

II. Bericht Arbeitspaket 2:

Demonstration emissionsfreier Kraft-Wärme-Kopp- lung durch grünen Wasserstoff und intelligenter Steuerung

Mitglieder:

Prof. Dr.-Ing. Maurice Kettner, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Florian Beerlage, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Naqib Salim, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Bushra Canaan, Université de Haute-Alsace

Djafar Ould-Abdeslam, Université de Haute-Alsace

Paul Robineau, Université de Strasbourg

Yamit Ibarra-Suarez, Stadt Offenburg

Natalie Miller, Stadt Offenburg



Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Kofinanziert von
der Europäischen Union

Rhin Supérieur | Oberrhein

II.1. Hintergrund und Zielsetzung

Im Rahmen des Projekts CO2InnO wurde im Arbeitspaket 2 ein realer Demonstrator aufgebaut, um die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme aus grünem Wasserstoff zu demonstrieren. Ziel war es, ein emissionsfreies Energiesystem zu entwickeln und zu validieren, das sowohl im Reallabor als auch im digitalen Raum abgebildet werden kann.

Der Reallabor-Demonstrator am Standort der Hochschule Karlsruhe (HKA) umfasst einen Elektrolyseur zur Wasserstofferzeugung, einen Kompressor mit Hochdruckspeicher sowie ein modifiziertes Blockheizkraftwerk (BHKW), das mit Wasserstoff betrieben werden kann. Die Komponenten sind messtechnisch miteinander vernetzt und bilden die Grundlage für ein Energiemanagementsystem.

Ergänzend wurde ein digitales Simulationsmodell („Digitaler Zwilling“) entwickelt, das auf realen Verbrauchsdaten basiert, die von den Projektpartnern – darunter die Stadt Offenburg – bereitgestellt wurden. Mit diesem Modell konnten verschiedene „Was-wäre-wenn“-Szenarien simuliert werden, um die Effizienz des Systems unter variierenden Rahmenbedingungen zu analysieren.

Ein weiteres zentrales Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche, mit der kommunale Akteure, auch ohne tiefere technische Kenntnisse, individuelle Szenarien modellieren und bewerten können. Damit sollen konkrete Handlungsoptionen für klimaneutrale Energieversorgung in öffentlichen Gebäuden sichtbar gemacht werden – zunächst am Beispiel von fünf realen Gebäuden der Stadt Offenburg.

Langfristig soll das entwickelte System sowie das zugehörige Modell auf andere Städte und Regionen übertragbar sein und zur Planung nachhaltiger, wasserstoffbasierter Energiesysteme beitragen.

II.2. Methoden und Material

II.2.1. Aufbau und technische Ausstattung des Reallabors

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurde an der Hochschule Karlsruhe (HKA) ein physischer Demonstrator für ein wasserstoffbasiertes Energiesystem aufgebaut. Ziel war es, die Erzeugung, Speicherung und Nutzung von grünem Wasserstoff zur kombinierten Versorgung mit Strom und Wärme real zu testen und zu analysieren.

Der Demonstrator umfasst folgende Hauptkomponenten:

- einen Protonenaustauschmembran (PEM)-Elektrolyseur zur Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom,
- einen Kompressor mit Hochdruckspeicher,
- sowie ein für den Betrieb mit H₂ modifiziertes Blockheizkraftwerk (BHKW).

Die Komponenten wurden hydraulisch und steuerungstechnisch miteinander verbunden. Alle

Hauptgrößen wie elektrische Leistung, Wärmemengen, Druck- und Durchflusswerte werden kontinuierlich gemessen. Der physische Aufbau des Systems ist in Abbildung 1 dargestellt.

Wasserstoffverdichter und -Speicher

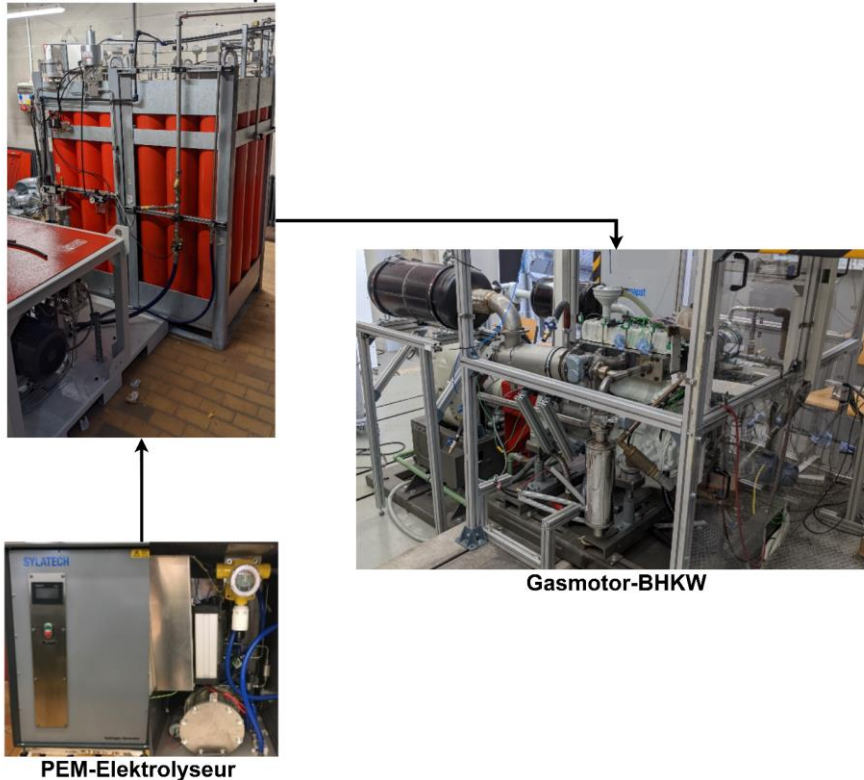


Abbildung II-1: Aufbau der Demonstratoreinheit an der Hochschule Karlsruhe (PEM: Protonaustauschmembran; BHKW: Blockheizkraftwerk).

Der eingesetzte PEM-Elektrolyseur ist ein Kompaktgerät mit integrierter Wasseraufbereitung und Kühlung. Die technischen Spezifikationen sind in Tabelle II.1 aufgeführt.

Tabelle II.1: Technische Spezifikation Protonaustauschmembran (PEM)-Elektrolyseur.

