auf dem Brennerversuchsstand

Parallel zur Fertigung des H₂-Spitzenlastbrenners wurden die Komponenten zur Gasregelstrecke und Luftversorgung sowie die Zünd- und Überwachungseinrichtungen ausgewählt und beschafft, sowie der Versuchsstand aufgebaut.

Die Inbetriebnahme und der Funktionstest des H₂ Spitzenlastbrenners verzögerte sich ebenfalls durch massive Beschränkungen im Laborbetrieb während der COVID-19-Pandemie.

Durch den eingetretenen Zeitverzug konnte der geplante Auslieferungstermin des H₂-Spitzenlastbrenners an inhouse zur Integration in das H₂-BHKW nicht eingehalten werden. Um dennoch einen Betrieb des H₂-BHKW in Paris realisieren zu können, wurde gemeinsam mit allen Projektpartnern entschieden, dass das H₂-BHKW zunächst ohne den Spitzenlastbrenner in Paris installiert und erprobt werden soll.

Das am DBI-Versuchsstand umfangreich getestete System aus Spitzenlastbrenner und Abgaswärmeübertrager wurde im August 2023 dem Projektpartner inhouse in Berlin übergeben. Parallel dazu wurde das H₂-BHKW wie geplant beim Projektpartner Engie in Paris außer Betrieb genommen und ebenfalls zu inhouse nach Berlin transportiert. Neben weiteren Arbeiten am BZ-Stack wurde der H₂-Spitzenlastbrenner in das vorbereitete System integriert und notwendige Anpassungsarbeiten am Mess-, Steuerungs- und Überwachungssystem vom Projektpartner inhouse realisiert.

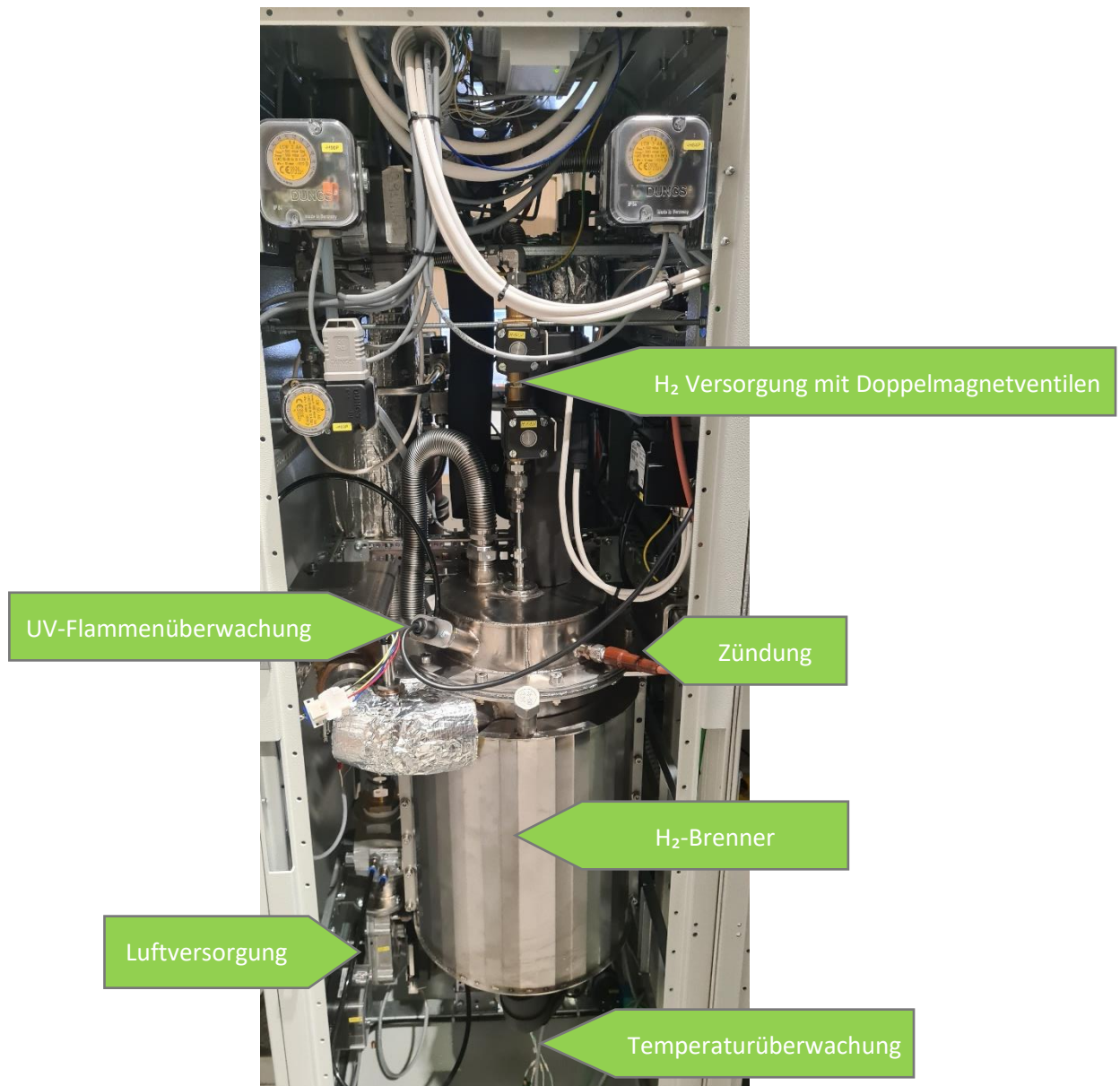


Abbildung 15: H₂-Spitzenlastbrenner im BHKW integriert

Die Inbetriebnahme und der Probebetrieb des gesamten BHKW mit Spitzenlastbrenner konnten im Dezember 2023 erfolgreich abgeschlossen und der Rücktransport zu Engie nach Paris vorbereitet werden.

Nachdem das H₂-BHKW wieder in Paris an die Infrastruktur angeschlossen und betriebsbereit war, konnte im Januar 2024 die Gesamtanlage inkl. Spitzenlastbrenner in Betrieb genommen werden. Mit den Partnern wurde die weitere Betriebsweise des Systems abgestimmt. Die Anlage soll von Mo. bis Fr. im Dauerbetrieb arbeiten. In der Zeit von 8:00 bis 20:00 Uhr mit einer elektrischen Leistung von 4 KW, in der restlichen Zeit mit einer Leistung von 2 kW. Der H₂-Spitzenlastbrenner wird von Dienstag bis Freitag jeweils für eine Stunde von 13:00 bis 14:00 Uhr zugeschaltet.

Parallel zu dieser Betriebsführung wurden noch die Odorierung und die Deodorierung mit verschiedenen Einstellungen gefahren, um Auswirkungen auf den BZ-Stack zu ermitteln. Diese Angaben sind im Bericht des Partners INHOUSE näher beschrieben.

In der nachfolgenden Abbildung 16 sind einige Messwerte im Betriebsfenster des Spitzenlastbrenners exemplarisch dargestellt.

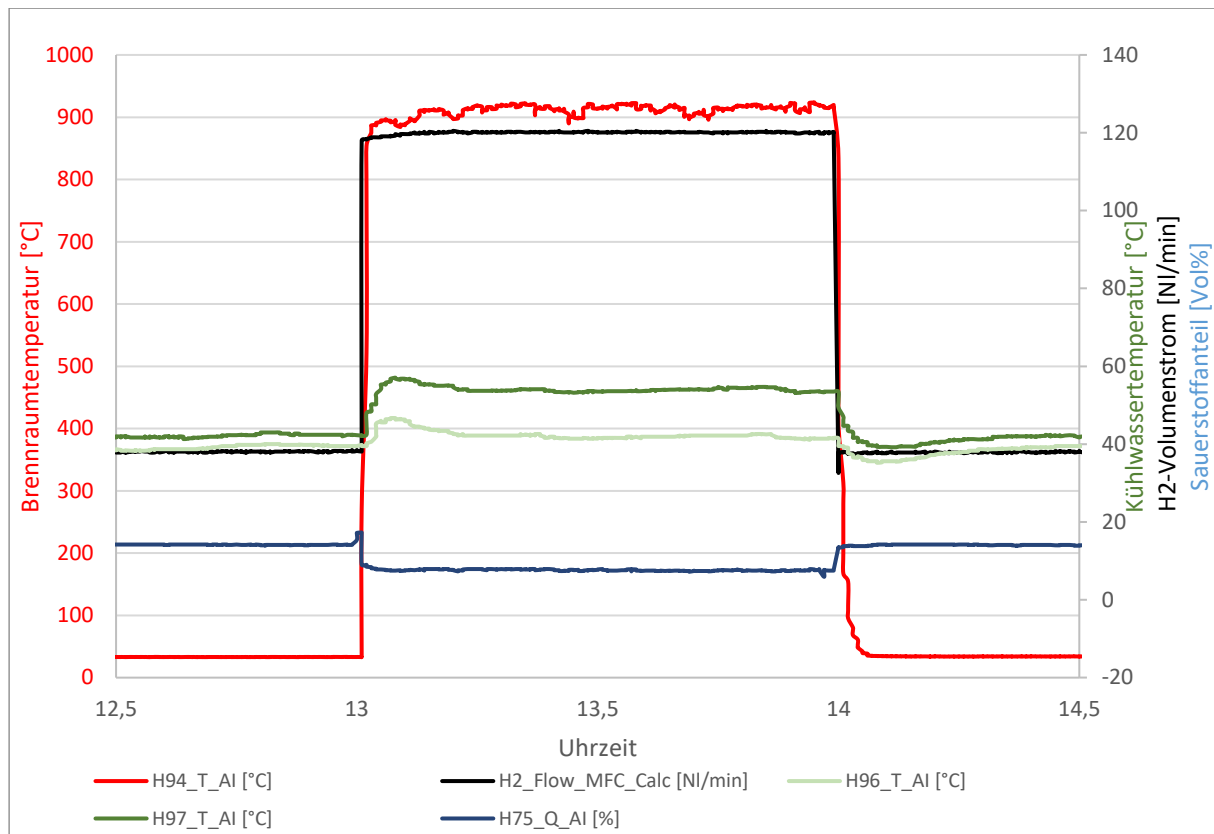


Abbildung 16: Messwerte beim Betrieb des H₂-Spitzenlastbrenners

Im Diagramm sind die Brennraumtemperatur (rot), der H₂-Volumenstrom (schwarz), die Kühlwasservor- und -rücklauftemperatur (grün), sowie der Sauerstoffgehalt im Abgas (blau) der Brennstoffzellenanlage während des Betriebes des H₂-Spitzenlastbrenners im Zeitraum von 13:00 bis 14:00 Uhr dargestellt.