PEM Elektrolyseur Sylatech GmbH	
Nennleistung	1,9 kW
Wasserstofferzeugungsrate (Normkubikmeter)	0,3 Nm³/h
Wasserstoffreinheit	99,99%
Nenndruck	3 – 10 bar

Der erzeugte Wasserstoff wird in einer Hochdruckspeichereinheit mit einem Volumen von 1200 Litern gelagert, was etwa 300 Normkubikmetern (Nm³) Wasserstoff entspricht. Dieses Speichervolumen wurde im Reallabor zur Versorgung des BHKW verwendet und diente zugleich als Referenz für die Auslegung von Speicherszenarien im digitalen Simulationsmodell.

Eine schematische Darstellung des internen Aufbaus des Elektrolyseurs ist in Anlage 1 dokumentiert.

II.2.2. Entwicklung eines digitalen Simulationsmodells

Auf Grundlage der technischen Struktur des Reallabors wurde ein dynamisches Simulationsmodell entwickelt, das als digitaler Zwilling fungiert. Die Modellierung erfolgte komponentenbasiert in OpenModelica und bildet die Wechselwirkungen zwischen dem Elektrolyseur, dem Wasserstoffspeicher und dem BHKW unter realitätsnahen Bedingungen ab. Ergänzt wurden diese durch Modelle für elektrische Verbraucher, Wärmelasten und Umwelteinflüsse wie Außentemperatur und solare Einstrahlung.

Das Systemmodell simuliert dabei sowohl die elektrischen als auch die thermischen Energieflüsse sowie den Wasserstoffkreislauf. Die Struktur und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten im Modell sind in Abbildung II-2 dargestellt. Das Simulationsmodell ist in einem Paket gekapselt, das benutzerdefinierte Modelle als Klassen organisiert. Diese Struktur verbessert die Übersichtlichkeit und Verständlichkeit des Simulationswerkzeugs, das in drei Unterpakete gegliedert ist: Elektrisches System (beinhaltet das PV- und das WKA- sowie das Batteriespeichersystem), Heizsystem (BHKW, Wärmepumpe und Wärmespeicher), und das Wasserstoffsystem. Die Unterpakete CO₂ und Kosten befinden sich im Ergebnis-Block. Dieser fasst die zentralen Ergebnisse aller anderen Blöcke zusammen und extrahiert sie mithilfe objektorientierter Programmiermethoden – ohne dabei die eigentliche Berechnung zu beeinflussen, sodass keine explizite Verbindung erforderlich ist. Alle Unterpakete werden im laufenden Kapitel näher beschrieben. Die physikalischen Modellierungsansätze sind in (Florian Beerlage, René Behmann, and Lukas Stahl, 2023; Florian Beerlage, 2024) detailliert beschrieben.

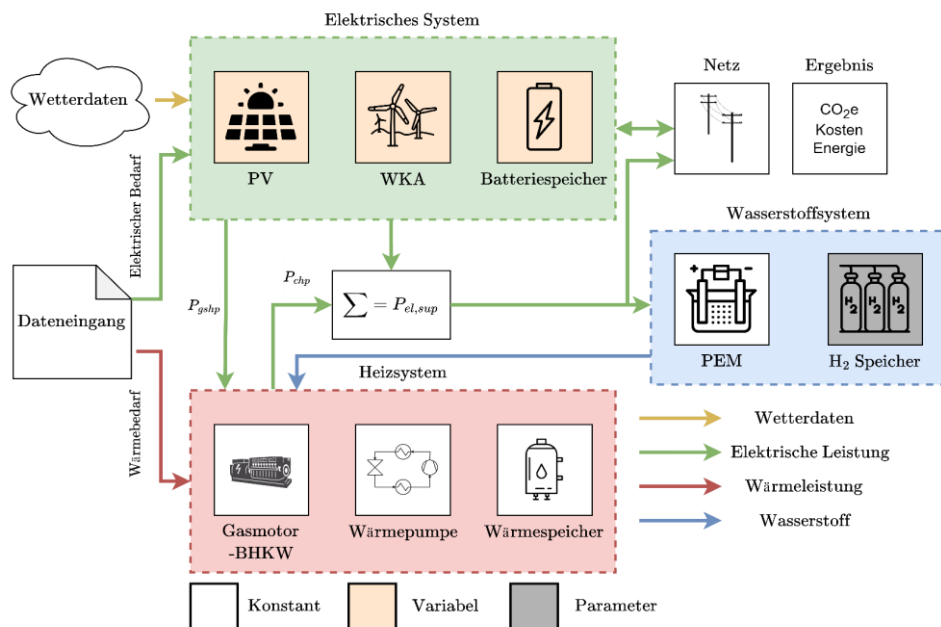


Abbildung II-2: Schematische Darstellung des Simulationsmodells (PV: Photovoltaik; WKA: Windkraftanlage; P: Leistung; Sup: engl. Supply; GSHP: engl. Ground Source Heat Pump; CHP/BHKW: Blockheizkraftwerk; H₂: Wasserstoff; CO₂e: Kohlendioxid-äquivalent)

Für die Simulation elektrischer Prozesse wurde ein Netzmodell integriert, das das Lastverhalten, die Einspeisung durch das BHKW sowie Verluste und Netzurückwirkungen abbildet. Das elektrische Teilsystem umfasst auch PV-Anlage, Windkraftanlage (WKA) und Batteriespeicher. Eine grafische Darstellung befindet sich in Abbildung II-3

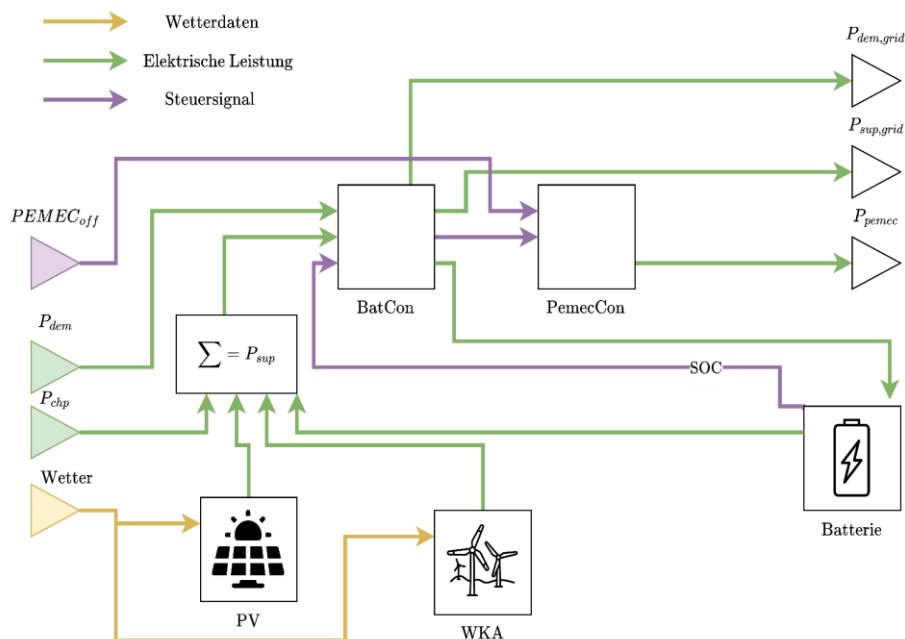


Abbildung II-3: Schematisches Layout des elektrischen Systems (Dem: engl. Demand; BatCon: engl. Battery Controller; PemecCon: engl. PEM-Controller; Sup: engl. Versorgung; grid: engl. Netz; PemEc: Protonaustauschmembranelektrolyseur; P: Leistung; WKA: Windkraft Anlage; PV: Photovoltaik)

Zur Unterstützung der Nutzerfreundlichkeit wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) in Python entwickelt. Diese erlaubt es, zentrale Eingangsparameter ohne Programmierkenntnisse anzupassen und Simulationen zu starten. Die folgenden Variablen können durch den Benutzer interaktiv definiert werden:

- Energiebedarfsprofile (Strom und Wärme),
- Wetterdaten (Außentemperatur, Solarstrahlung),
- technische Dimensionierung der Komponenten,
- Auswahl von Steuerstrategien (z. B. Einschaltlogiken für das BHKW oder Priorisierung von Speicherladung).

In den folgenden Abschnitten werden die zentralen Subsysteme mit ihren jeweiligen Steuerstrategien beschrieben.

Batteriespeicher

Das Batteriesystem wird über einen Steuerblock geregelt, der zwischen den Betriebsmodi Laden, Entladen und Standby wechselt. Die Logik berücksichtigt unter anderem den Ladezustand (SOC), Leistungsgrenzen und Totbandbreiten. Die zugrundeliegenden Gleichungen und Algorithmen basieren auf Florian Beerlage, René Behmann, and Lukas Stahl, 2023; Florian Beerlage, 2024. Eine schematische Darstellung der Logik befindet sich im Anhang, Anlage 2 (*Kontrollschema Batteriespeicher*).

PEM-Elektrolyseur

Die Steuerung des PEM erfolgt innerhalb des elektrischen Systems. Sie reagiert auf Stromüberschüsse, berücksichtigt den Ladezustand der Batterie und stellt sicher, dass nur überschüssiger eigener Strom zur Wasserstoffproduktion verwendet wird. Die entsprechende Steuersequenz ist in Anlage 3 (*Steuersequenz PEM*) dokumentiert. Weitere Details zu den verwendeten Steuerformeln finden sich in (Florian Beerlage, René Behmann, and Lukas Stahl, 2023; Florian Beerlage, 2024)

Heizsystem

Das Heizsystem besteht aus einem Blockheizkraftwerk (BHKW), einer Wärmepumpe (WP) und einem thermischen Energiespeicher (TES). Die Regelung erfolgt abhängig vom Ladezustand des TES, dem aktuellen Wärmebedarf und den definierten Schwellenwerten für das BHKW. Wenn die Leistung des BHKW nicht ausreicht, wird die Wärmepumpe zugeschaltet. Das physische Layout des Heizsystems ist in Abbildung II-4 dargestellt. Die vollständige Steuerstrategie ist in Anlage 4 (*Steuerstrategie Heizsystem*) zusammengefasst.

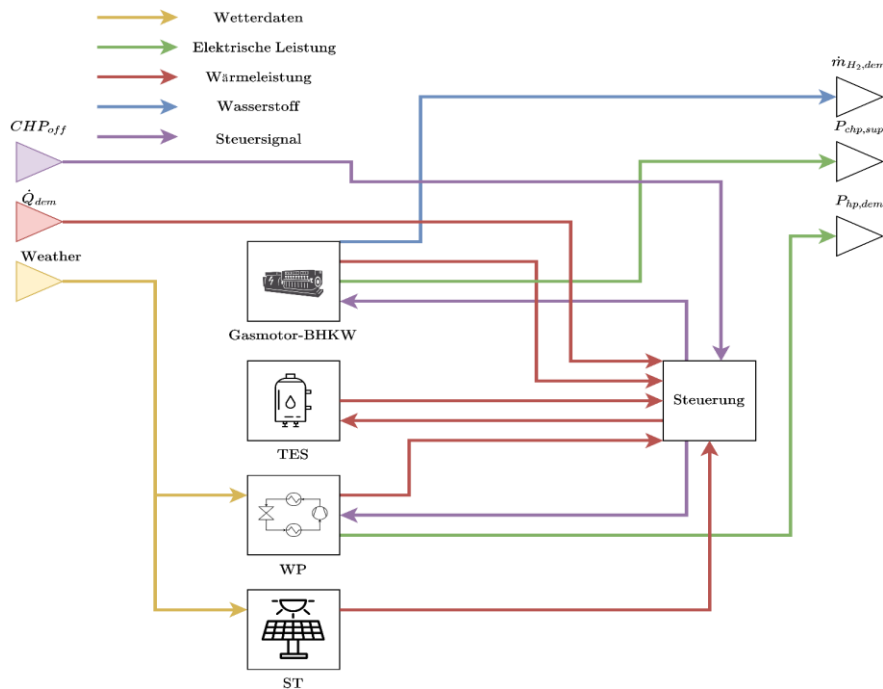


Abbildung II-4: Heizsystem des Simulationsmodells (CHP/BHKW: engl. Blockheizkraftwerk; Q : Wärmestrom; HP: engl. heat pump/Wärmepumpe; Sup: engl. supply/Versorgung; TES: engl. thermal energy storage; WP: Wärmepumpe; ST: Solarthermie; H2: Wasserstoff; Dem: engl. demand/Bedarf)

Das Wasserstoffsystem besteht aus einem PEM-Elektrolyseur, einem Verdichter und einem Gasspeicher. Die Modelle basieren auf idealisierten physikalischen Annahmen und wurden gemäß den Gleichungen aus (Florian Beerlage, René Behmann, and Lukas Stahl, 2023; Florian Beerlage, 2024) implementiert. Das schematische Modell des Wasserstoffsystems ist in Abbildung II-5 visualisiert.