Im gesamten betrachteten Zeitraum arbeitet die Brennstoffzelle mit einer konstanten elektrischen Leistung von 2 kW. 13:00 Uhr wird der Spitzenlastbrenner gestartet und für eine Stunde betrieben. Der H₂-Volumenstrom (schwarze Kurve) steigt bei Brennerzuschaltung sprunghaft von 39 l/min auf 120 l/min. Der blau dargestellte Sauerstoffanteil im Abgas der Brennstoffzellenanlage sinkt parallel dazu von ca. 14 Vol% im Brennstoffzellenbetrieb auf 8 Vol% im Parallelbetrieb von Brennstoffzelle und H₂-Spitzenlastbrenner. Gut zu erkennen ist auch der kurzzeitige Anstieg des Sauerstoffanteils 13:00 Uhr beim Start des Brenners für ca. 1 min, was der Vorspülzeit des Brenners entspricht. Anschließend zündet der Brenner und sowohl die Brennraumtemperatur (rot), als nachfolgend auch die Kühlwassertemperaturen steigen auf ein konstantes Niveau. Beim Ausschalten des Brenners gegen 14 Uhr sinkt der der H₂-Volumenstrom wieder auf den Wert von 39 l/min, was dem Bedarf der Brennstoffzelle bei einer elektrischen Leistung von 2 kW entspricht. Auch die restlichen Werte für Temperatur und Sauerstoffanteil im Abgas pegeln sich wieder auf den Werten vor dem Betrieb des Spitzenlastbrenners ein.

Dieses Verhalten des Brenners konnte reproduzierbar bei verschiedenen Lastzuständen der Brennstoffzelle nachgewiesen werden. Bis zum Ende der Projektlaufzeit wurde das Betriebsregime beibehalten und der Brenner so insgesamt über 39 Zyklen betrieben. Dabei kam es zu keinen Störungen beim Betrieb des Spitzenlastbrenners.

II.1.2. Arbeitspaket 5 - Installation, Test und Inbetriebnahme des Gesamtsystems im Living Lab

Für die Datenerfassung und Aufzeichnung wurde in Zusammenarbeit mit allen Partnern ein IT-Konzept entwickelt. Ziel war die Erfassung, Speicherung und Darstellung aller Messwerte auf einem PC. Dieser zentrale PC diente gleichzeitig zur Steuerung der Anlage vor Ort. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Systemen (Brennstoffzellen-BHKW, Odorianlage, Wärmemanagement) erfolgte über ein Netzwerk. In Abbildung 17 ist das Konzept graphisch dargestellt.

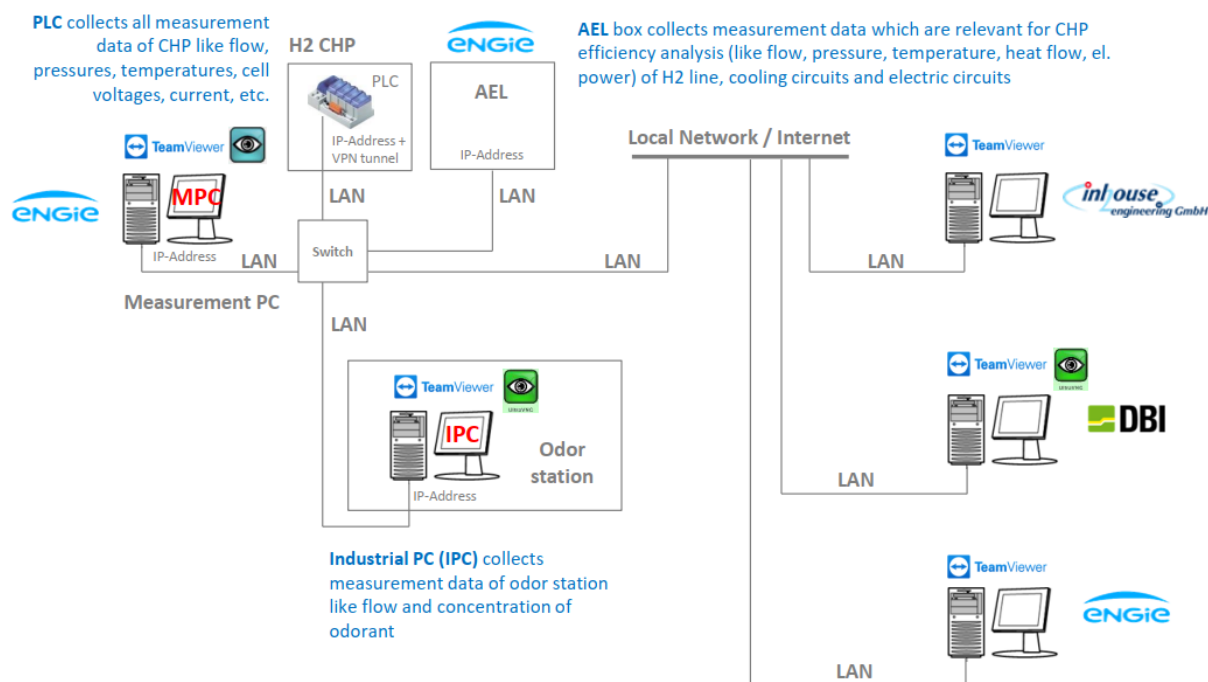


Abbildung 17: Monitoring und Datenspeicherung

Neben der IT-Anbindung im Testlabor bei Engie in Paris wurden gesicherte Teamviewer-Zugänge für die Projektpartner eingerichtet, damit ein Monitoring der Anlagen aus der Ferne möglich ist. Das System funktioniert zuverlässig und gewährleistet eine komfortable Steuerung und Überwachen der Anlagen aus der Ferne. Zur Sicherung und Archivierung wurden die Messdaten zusätzliche in regelmäßigen Abständen auf einem Cloud-Server des DBI gespeichert.

Die Planung für die gebäudeinternen Wasserstoffinfrastruktur wurde durch DBI in Zusammenarbeit mit den Projektpartner ENGIE und inhouse engineering durchgeführt. Es wurden ein R&I-Schema (*Abbildung 18*) der H₂-Versorgungstrecke für das H₂-BHKW in Paris erstellt und eine Komponentenliste an ENGIE übergeben.

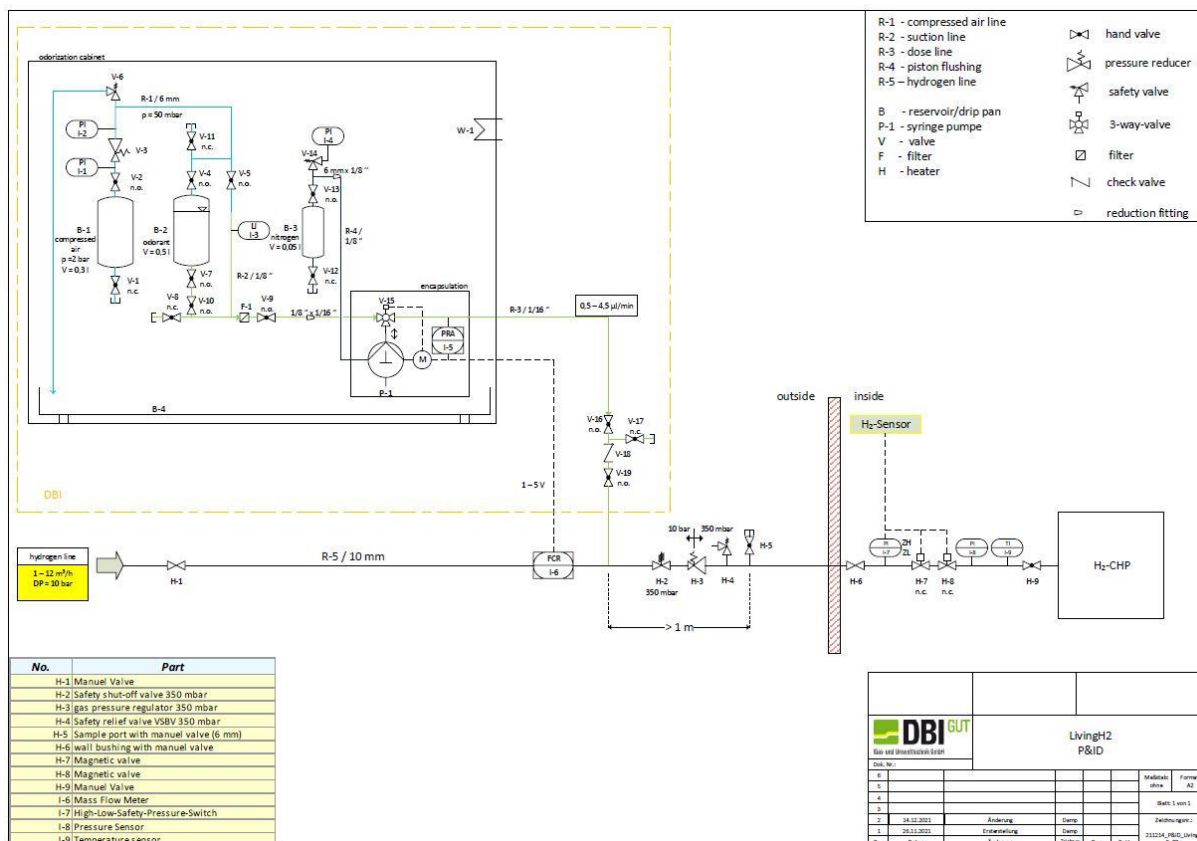


Abbildung 18: R&I-Schema der Wasserstoffversorgung

Für die H₂-Versorgungsleitung wurden verschiedene Aufstellkonzepte diskutiert und schlussendlich eine Lösung gefunden, wie eine sicherheitskonforme Ausführung der H₂-Regelstrecke inkl. μ-Odrierstation realisiert werden kann.

Nach Installation der μ-Odrierstation und Einbindung in das Netzwerk erfolgte die Kopplung mit dem H₂-Durchflussmesser, damit die μ-Odrierstation in Abhängigkeit vom tatsächlichen H₂-Durchfluss die korrekte Menge an Odorierungsmittel dosieren kann. Abbildung 19 zeigt die Bedienoberfläche der μ-Odrierstation, in der der aktuelle Status dargestellt, die Dosierrate eingestellt und sämtliche Messwerte und Statusmeldungen aufgezeichnet werden.

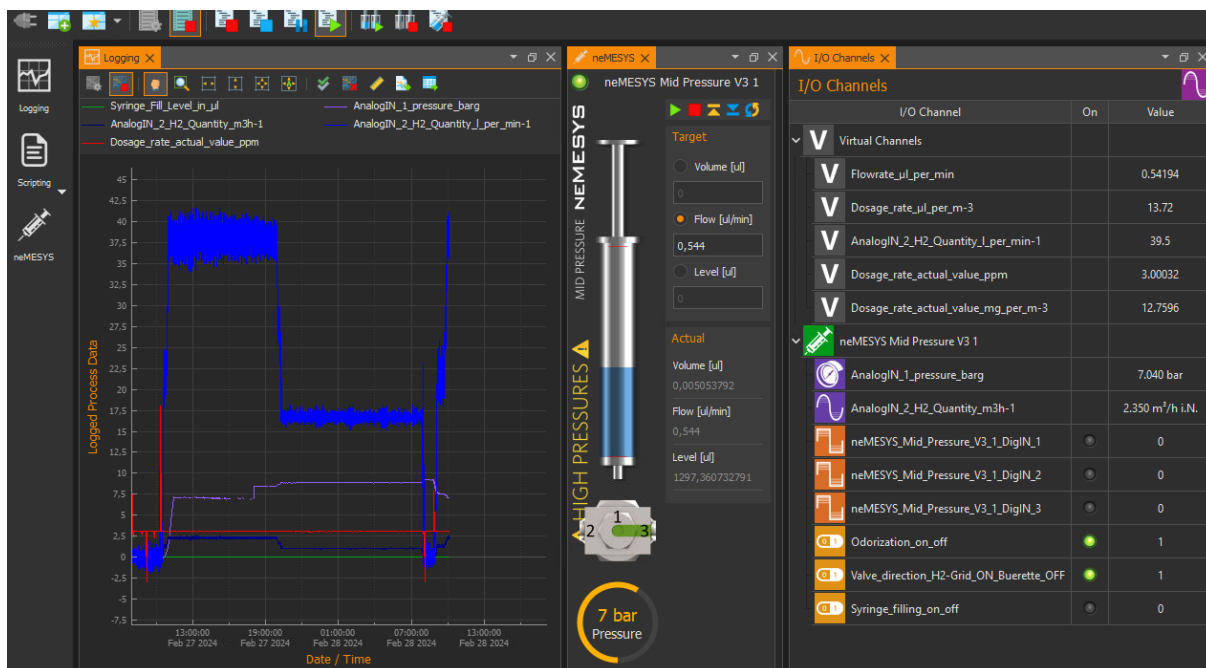


Abbildung 19: Bedienoberfläche der μ -Odorierstation

Bei der Inbetriebnahme und den ersten Versuchsfahrten des H₂-BHKW mit odorisiertem H₂ im Dezember 2022 wurde die korrekte Dosierung zusätzlich durch eine Gasanalyse des H₂-Volumenstroms mittels Gaschromatograph überprüft.

In *Abbildung 19* kann über die Bedienoberfläche der μ -Odorierstation der typische Betriebsverlauf des H₂-BHKW nachvollzogen werden. Die blaue Kurve stellt den H₂-Volumenstrom an der Odorierstation über einen Zeitraum von 7 Tagen dar. Gut zu erkennen sind die unterschiedlichen Laststufen mit denen das Brennstoffzellen-BHKW betrieben wurde. Zu Beginn wurde die Brennstoffzelle gestartet und anschließend die Leistung schrittweise von 5 kW auf 1,5 kW reduziert. Nach Abschalten der Brennstoffzelle über das Wochenende, wurde die Anlage in der kommenden Woche kontinuierlich betrieben (von 08 bis 20 Uhr mit 4 kW und in der Nacht von 20 bis 8 Uhr mit 2 kW).

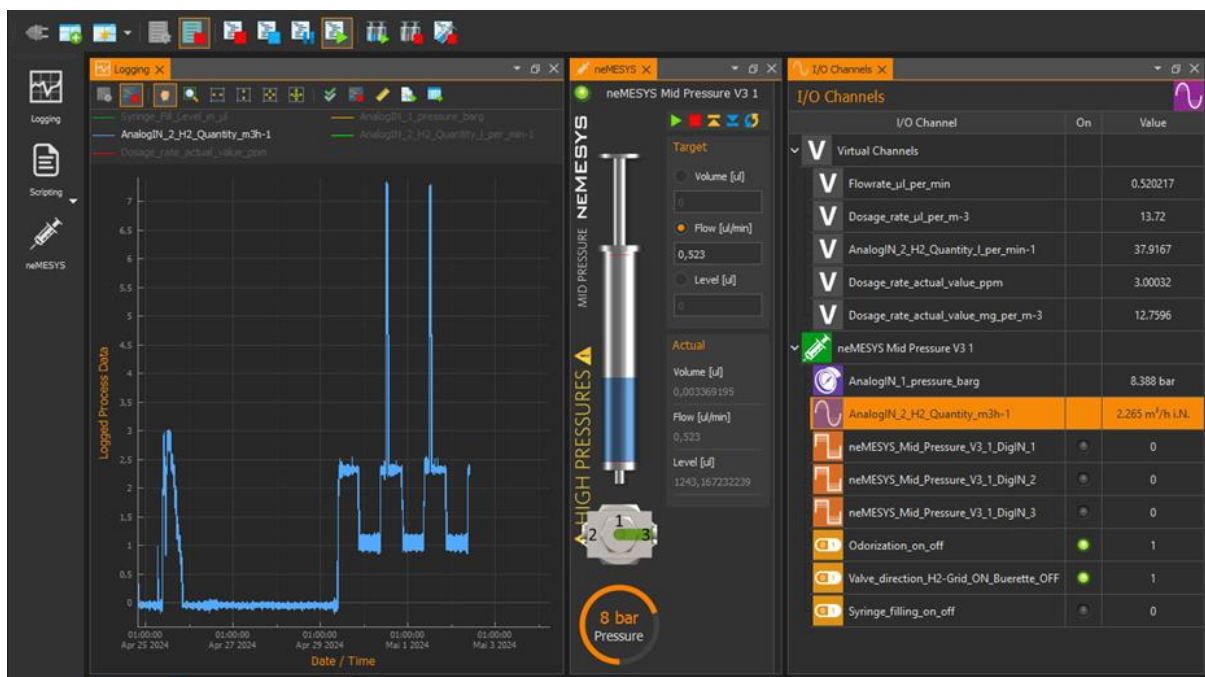


Abbildung 20: Bedienoberfläche der µ-Odorierstation

Im Rahmen der Testungen wurde die Anlage über Fernzugriff betrieben und gesteuert. Die von der µ-Odorieranlage während des Betriebes verarbeiteten Prozessdaten werden gespeichert und abgelegt. In *Abbildung 21* ist eine Auswertung der Datenaufzeichnung, die im Rahmen von Untersuchungen zum Einfluss des Odoriermittels auf das Brennstoffzellen BHKW stattgefunden haben, dargestellt.

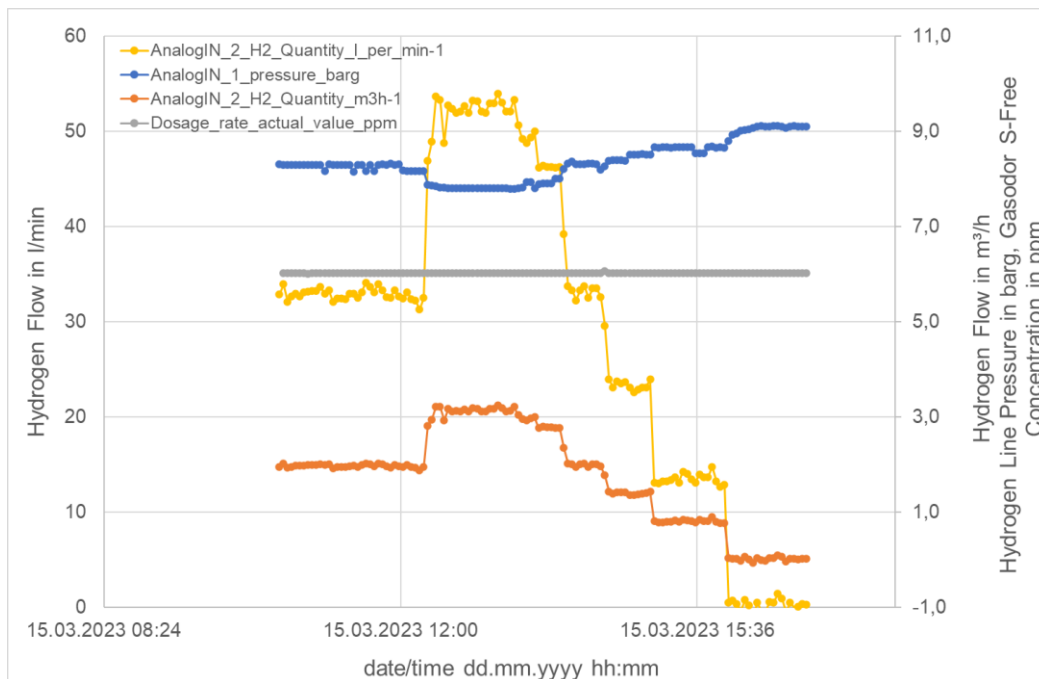


Abbildung 21: Volumenstrom, Druck und Konzentrations-Zeit-Verläufe der µ-Odorieranlage

Während des Testbetriebes aus der Ferne besteht keine Möglichkeit zur Messung der Odoriermittelkonzentration in der Gasphase. Die Konzentration wurde im System vorgegeben und in Abhängigkeit der Wasserstoffmenge dosiert. *Abbildung 21* zeigt, dass die Konzentration des Odoriermittels in der Gasphase bei deutlich unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Wasserstoffmengenstrom und Druck) konstant gehalten wird.