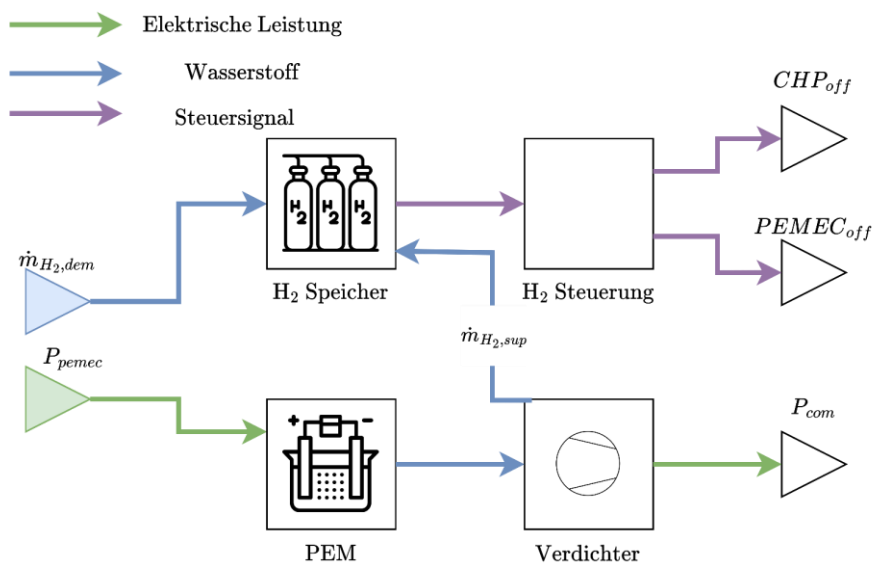


Abbildung II-5: Schematische Darstellung des Wasserstoffsystems (H2: Wasserstoff; Dem: engl. demand/Bedarf; PEM/PEMEC: Protonaustauschmembranelektrolyseur; P: Leistung; Sup: engl. supply/Versorgung; Com: engl. compressor/Verdichter).

Durch die modulare Struktur, die zentrale Eingabeschicht und die benutzerfreundliche Oberfläche eignet sich das Simulationswerkzeug für praxisorientierte Analysen. Die direkte Integration realer Verbrauchsdaten der Stadt Offenburg ermöglicht konkrete Bewertungsszenarien kommunaler Energiesysteme unter Einsatz von Wasserstofftechnologie.

Das entwickelte Simulationsmodell ist öffentlich verfügbar und kann entweder über das GitHub-Repository **IKKUengine** oder als ZIP-Datei heruntergeladen werden. Eine detaillierte Installations- und Nutzungsanleitung befindet sich im Anhang, (Anlage 5).

II.2.3. Datengrundlage: Lastprofile und Monitoring-Infrastruktur der Stadt Offenburg

Für die Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells stellte die Stadt Offenburg reale Verbrauchsdaten für fünf kommunale Gebäude zur Verfügung. Die Datensätze umfassen Strom- und Wärmeverbrauchswerte aus dem Jahr 2019 mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten. Die ausgewählten Gebäude – Grundschule, Kindertagesstätte, Feuerwehrgebäude, Sporthalle und Verwaltungsgebäude – repräsentieren unterschiedliche Nutzungstypen und ermöglichen somit die Bewertung des Modells in verschiedenen kommunalen Anwendungsszenarien.

Die Lastprofile wurden in das OpenModelica-Modell integriert und dienten als Grundlage für die Szenarienanalysen. Ihre Einbindung erfolgte über ein eigens entwickeltes Python-Skript, das die Datenstruktur automatisiert überführte.

Die folgende Tabelle II.2 zeigt die jährlichen Gesamtverbräuche für Strom und Wärme in den betrachteten Gebäuden. Diese Werte definieren die zu deckende Energiemenge innerhalb der Simulation und dienen als Bemessungsgrundlage für die Systemkomponenten.

Tabelle II.2: Jährlicher Strom- und Wärmeverbrauch der betrachteten Gebäude (2019)

Gebäude	Stromverbrauch (MWh)	Wärmeverbrauch (MWh)
Kindertagesstätte	19	57
Verwaltungsgebäude	132	237
Sporthalle	32	135
Grundschule	62	125
Feuerwehr	10	30
Gesamt	256	584

Parallel zur Teilnahme am Projekt CO₂InnO initiierte die Stadt Offenburg einen umfassenden Modernisierungsprozess ihrer Mess- und Datenerfassungsinfrastruktur. Ziel war es, veraltete Technik durch ein zukunftsfähiges, hybrides System zu ersetzen, das sowohl die Anforderungen des kommunalen Energiemanagements als auch zukünftige Aufgaben wie CO₂-Bilanzierung oder die Integration erneuerbarer Energien erfüllt.

Das neue System kombiniert kabelgebundene M-Bus-Technologie mit drahtloser LoRaWAN-Kommunikation und ermöglicht so eine flexible und kontinuierliche Erfassung der Energieflüsse im 15-Minuten-Takt. Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts 30 öffentliche Gebäude erfolgreich angebunden. Nach Projektabschluss ist eine Ausweitung auf den gesamten kommunalen Bestand vorgesehen.

Die erfassten Daten werden zentral auf der städtischen Visualisierungsplattform dargestellt und sind öffentlich zugänglich unter: <https://offenburg.mondas.io/>

II.2.4. Begründung der Simulationsmethodik

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurde methodisch ein simulationsbasierter Ansatz verfolgt, um verschiedene Systemkonfigurationen und Betriebsstrategien eines Energiesystems mit Wasserstoffspeicherung zu analysieren. Diese Entscheidung ermöglichte eine detaillierte Betrachtung technischer Zusammenhänge sowie dynamischer Wechselwirkungen zwischen den Komponenten unter variierenden Randbedingungen.

Im Gegensatz zu Optimierungsansätzen – die typischerweise auf die Ermittlung ökonomisch oder ökologisch idealer Systemauslegungen abzielen – erlaubt die Simulation eine differenzierte Analyse konkreter Szenarien, Regelstrategien und technischer Entscheidungen. Dieser Ansatz ist insbesondere für komplexe Energiesysteme mit vielen Freiheitsgraden geeignet, wie sie beim Einsatz von Wasserstoff als Energiespeicher vorliegen.

Eine systematische Optimierung der CO₂-Emissionen in Relation zu den Investitionskosten war im ursprünglichen Projektantrag nicht vorgesehen und wurde daher innerhalb des Arbeitspakets nicht umgesetzt. Die Stadt Offenburg äußerte im Verlauf des Projekts jedoch den Wunsch nach einem solchen Werkzeug, um ökologische Einsparpotenziale den wirtschaftlichen Aufwendungen gegenüberstellen zu können. Diese Anforderung konnte aus methodischen und förderrechtlichen Gründen nicht nachträglich integriert werden.

II.3. Ergebnisse

II.3.1. Ergebnisse aus dem Reallabor

Im Rahmen der experimentellen Phase des Projekts wurden Einzeltests am modifizierten BHKW sowie am PEM-Elektrolyseur durchgeführt – zwei zentrale Komponenten des wasserstoffbasierten Energiesystems. Die ursprünglich geplante Integration des Gesamtsystems mit der Verdichtereinheit konnte aufgrund technischer Probleme und Lieferverzögerungen nicht

realisiert werden.

Betriebsergebnisse des wasserstofffähigen BHKW

Es wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Wasserstoffanteile im Brennstoffgemisch auf das Betriebsverhalten des BHKW-Motors auswirken. Wie erwartet, sinkt der CO_2 -Ausstoß bei zunehmendem Wasserstoffanteil, da bei der Verbrennung von H_2 kein Kohlenstoff freigesetzt wird.

Zusätzlich wurden Kenngrößen wie Leistung, Wirkungsgrad und NO_x -Emissionen untersucht (Abbildung II-6). Hierzu unterscheiden sich die Konfigurationen wie folgt:

- Config. 1: Serienmotor im Erdgasbetrieb.
- Config. 2: Wasserstoffbeimischung bis zu 25 Vol.-% und Abgasrückführung.
- Config. 3: Zylinder 1 wird mit 100% Wasserstoff betrieben und dessen Abgas in die restlichen drei Zylinder zurückgeführt.

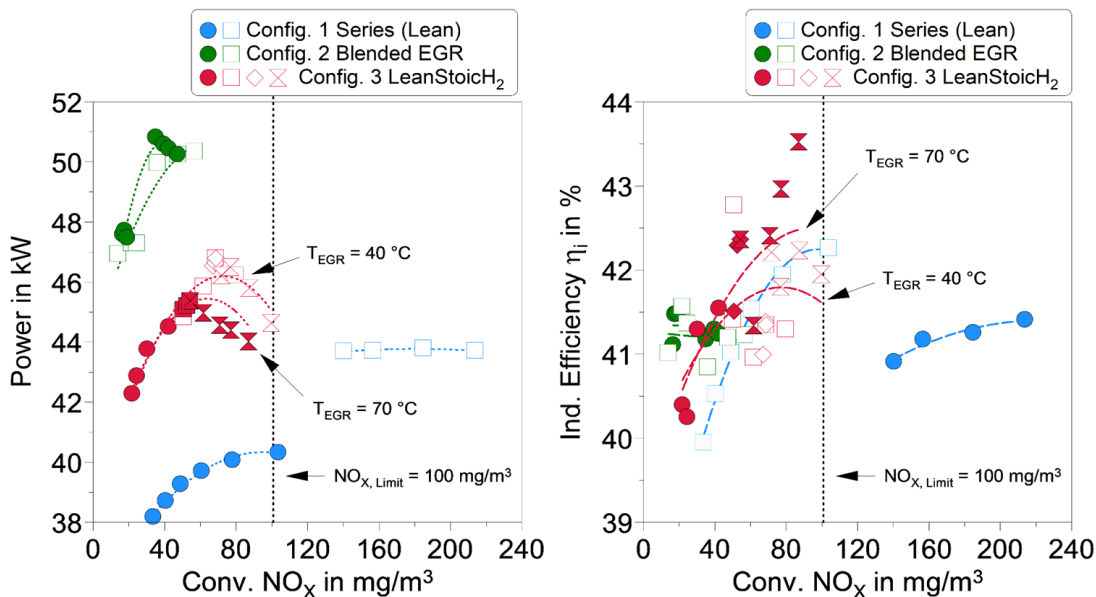


Abbildung II-6: Leistung- und Wirkungsgrad- NO_x Vergleich des BHKW-Motors mit Erdgas und Wasserstoff (Config.: engl. configuration/Konfiguration; EGR: engl. exhaust gas recirculation/Abgasrückführung; Ind.: engl. indicated/indiziert; T: Temperatur).

Die dargestellten Konfigurationen zeigen die Auswirkungen verschiedener Wasserstoffbeimischungen und EGR-Strategien (Exhaust Gas Recirculation/Abgasrückführung) auf die Motorleistung und den Wirkungsgrad. Die Konfiguration 1 (blau) dient als Referenzbetrieb mit reinem Erdgas. Bei Konfiguration 3 (rot) werden ein deutlich höherer Wirkungsgrad und eine gesteigerte Leistung bei gleichzeitig niedrigen NO_x -Emissionen erreicht. Der vertikale Strich markiert den Grenzwert für NO_x -Emissionen von 100 mg/m^3 .

Die Ergebnisse zeigen:

- Eine Leistungssteigerung von bis zu 33 % im Vergleich zum Erdgasbetrieb,
- Eine Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads um etwa 4,8 Prozentpunkte,
- Eine signifikante Reduktion der NO_x-Emissionen.

Ein Betrieb mit 100 % Wasserstoff wurde nicht umgesetzt, wäre laut Prüfstand jedoch grundsätzlich technisch möglich. Eine vertiefte Analyse ist in Pöhlmann et al. (2024) dokumentiert.