Folglich kann der Wasserstoff direkt mengenproportional odoriert werden, so dass im Ergebnis eine konstante und damit eine gleichstarke Riechbarkeit gewährleistet werden kann.

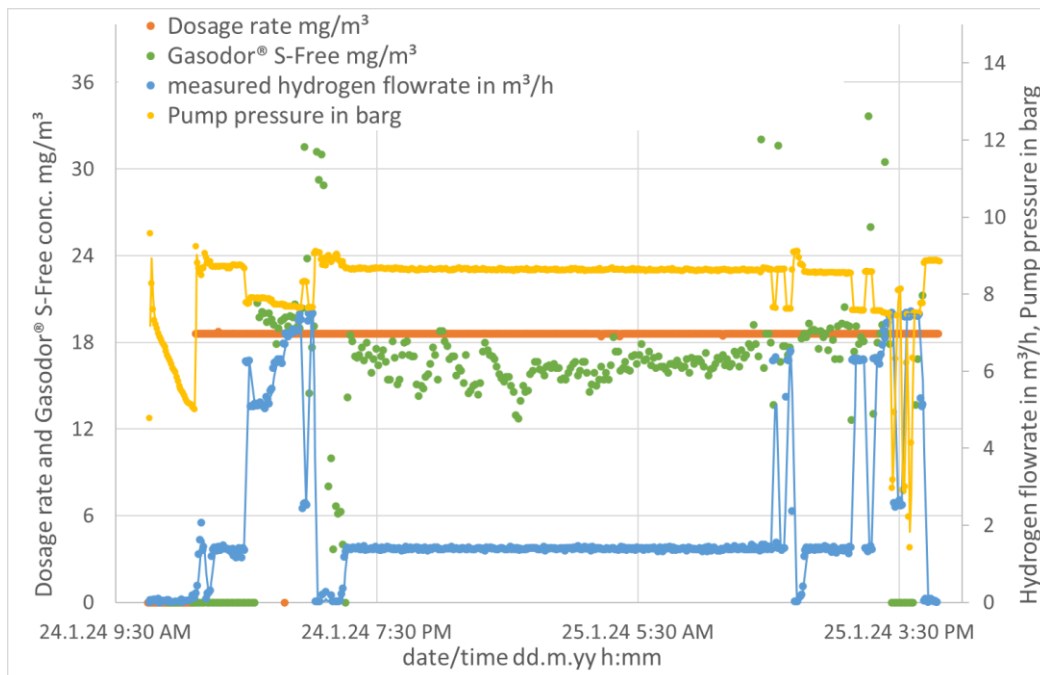


Abbildung 22: Konzentrations-Zeit-Verläufe Dosierung und Odoriermittelkonzentration

Abbildung 22 zeigt den Verlauf der wesentlichen Prozessparameter im Betrieb der μ -Odorieranlage. Konkret ist in Gelb der Druck an der Dosierstelle bzw. der Pumpendruck dargestellt. Die blaue Kurve zeigt die Wasserstoffmenge und die grüne Kurve die gemessene Konzentration des Odoriermittels in der Gasphase. Trotz der sehr geringen Menge Wasserstoff, die zu odorieren ist, zeigt sich eine vergleichsweise konstante Konzentration des Odoriermittels. Die Messungen erfolgten bei Arbeiten vor Ort mittels eines mobilen Gaschromatographen (Abbildung 23).

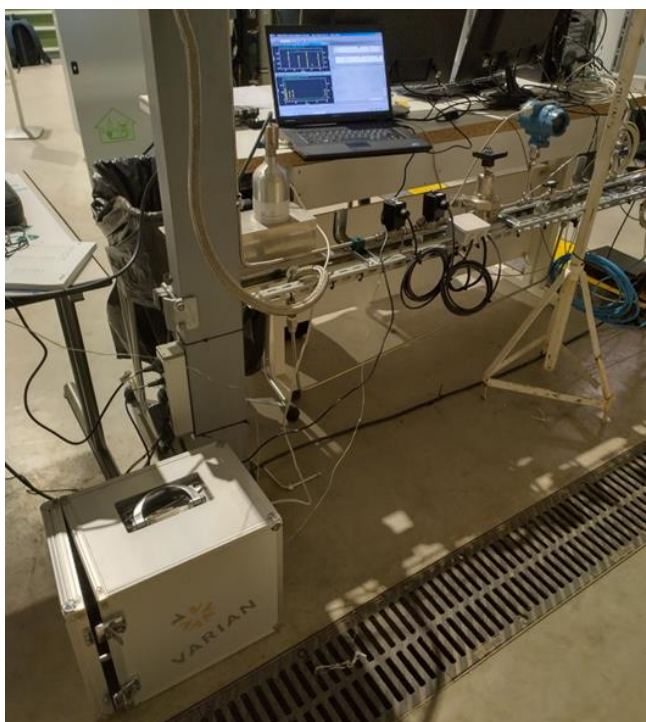


Abbildung 23: Messung der Odoriermittelkonzentration vor Ort im Engie Lab Crigen

Abbildung 24 zeigt stellvertretend die im Gas vor Ort gemessene Konzentration des Odoriermittels. Diese wurde unmittelbar vor dem Eintritt in das Brennstoffzellen BHKW erfasst.

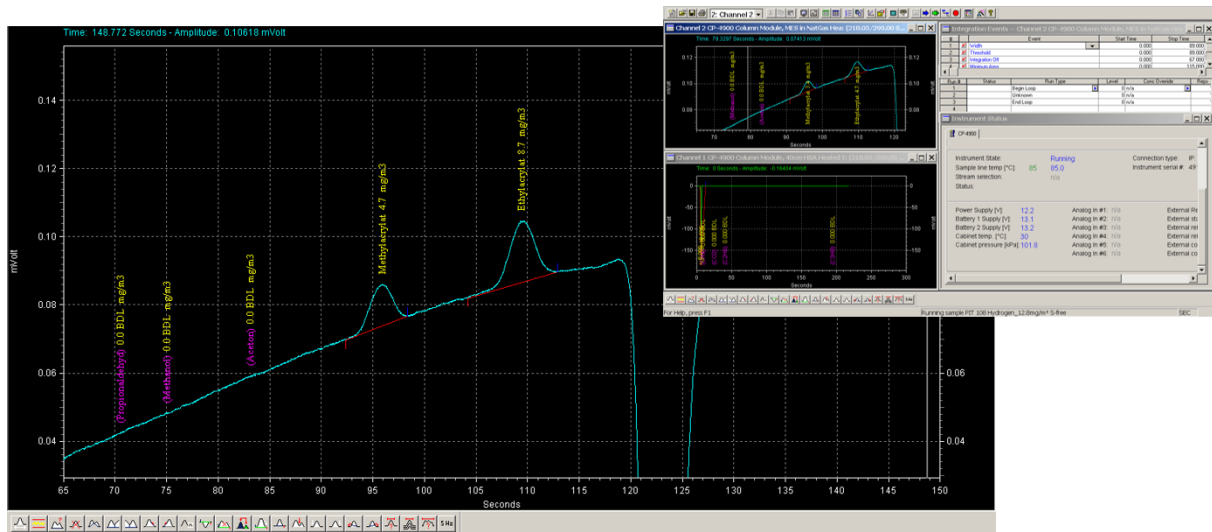


Abbildung 24: Chromatogrammausschnitt – im Gas gemessene Odoriermittelkomponenten

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die μ -Odorierstation sehr zuverlässig auch kleinste Mengen an Wasserstoff odorieren kann und ein störungsfreier Anlagenbetrieb auch aus der Ferne erfolgreich nachgewiesen werden konnte.

Gleiches gilt für die Deodorierung. Bei den gaschromatografischen Analysen wurde die Gaszusammensetzung des H_2 -Volumenstroms auch an einer Messstelle im BHKW nach der Deodorierungseinheit überprüft, um festzustellen, ob die Deodorierung ordnungsgemäß arbeitet. Dies war der Fall, denn es konnten keine Spuren von Odorierungsmittel in dieser Gasanalyse nachgewiesen werden.

II.1.3. Arbeitspaket 7 - Verwertung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Zur Veröffentlichung der Ergebnisse wurden zahlreiche Veröffentlichungen, sowohl auf Webseiten als auch auf verschiedenen Veranstaltungen und Messen durchgeführt. Die von den Projektpartner realisierten Veröffentlichungen sind in Anlage 1 aufgeführt.