Charakterisierung des PEM-Elektrolyseurs

Zur Bewertung des PEM-Elektrolyseurs wurden unter verschiedenen Betriebsbedingungen zahlreiche Messreihen durchgeführt. Dabei kamen Strom- und Spannungsmessgeräte, ein Datenlogger sowie ein Wasserstoff-Durchflusssensor zum Einsatz. Die Tests ermöglichten die Ermittlung zentraler Kenngrößen wie Stromdichte, Zellenspannung, Wasserstoffproduktionsrate und verschiedene Effizienzmetriken. Eine Übersicht der jeweiligen Kennlinien befindet sich im Anhang (Anlage 6 bis 8).

Von besonderem Interesse ist der Vergleich der Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Leistungsaufnahme (Abbildung II-7). Die Auswertung zeigt eindeutig, dass ein Leistungsniveau von etwa 25 % über alle Effizienzmetriken hinweg (Faraday-Wirkungsgrad, Spannungswirkungsgrad, Zellwirkungsgrad, Gesamtwirkungsgrad) den energetisch optimalen Betriebspunkt darstellt. Diese Erkenntnis bietet eine praxisrelevante Orientierung für die spätere Systemauslegung und Modellvalidierung.

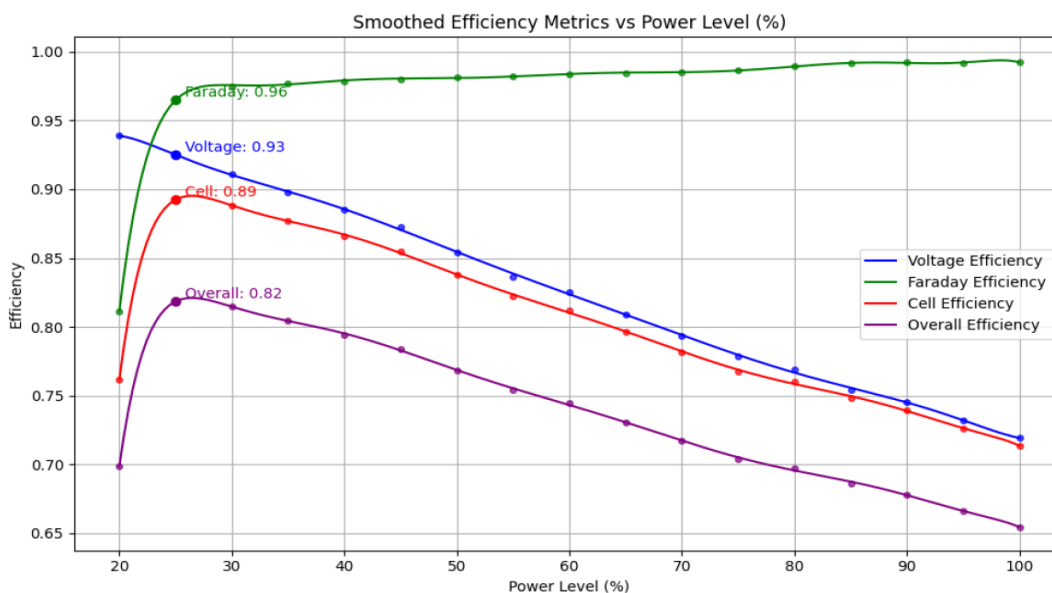


Abbildung II-7: Leistung-Wirkungsgrad-Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs.

II.3.2. Ergebnisse der Simulation

Basierend auf den stündlichen Verbrauchsprofilen von fünf öffentlichen Gebäuden der Stadt Offenburg (siehe Abschnitt II.2.3) wurde das entwickelte Simulationsmodell eingesetzt, um

mögliche Konfigurationen eines dezentralen, wasserstoffbasierten Energiesystems zu analysieren. Ziel war es, das Reduktionspotenzial der CO₂e-Emissionen sowie die technische Betriebsdauer des Systems unter realitätsnahen Bedingungen zu bewerten. CO₂e-Emissionen, oder Kohlendioxid-Äquivalente, sind eine Maßeinheit, die verwendet wird, um die Auswirkungen verschiedener Treibhausgase auf das Klima vergleichbar zu machen.

Die untersuchte Systemarchitektur umfasst:

- ein wasserstoffbetriebenes BHKW,
- eine Photovoltaikanlage (PV),
- einen PEM-Elektrolyseur mit 500 kW,
- einen Wasserstoffspeicher (Druck: 80 bar basierend auf Demonstratoreinheit),
- einen Batteriespeicher (500 kWh) sowie
- eine Wärmepumpe (HP) zur Abdeckung von Bedarfsspitzen.

Das System wurde so ausgelegt, dass das BHKW die thermische Grundlast deckt, während die Wärmepumpe als ergänzender Wärmeerzeuger fungiert. Diese Kombination soll eine möglichst hohe Abdeckung des Wärmebedarfs durch nicht-fossile Quellen ermöglichen und gleichzeitig die Betriebsflexibilität erhöhen.

Die Dimensionierung des wärmegeführten BHKW erfolgte auf Basis der absteigend sortierten Jahreslastdauerlinie. In der Fachliteratur wird empfohlen, zwischen 5.000 und 6.000 Volllaststunden bzw. 10 % bis 30 % des Jahreswärmebedarfs mit einem BHKW zu decken (Lewicki, 2013; Sokratherm GmbH, no date). Für die betrachteten Gebäude wurde – aufgrund des geringen Warmwasserbedarfs und der reduzierten Heizlast im Sommer – eine Zielgröße von 4.000 Volllaststunden bzw. ca. 15 % gewählt.

Als Referenz für die Simulationen wurde das Modell MAH 33.3 TI 311A der Firma MAMOTEC gewählt – ein kommerziell verfügbares Wasserstoff-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 38 kW, einer thermischen Leistung von 53,7 kW und einem Gesamtwirkungsgrad von 85,7 % (siehe Tabelle II.3).

Tabelle II.3: Technische Daten Wasserstoff-BHKW MAH 33.3 TI 311A (P: Leistung; el: Elektrisch; th: Thermisch; total: Gesamt).

<i>MAH 33.3 TI 311A</i>	
<i>Kraftstoff</i>	Wasserstoff
P_{el}	38 kW
P_{th}	53,7 kW
η_{el}	35,5%
η_{th}	50,2%

$$\eta_{total} \quad | \quad 85,7\%$$

Die gewählte Dimensionierung des BHKW spiegelt eine bewusste Strategie wider, nur die thermische Grundlast der betrachteten Gebäude zu decken. Dieses Vorgehen basiert auf etablierten energiewirtschaftlichen Prinzipien, wonach kleinere BHKW bei längeren Laufzeiten wirtschaftlich effizienter arbeiten. Ein größer dimensioniertes BHKW würde zwar einen höheren Anteil der Wärmelast abdecken, käme aber seltener zum Einsatz und wäre somit schlechter ausgelastet. Hinzu kommt, dass die Wasserstoffproduktion mit hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden ist. Ein kleineres BHKW reduziert den Bedarf an Wasserstoff und ermöglicht eine bessere Integration in ein hybrides Energiesystem, in dem Lastspitzen flexibel über eine Wärmepumpe gedeckt werden. Damit wird sowohl eine höhere Effizienz als auch eine bessere Steuerbarkeit des Gesamtsystems erreicht.

Vor der Analyse verschiedener Speichergrößen wurde die optimale Dimensionierung des PEM-Elektrolyseurs festgelegt. Mehrere Tests zeigten, dass eine Leistung von 500 kW eine gleichmäßige Wasserstoffproduktion ermöglicht und hohe Volllaststunden des BHKW begünstigt. Für die Stromerzeugung wurden Kombinationen aus PV- und Windkraftanlagen (WKA) berücksichtigt. Die wichtigsten Konfigurationsmerkmale der simulierten Szenarien sind in Tabelle II.4 zusammengefasst.

Tabelle II.4: Dimensionierung und Bestandteile der dezentralisierten Energiesysteme mit dem MAH 33.3 TI 311A BHKW (BHKW: Blockheizkraftwerk; PV: Photovoltaik; BAT: Batteriespeicher; WKA: Windkraftanlage; HP: engl. heat pump/Wärmepumpe).

Szenario	mit PV	mit PV und WKA
BHKW	38 kWel , 53.7 kWth	
PV	1.8 MWp	0.9 MWp
BAT	500 kWh	
WKA	-	0.5 MWp
HP	197 kW	

Zur besseren Ressourcennutzung wurde das BHKW im Simulationsmodell mit einer Modulationsstrategie betrieben. Diese Entscheidung basiert auf früheren Studien (Florian Beerlage, 2024), die zeigten, dass ein moduliertes BHKW unter der Bedingung einer kontinuierlichen Wasserstoffverfügbarkeit rund 900 kg weniger Wasserstoff pro Jahr benötigt als ein stationär betriebenes (13.700 kg). Diese Einsparung erfolgt jedoch auf Kosten eines leicht reduzierten Wirkungsgrads sowie einer geringeren Wärmedeckung (56 % gegenüber 59 %). Aufgrund der hohen Kosten der Wasserstoffproduktion wurde dennoch die modulierte Betriebsweise bevorzugt.

Die Struktur dieses Szenarios wurde in Abbildung II-2 dargestellt. Die orangefarbenen Blöcke stehen für die untersuchten Variationskombinationen, der graue Block kennzeichnet den Parameter für den Sweep (Parametervariation), und die weißen Blöcke stellen Konstanten während der Durchläufe dar.

Zur Bewertung der Emissionsvermeidung wurden sechs Szenarien simuliert. Dabei wurde ein CO₂e-Emissionsfaktor von 66 g/kWh für den bezogenen Netzstrom angenommen – entsprechend dem durchschnittlichen Wert für deutschen Ökostrom. Die Simulationen zeigen, dass die Kombination aus PV, WKA und Batteriespeicher besonders geringe Emissionen ermöglicht. Eine weitere Vergrößerung des Wasserstoffspeichers über 500 m³ hinaus bringt hingegen kaum zusätzlichen Nutzen im Hinblick auf die CO₂e-Reduktion (siehe Abbildung II-8). Allerdings sind bereits Volumina über 50 m³ aus kommunaler Sicht schwer realisierbar. Dies wirft grundlegende Fragen zur technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit solcher Systeme auf.

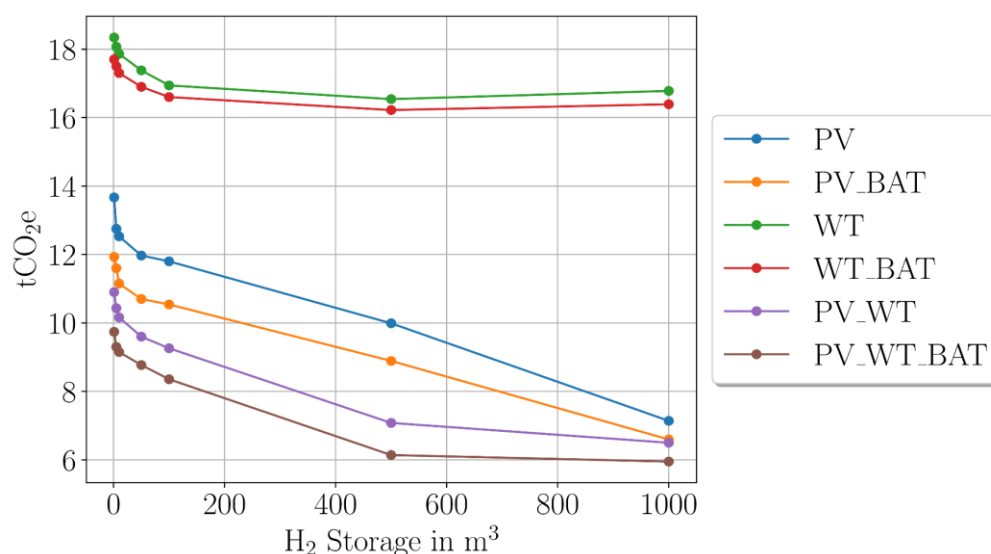


Abbildung II-8: CO₂e-Emissionen je nach Größe des Wasserstoffspeichers (bei 80 bar) (CO₂e: Kohlendioxid-äquivalent; PV: engl. photovoltaic/Photovoltaikanlage; BAT: engl. battery/Batteriespeicher; WT: engl. wind turbine/Windkraftanlage; H₂: Wasserstoff).

Zusätzlich wurden die Volllaststunden des BHKW und die thermische Deckung in Abhängigkeit

der Speichergröße betrachtet (siehe Abbildung II-9). Szenarien mit PV erreichen dabei deutlich höhere Betriebszeiten, während rein windbasierte Szenarien durch unregelmäßige Stromproduktion eingeschränkt sind. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass wasserstoffbasierte Versorgungssysteme grundsätzlich CO₂e-Emissionen mindern können.