Zusätzlich wurde durch das European Research Institute for Gas and Energy Innovation AISBL (ERIG) entsprechend den Aufgaben im AP 7 weitere Veröffentlichungen und Informationsunterlagen zu dem Projekt erstellt. Die Inhalte zum Projektstand und den weiteren Arbeiten wurden von allen Projektpartnern zugearbeitet. Im Anhang 2 ist die gemäß Deliverable D7.1 entstandene für die Allgemeinheit verständliche PowerPoint Präsentation zum Projekt LivingH2 angefügt.

Das Datenblatt zum Projekt, welches zur Verbreitung über digitale Plattformen gemäß Deliverable D7.2 in deutscher und englischer Sprache erstellt wurde, ist als Anlage 3 angefügt.

Insgesamt wurde das Projekt bei zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt und potenzielle Interessenten können das laufende System in Paris besichtigen.

II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der hohe Umfang der notwendigen praktischen Tätigkeiten im Rahmen der notwendigen Arbeitsinhalte in Kombination mit dem aus Infektionsschutzgründen stark eingeschränkten Laborbetrieb führten zu unplanmäßigen Verzögerungen. Zur Wahrung des Infektionsschutzes mussten die Arbeiten teilweise vollständig ausgesetzt oder nur mit stark reduzierter Personenanzahl realisiert werden. Weiterhin kam es generell aufgrund der Corona-Situation zu erhöhten Lieferzeiten. Darüber hinaus kam es herstellerbedingt zu Schwierigkeiten bei der Beschaffung des Katalysators für den katalytischen Purge-Brenner, sodass ein alternativer Katalysator beschafft und unter den spezifischen Bedingungen in einer Laboranlage getestet werden musste. Diese zusätzlichen Laborarbeiten mussten ebenfalls im eingeschränkten Laborbetrieb realisiert werden.

Das Gesamtbudget des Antrages inkl. der bewilligten Aufstockung konnte eingehalten werden. Innerhalb der einzelnen Kostenpositionen gab es nur geringe Verschiebungen. So wurden aufgrund der pandemiebedingt verlängerten Projektlaufzeit etwas mehr Personalmittel benötigt. Diese Mehrausgaben konnten durch Einsparungen in den Bereichen Material und Fremdleistungen, sowie bei den Reisekosten ausgeglichen werden.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Verlauf des Vorhabens wurden die im Punkt II.1 dargestellten Arbeiten durchgeführt. Diese entsprechen inhaltlich dem Arbeitsplan bei Antragsstellung und waren notwendig, um das Konzept eines wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen-BHKW mit H₂-Spitzenlastbrenner für die häusliche Anwendung zu realisieren. Im Ergebnis konnte das im Antrag gesetzte Ziel im Wesentlichen erreicht und das Vorhaben mit einem positiven Resultat abgeschlossen werden. Sowohl alle Komponenten des BHKW, als auch die Odorierungseinrichtung wurden erfolgreich aufgebaut und haben in mehrmonatigen Betrieb beim Projektpartner ENGIE in Paris ihre Funktionsfähigkeit nachgewiesen.

Die Ressourcen wurden stets sparsam und zweckgebunden eingesetzt und entsprechend der Planung ausgeschöpft.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die gesammelten Erfahrungen bei Bau und Betrieb der verschiedenen Komponenten (katalytischer Brenner, H₂-Spitzenlastbrenner und Odorierstation) haben bei DBI zu einem erheblichen Kompetenz- und Know-how-Zuwachs geführt. Mit dem erfolgreichen Anlagenbetrieb beim renommierten Energieversorger ENGEE in Paris kann DBI potenziellen Kunden wie Gasversorgern, Industrieunternehmen oder Endanwendern zukünftig neue Lösungen für die wasserstoffbasierte Energieversorgung im Gebäude demonstrieren.

Eine unmittelbare Vermarktung der Projektergebnisse durch DBI in Form eines Produktes wie dem H₂-Spitzenlastbrenner oder der Odorieranlage ist noch nicht möglich. Dazu müssen weitere Optimierungen am Gesamtsystems erfolgen und anschließend ein akkreditiertes Prüflabor die Anlage zertifizieren.

Seitens verschiedener Netzbetreibern besteht Interesse an der Odorieranlage, da der Markt derzeit keine anderen funktionierenden Lösungen bereithält. Die μ -Odorieranlage konnte für ein weiteres Forschungsvorhaben zur Erprobung einer Wasserstoff-Infrastruktur für das 1. Quartal des kommenden Jahres vermietet werden. Weitere Anfragen bestehen seitens namhafter Hersteller von Endanwendungsgeräten.

II.5. während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In der Projektlaufzeit sind keine Ergebnisse Dritter, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind oder dieser entgegenstehen bekannt.

II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Liste der zum Projekt bereits erfolgten Veröffentlichungen ist als Anlage 1 angefügt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensfließbild.....	5
Abbildung 2: Spritzenpumpe neMESYS 1000N der Firma Cetoni [76].....	9
Abbildung 3: μ -Odorierstation inkl. Steuerungseinheit im DBI Labor.....	12
Abbildung 4: μ -Odorierstation inkl. Steuerungseinheit im H ₂ -Lab von ENGIE in Paris	13
Abbildung 5: μ -- Odorierstation – Dosiereinheit und Impfstelle	13
Abbildung 6: Deodorierungseinheit im Brennstoffzellenmodul	15
Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Katalysatorversuchsstands.....	16
Abbildung 8: Modell und Stahlbau des katalytischen Purgegasbrenners	17
Abbildung 9: Temperaturen und Umsatz abhängig vom H ₂ -Gehalt im Purgegasgemisch	18
Abbildung 10: Brennstoffzellen-Anlage inkl. katalytischen Purgegasbrenner.....	19
Abbildung 11: Temperaturverlauf im katalytischen Brenner im Brennstoffzellenbetrieb	20
Abbildung 12: Qualitative Darstellung der simulierten Stromlinien des Brenners	21
Abbildung 13: 3D- Modell des Spitzenlastbrenners	22
Abbildung 14: H ₂ -Spitzenlastbrenner beim Schweißen und auf dem Brennersuchsstand	23
Abbildung 15: H ₂ -Spitzenlastbrenner im BHKW integriert	24
Abbildung 16: Messwerte beim Betrieb des H ₂ -Spitzenlastbrenners.....	25
Abbildung 17: Monitoring und Datenspeicherung	26
Abbildung 18: R&I-Schema der Wasserstoffversorgung	27
Abbildung 19: Bedienoberfläche der μ -Odorierstation	28
Abbildung 20: Bedienoberfläche der μ -Odorierstation	29
Abbildung 21: Volumenstrom, Druck und Konzentrations-Zeit-Verläufe der μ -Odorieranlage	29
Abbildung 22: Konzentrations-Zeit-Verläufe Dosierung und Odoriermittelkonzentration	30
Abbildung 23: Messung der Odoriermittelkonzentration vor Ort im Engie Lab Crigen.....	30
Abbildung 24: Chromatogrammausschnitt – im Gas gemessene Odoriermittelkomponenten	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dosierrate und Menge Odoriermittel für Projektzeitraum.....	8
Tabelle 2: Kenndaten Spritzenpumpe neMYSES 1000 N mit 3 ml Spritze der Firma Cetoni und dosierbare Gasmenge bei 10 mg/m ³ S-free.....	10
Tabelle 3: Fließgeschwindigkeiten und Verweilzeiten.....	11

Anlage 1: Liste der Veröffentlichungen zum Projekt

Nr.	What	When	Who	Medium
1	Press release	01.10.2019	INHOUSE	INHOUSE-Website/News https://www.inhouse-engineering.de/neues-foerderprojekt-living-h2/
2	Press release	02.10.2019	DBI	DBI-Website https://www.dbi-gruppe.de/files/PDFs/Projekte/82_Projektsteckbrief_LivingH2_03SF0587B.pdf
3	Press release	2019	OTH-FENES	OTH-FENES-Website https://www.fenes.net/forschung/energiespeicher/laufende-projekte/livingh2/
4	Press release	2019	OTH-Regensburg	OTH-Regensburg-Website https://www.oth-regensburg.de/fakultaeten/angewandte-sozial-und-gesundheitswissenschaften/forschung-projekte/institut-fuer-sozialforschung-und-technikfolgenabschaetzung/projekte/projekte-im-bereich-mobilitaet-und-energie/livingh2-living-laboratory-demonstration-eines-komplett-reinen-wasserstoff-brennstoffzellen-systems.html
5	Press release	22.11.2019	DBI	Twitter https://twitter.com/DBI_Gruppe/status/1197833601641005056
6	Projektsteckbrief DVGW	04.08.2020	DBI	dvgw-h2-wasserstoff-forschungsprojekte-broschuere https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/dvgw-h2-wasserstoff-forschungsprojekte-broschuere.pdf
7	Projektsteckbrief BMBF	23.10.2020	INHOUSE	BMBF-Website https://www.fona.de/medien/pdf/Projektblaetter_Foerdermassnahme_Deutsch-Franzoesische_Zusammenarbeit_in_der_Energieforschung_TE1.pdf
8	Scientific paper	13.04.2022	OTH	“Determination of the optimal power ratio between electrolysis and renewable energies to investigate the effects on the hydrogen production costs”
9	Oral presentation	22.05.2022	INHOUSE	“Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+hydrogen - Entwicklung & Anwendung“, DBI-Fachforum, 22.05.2022, München
10	Oral presentation	30.06.2022	OTH	„Living H2 – Demonstration eines reinen Wasserstoff-Brennstoffzellen-BHKW“, Die Woche des Wasserstoffs Süd, OTH Regensburg

#	What	When	Who	Medium
11	Oral presentation	15.11.2022	INHOUSE	“Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+hydrogen - Entwicklung & Anwendung“, DBI-Fachforum, 22.05.2022, München
12	Oral presentation	15.11.2022	INHOUSE	„H2home - Entwicklung des H2-BHKW inhouse5000+hydrogen“ für die Gebäudeenergieversorgung – Wo stehen wir?“, Regionale Energiekonferenz Lausitz-Spreewald 2022, Lübben
13	Oral presentation	17.05.2023	INHOUSE	„LivingH2: Entwicklung und Demonstration eines H2-BHKW unter infrastrukturellen Gesichtspunkten – Ein Deutsch-Französisches Projekt“, DBI-Fachforum, Hamburg
14	Oral presentation	17.05.2023	INHOUSE	“Living Laboratory – Demonstration of Complete Pure Hydrogen Fuel Cell Cogeneration System“, PTJ/ANR-Statusseminar, “2+2“-Projekte, Online
15	Oral presentation	22.05.2023	OTH	“On the way to a German-French energy transition - A cost-based sector-coupled optimization model taking into account the European Green Deal“, French Embassy, Berlin
16	Press release	01.06.2023	OTH	OTH-FENES-Website https://www.fenes.net/blog-post/fenes-trifft-engie-lab-crigen-in-paris-zur-demonstration-eines-h2-bhkws-im-rahmen-des-projekts-livingh2/

Anlage 2: Präsentation zum Projekt LivingH2



Living Laboratory Demonstration of Complete Pure Hydrogen Fuel Cell Cogeneration System

LivingH2

1

LivingH2 - Living Laboratory Demonstration of Complete Pure Hydrogen Fuel Cell Cogeneration System

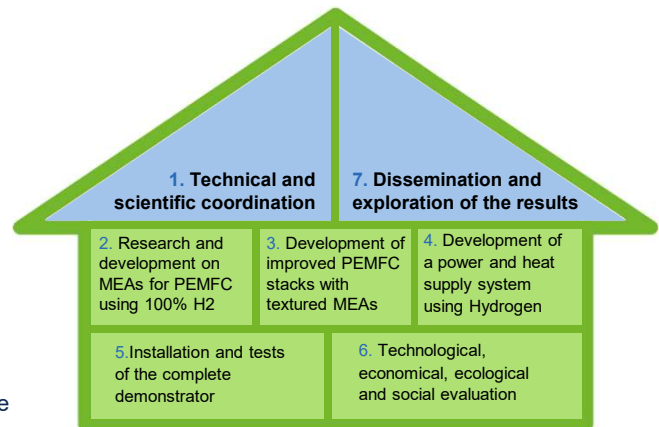


The Project at a glance

Demonstration of a renewable hydrogen power supply in a living lab environment, using a H₂ fuel cell cogeneration system with hydrogen generated by electrolysis from renewable power.

Objectives:

- Development of an all-in-one solution for regenerative H₂ energy supply in a real lab environment by using domestic approved standards
- Electricity and heat generation by the fuel cell cogeneration system for the utilisation within the building including photovoltaic, electrolyser and storage tank
- Operation with an odorized H₂ supply line by use of a micro-odorization station
- Development of odorant resistant fuel cell membrane electrode assembly (MEA) by applying a textured catalyst layer
- Techno-economic analysis of the all-in-one solution and comparison with alternative technologies



Duration: 42 Months, Start: 01.10.2019



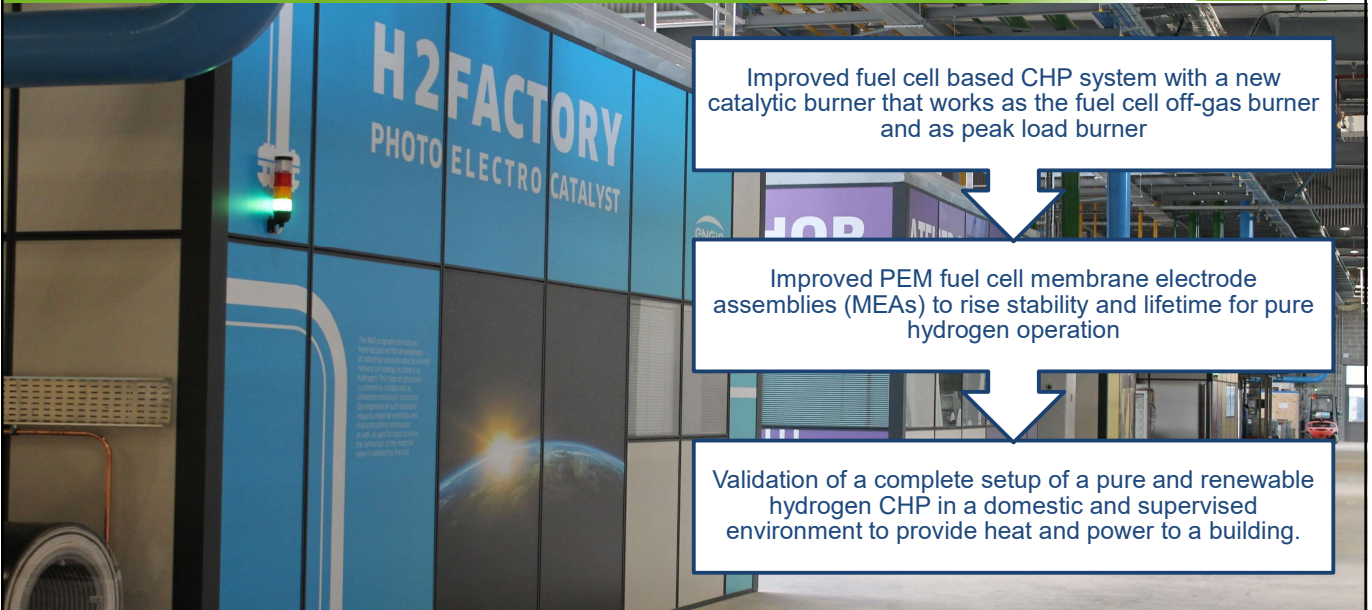
Research partners



2 LivingH2

2

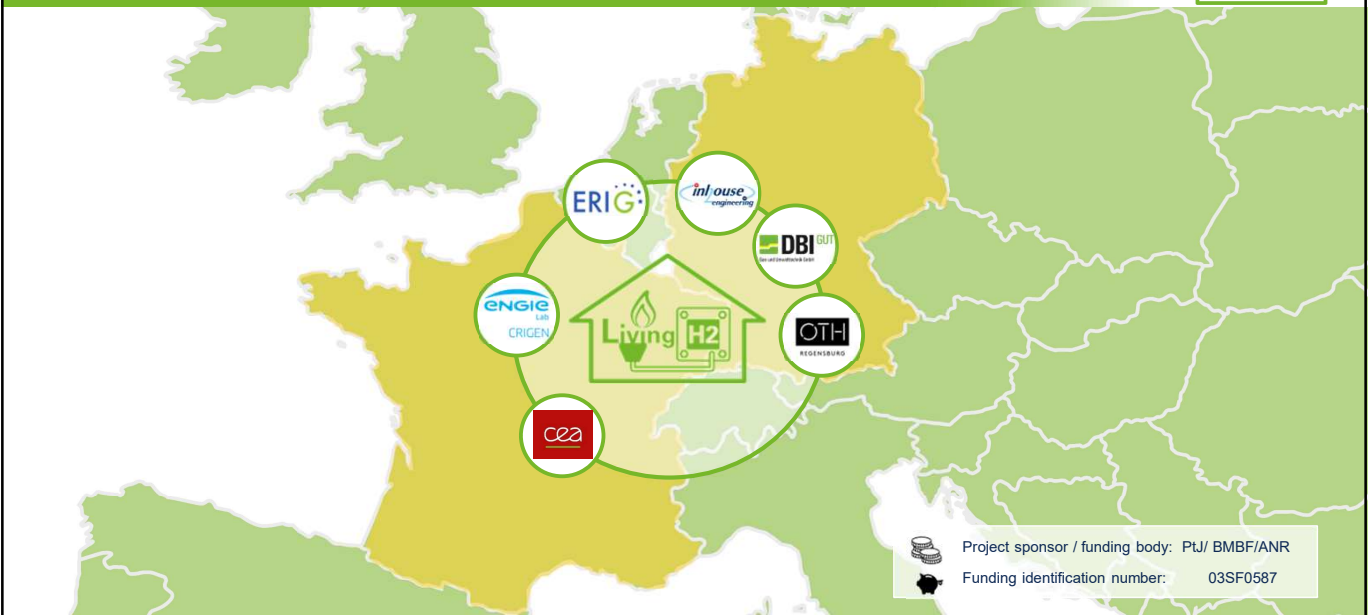
Key innovation aspects



3 LivingH2

3

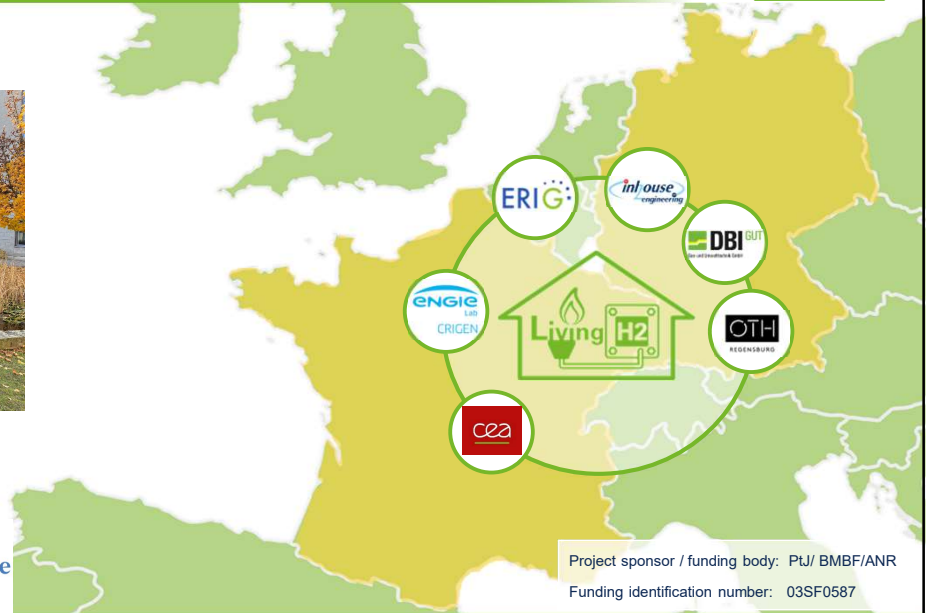
Project partners – French German collaboration



4 LivingH2

4

Project partners – French German collaboration



SPONSORED BY THE
 Federal Ministry of Education and Research
anr [©]
 agence nationale de la recherche
 AU SERVICE DE LA SCIENCE

Project sponsor / funding body: PtJ/ BMBF/ANR
 Funding identification number: 03SF0587

Main Tasks

1. Technical and scientific coordination



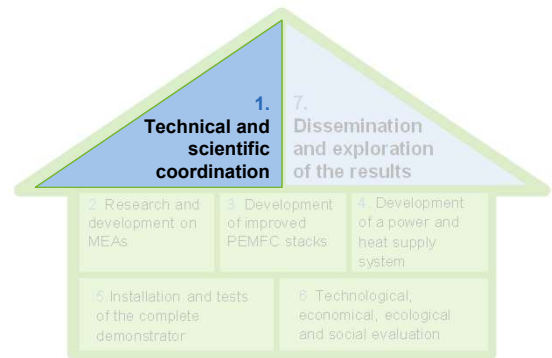
Leader: ENGIE, Partner: INHOUSE

Objective

- Monitoring of the technical progresses, coordinating input/output flows between the various work packages and tasks
- Preparation, organization, administration of Meetings
- Day to day contractual, administrative management and financial management.
- Two technical meetings per year

Deliverables

- Interim reports and final report



Main Tasks

2. Research and development on MEAs for PEMFC using 100% H₂



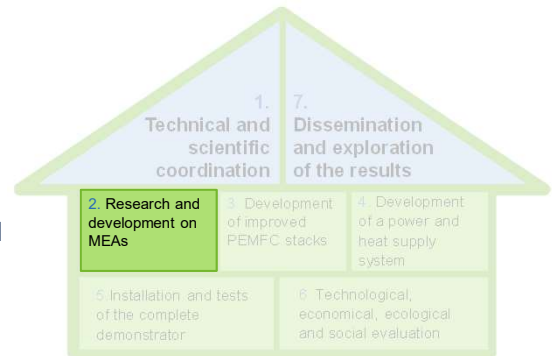
Leader: CEA, Partner: INHOUSE

Objective

- Provide advanced MEAs designed for H₂ LT-PEM stack of inhouse
- Use of stack testing results to optimise the MEAs with textured electrodes.
- Availability of the MEAs for the fuel cell prototype
- Better understanding of the impact of odorization, including effect of ageing.

Deliverables

- First generation MEAs for the first prototype
- Second generation MEAs for the second prototype
- Impact of odorization of ageing MEAs



7

LivingH2

7

Main Tasks

3. Development of improved PEMFC stacks with textured MEAs



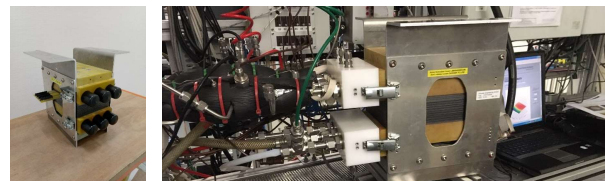
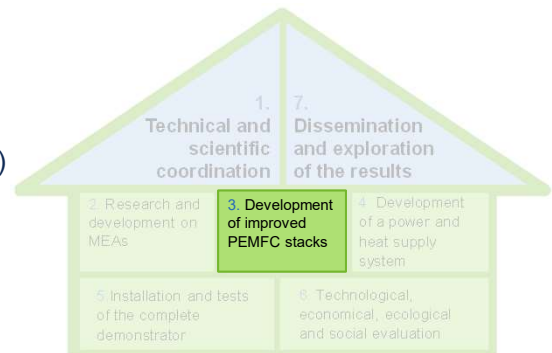
Leader: INHOUSE, Partner: CEA

Objective

- Integration and testing of project MEAs (1st and 2nd generation)
- Investigation of effects of Hydrogen quality and different odorants for a future hydrogen supply grid
- Testing of improved MEAs and upscaling to 5kW full stack
- Targeting an electrical system efficiency > 50% and a cell degradation rate of < 5μV/h to reach > 40 000 operating hours

Deliverables

- Short stacks, equipped with CDM
- Short stacks, equipped with different MEAs
- Full stack 1, equipped with 1st generation MEA
- Full stack 2, equipped with improved MEA



8

LivingH2

8

Main Tasks

4. Development of a power and heat supply system using hydrogen



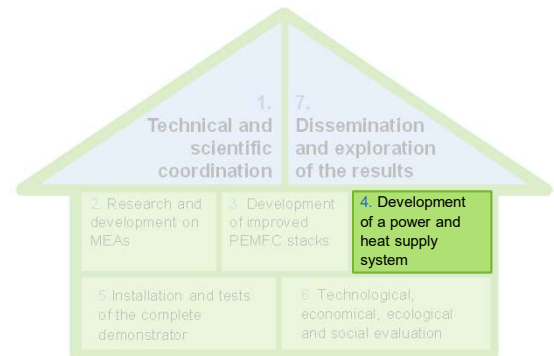
Leader: INHOUSE, Partners: DBI, ENGIE

Objective

- development of an H₂-based system for the energy supply of a building, consisting of a complete energy chain including:
 - renewable energy source
 - Electrolyser
 - H₂-CHP system based on PEM fuel cell
 - H₂ storage as well as electric and thermal storage system
- The electrical storage integration enables a UPS function for selected consumers.

Deliverables

- design of a combined peak load / purge-gas burner
- Concept for metering, piping & odorization of H₂
- Energy supply system concept
- H₂-CHP system



9

LivingH2

9

Main Tasks

5. Installation and demonstration of the complete demonstrator



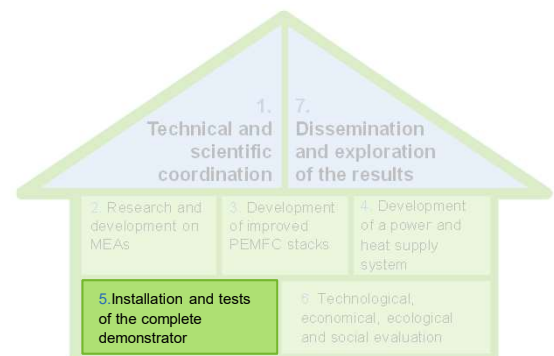
Leader: ENGIE, Partners: INHOUSE, DBI

Objective

- Installation and validation of the complete hydrogen energy supply system within a living lab environment at Engie Lab Crigen.
- Complete demonstrator will consist of a hydrogen fuel cell CHP system, that provides heat and power to the Engie laboratory.
- Hydrogen will be produced locally by an electrolyser connected to a hydrogen storage

Deliverables

- System implementation report
- Monitoring setup report
- Status report of monitoring system
- Test report of first and second run



10

LivingH2

10

Main Tasks

6. Technological, economical, ecological and social evaluation



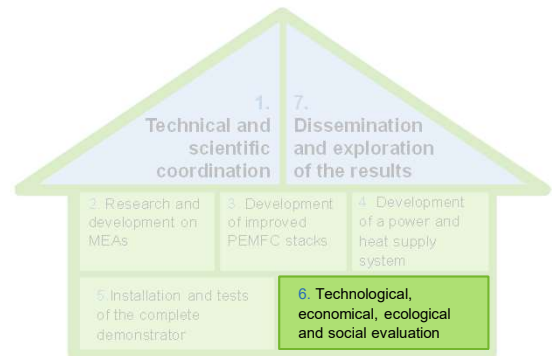
Leader: OTH, Partner: ENGIE

Objectives

- Techno-economic and ecological evaluation of the developed district supply concept and comparison to conventional alternatives including the newly developed MEAs
- Evaluation of the concept-impact on the macro economy of each nation and the possible contribution to climate protection
- Investigation of the social acceptance of FC technology and development of recommendations

Deliverables

- report on techno-economic evaluation and comparison
- report on ecological evaluation
- report on concept-impact on DE & FR economy and GHG emissions
- report on social acceptance
- Update report with measurement data



11 LivingH2

11

Main Tasks

7. Dissemination and Exploration of the Results



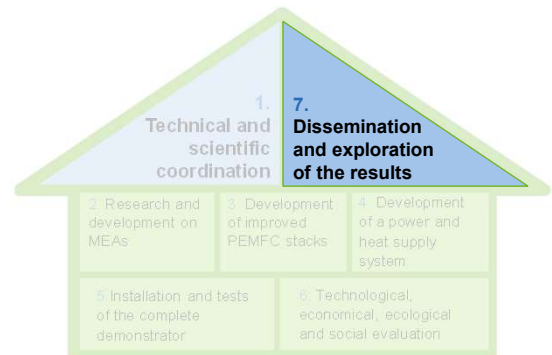
Leader: ENGIE, Partner: INHOUSE, DBI, OTH, CEA, ERIG

Objective

- Disseminate the project and its results in France, Germany and the wider European energy/gas community.
- The work progress and results shall be communicated in order to push people attention towards the safe operation of H2 systems as well as underline benefits from using the fuel cell technology.

Deliverables

- low barrier power point presentation
- fact sheet, press releases and dissemination via digital platforms, such as the ERIG-Network-Tool/Homepage, LinkedIn, Facebook and Twitter
- European seminar in Brussels



12 LivingH2

12



Thank you for your attention



LivingH2

Komponentenentwicklung für ein Brennstoffzellen-BHKW und Analyse der gebäudeinternen Wasserstoffinfrastruktur – LivingH2



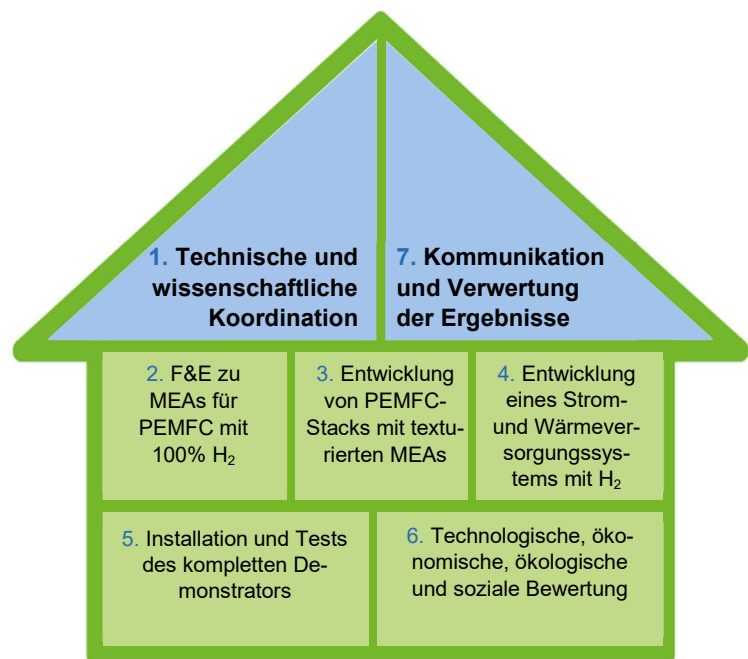
"Demonstration einer erneuerbaren H₂-Stromversorgung in einer realen Laborumgebung unter Verwendung eines H₂-Brennstoffzellen-Kraft-Wärme-Kopplungssystems mit Wasserstoff aus Elektrolyse und erneuerbarer Energie."

Ziel des Verbundvorhabens "LivingH2" ist die Demonstration einer Komplettlösung einer regenerativen H₂-Stromversorgung in einer Reallaborumgebung unter Verwendung eines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerks (H₂-BZ-BHKW). Das Projektkonsortium besteht aus Partnern aus der Industrie sowie Forschungsinstituten in Deutschland und Frankreich. Die Entwicklung der H₂-KWK kann den Energiesektor zwischen den Jahren 2030 und 2050 drastisch beeinflussen, da erneuerbarer H₂ einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung des Anteils an EE im Energiesektor liefern kann. H₂-KWK könnten zu einer CO₂-freien Energielösung für Gebäude werden, die bestehende fossile KWK-Lösungen ersetzen sollten.


	Projektlaufzeit 01.10.2019 - 31.03.2023
	Projektbudget Gesamtbudget: € 1.483.630
	Projektkoordinator (Deutschland) s.theuring@inhouse-engineering.de Projektkoordinator (Frankreich) reda.bellahcene@external.erieg.com
	Projektwebsite: www.erieg.eu/livingh2
	Projektkommunikation office@erieg.eu

Zielsetzungen

- Entwicklung einer Komplettlösung zur regenerativen H₂-Energieversorgung in einer Reallaborumgebung unter Verwendung von länderspezifischen und zugelassenen Standards.
- Strom- und Wärmeerzeugung durch das Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk und gebäudeinterner Nutzung, inklusive Photovoltaik, Elektrolyseur und Speicher.
- Betrieb mit einer odorierten H₂-Zuleitung durch den Einsatz einer Mikro-Odorierstation.
- Entwicklung einer geruchsresistenten Brennstoffzellen-Membran-Elektroden-Einheit (MEA) durch Aufbringen einer texturierten Katalysatorschicht.
- Techno-ökonomische Analyse der All-in-One Lösung und Vergleich mit alternativen Technologien.



Innovationsaspekte



Verbessertes brennstoffzellenbasiertes KWK-System mit einem neuen katalytischen Brenner, der als Brennstoffzellen-Abgasbrenner und als Spitzenlastbrenner arbeitet.

Verbesserte PEM-Brennstoffzellen-Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) zur Erhöhung der Stabilität und Lebensdauer für den Betrieb mit reinem H₂.

Validierung des Aufbaus einer KWK-Anlage mit reinem und erneuerbarem H₂ in einer häuslichen und überwachten Umgebung zur Versorgung eines Gebäudes mit Wärme und Strom.

Lösungsansätze und Ergebnisse

- Optimierung von Brennstoffzellen-BHKWs durch technologische Innovationen für den Betrieb mit reinem H₂.
- Ein komplettes, leitungsgebundenes Wasserstoffversorgungssystem wird installiert, um in einer typischen häuslichen Umgebung, dem "lebenden Labor", getestet zu werden, einschließlich der H₂-Erzeugung, der Installation, der Odorierung und eines H₂-BHKW.
- Abschließend folgt die technische, wirtschaftliche, ökologische und soziale Bewertung.

Projektteam



ERIG

in/ouse engineering

DBI Gruppe

OTH REGENSBURG

ENGIE Lab CRIGEN

cea

Living H₂

SPONSORED BY THE
Federal Ministry of Education and Research

anr **agence nationale de la recherche**
AU SERVICE DE LA SCIENCE

Fördermittelgeber: PtJ/ BMBF/ANR
Projektkennziffer: 03SF0587

Living laboratory demonstration of a complete pure hydrogen fuel cell cogeneration system



“Demonstration of a renewable H₂ power supply in a living laboratory environment, using a H₂ fuel cell cogeneration system with hydrogen generated by electrolysis from renewable energy.”

The project „LivingH₂“ aims for the **demonstration** of a complete solution of a **renewable hydrogen power supply** in a living laboratory environment, using a H₂ fuel cell cogeneration (H₂-FC-CHP) system. The consortium is widely positioned and characterized by a **French-German collaboration**. The development of pure H₂-CHP can drastically impact the energy sector between the years 2030 and 2050, as renewable hydrogen is an **essential solution** as an energy storage to increase the share of renewable energy within the energy sector. Pure H₂-FC-CHP could become a **CO₂ free** energy solution for buildings that should progressively replace existing natural based CHP solutions.



Project Duration

01.10.2019 - 31.03.2023



Project Budget

Total Budget: € 1.483.630



Project Coordinator (German)

s.theuring@inhouse-engineering.de

Project Coordinator (French)

reda.bellahcene@external.erieg.com



Project Website: www.erieg.eu/livingh2



Project Communication

office@erieg.eu

Main objectives

- Development of an all-in-one solution for regenerative H₂ energy supply in a laboratory environment using domestic approved standards.
- Electricity and heat generation by the fuel cell cogeneration system for the utilisation within the building including photovoltaic, electrolyser and storage tanks.
- Operation with an odorized H₂ supply line by use of a micro-odorization station.
- Development of odorant resistant fuel cell membrane electrode assembly (MEA) by applying a textured catalyst layer.
- Techno-economic analysis of the all-in-one solution and comparison with alternative technologies.

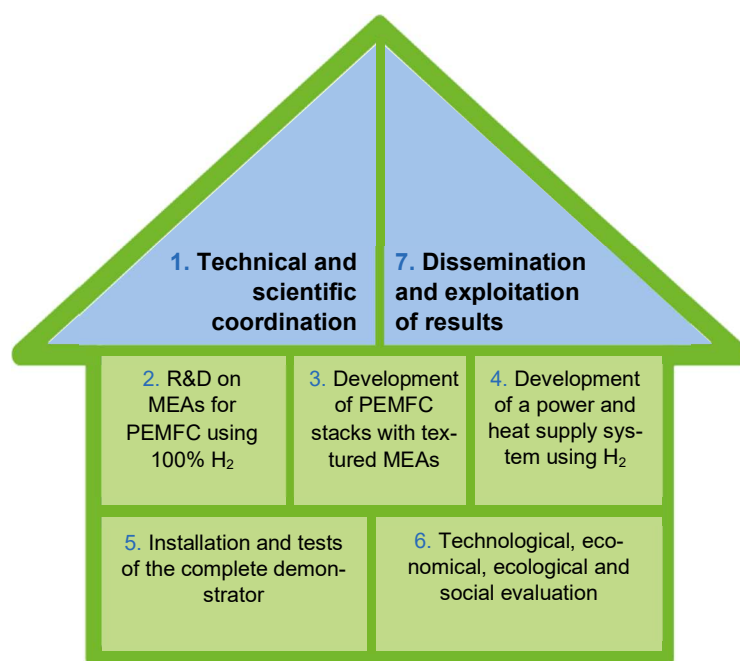



Fig. 1: Project structure of LivingH₂

Key innovation aspects



Improved fuel cell based CHP system with a new catalytic burner that works as the fuel cell off-gas burner and as peak load burner.

Improved PEM fuel cell membrane electrode assemblies (MEAs) to rise stability and lifetime for pure hydrogen operation.

Validation of a complete setup of a pure and renewable hydrogen CHP in a domestic and supervised environment to provide heat and power to a building.

Approach and results

- Fuel cell CHPs will be optimised for pure hydrogen operation through technological innovation.
- A complete, pipeline-based hydrogen supply system will be installed to be tested in a typical domestic environment, the “living lab”, including the production of renewable hydrogen, pipework installation in a building, odorization and a H₂ CHP.
- Finally, the solution will undergo a technical, economical, ecological and social assessment.

Project partners



Project partners:

- ERIC
- in/ouse engineering
- DBI Gruppe
- OTH REGENSBURG
- cea
- ENGIE Lab CRIGEN

Sponsored by the:

- Federal Ministry of Education and Research
- anr agence nationale de la recherche AU SERVICE DE LA SCIENCE

Project sponsor / funding body: PtJ/ BMBF/ANR
Funding identification number: 03SF0587