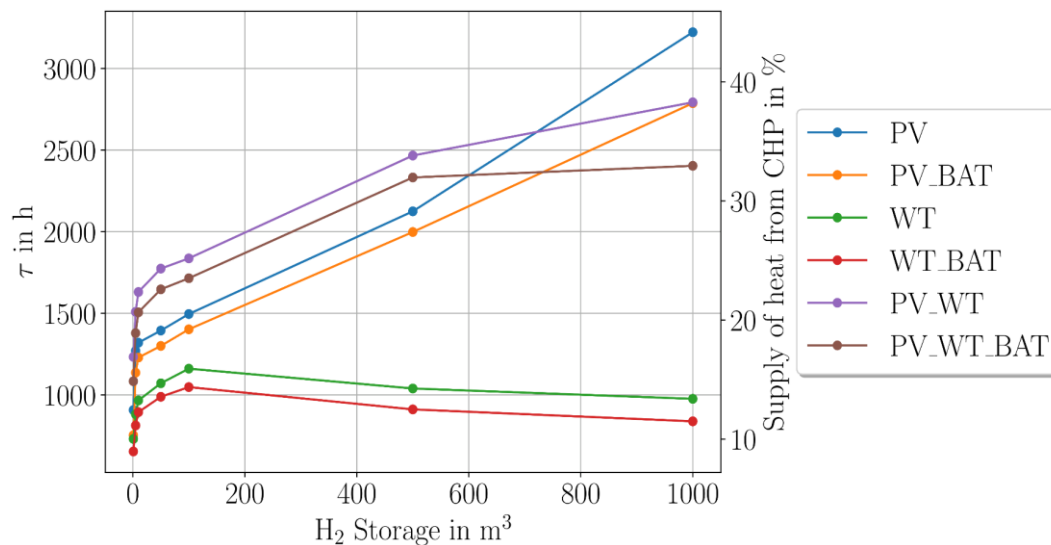


Abbildung II-9: Volllaststunden und Wärmedeckung des BHKWs (CO₂e: Kohlendioxid-äquivalent; PV: engl. photovoltaic/Photovoltaikanlage; BAT: engl. battery/Batteriespeicher; WT: engl. wind turbine/Windkraftanlage; H₂: Wasserstoff; τ: Zeit).

Gleichzeitig offenbaren sie jedoch deutliche technische Grenzen – insbesondere hinsichtlich Speicherbedarfes und Wirtschaftlichkeit. Eine systematische Optimierung unter Berücksichtigung von Investitionskosten und CO₂-Vermeidung wurde im Projekt nicht durchgeführt und bleibt ein offener Punkt für weiterführende Untersuchungen.

II.3.3. Implementierung eines wasserstoffbasierten Energiesystems auf kommunaler Ebene

Im Rahmen des Projekts CO₂InnO wurde ein umfassendes Verständnis für die technischen und organisatorischen Anforderungen beim Aufbau eines wasserstoffbasierten BHKW-Systems entwickelt. Daraus lässt sich eine Roadmap ableiten, die die zentralen Schritte beschreibt, die eine Gemeinde durchlaufen muss, um ein solches System erfolgreich zu planen und umzusetzen.

Zu Beginn sollte eine Kommune eine detaillierte Analyse des Energiebedarfs aller relevanten Gebäude durchführen. Dazu zählen sowohl Strom- als auch Wärmeverbräuche, idealerweise auf Basis von Lastprofilen mit hoher zeitlicher Auflösung. Parallel dazu ist es sinnvoll, die bestehende Infrastruktur zu erfassen - beispielsweise vorhandene PV-Anlagen, Heizsysteme oder Messgeräte. Auf dieser Grundlage lassen sich konkrete Ziele formulieren, etwa die Reduktion der CO₂-Emissionen, ein höherer Anteil erneuerbarer Energien oder eine verbesserte Versorgungssicherheit.

Im nächsten Schritt ist der Aufbau einer geeigneten Monitoring-Infrastruktur essenziell. Wie im Projekt CO2InnO demonstriert, bieten sich hybride Systeme aus kabelgebundenem M-Bus und drahtloser LoRaWAN-Technologie an, um die kontinuierliche Datenerfassung in kommunalen Gebäuden zu sicherzustellen. Diese Daten bilden die Grundlage für die Simulation potenzieller Systemkonfigurationen.

Ein zentrales Element des Projekts war die Entwicklung eines digitalen Simulationsmodells, das reale Verbrauchsdaten verarbeitet und unterschiedliche Szenarien abbildet. Gemeinden können dieses öffentlich zugängliche Modell nutzen, um verschiedene Kombinationen aus BHKW, Elektrolyseur, Speicher und Wärmepumpe hinsichtlich ihrer technischen und ökologischen Eignung zu prüfen. Dabei können ebenso unterschiedliche Steuerstrategien oder Ausbauprodukte berücksichtigt werden.

Auf Basis der Simulationsergebnisse erfolgt dann die Auswahl geeigneter Technologien sowie die Dimensionierung der einzelnen Komponenten. In der Praxis hat sich gezeigt, dass eine wärmegeführte Betriebsweise des BHKW in Kombination mit einer ergänzenden Wärmepumpe eine hohe Flexibilität ermöglicht. Die Speichergröße für Wasserstoff ist dabei ein kritischer Faktor: Speichergrößen von mehr als 50 m³ bei 80 bar sind aus Sicht vieler Kommunen nur schwer realisierbar. Dies muss bei der Auslegung des Gesamtsystems berücksichtigt werden.

Sobald ein technisches Konzept vorliegt, beginnt die planerische Umsetzung. Dazu gehören die Auswahl geeigneter Standort, aufgrund der kritischen H₂-Speichergröße, die Abstimmung mit Behörden, die Einholung notwendiger Genehmigungen sowie die Prüfung sicherheitsrelevanter Aspekte. Parallel sollte eine erste Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgen, bei der Investitions- und Betriebskosten den erwarteten CO₂-Einsparungen gegenübergestellt werden. Fördermittel auf Landes-, Bundes- oder EU-Ebene können hierbei eine wichtige Rolle spielen. Die Umsetzung umfasst schließlich die Ausschreibung, den Aufbau und die Inbetriebnahme der Systemkomponenten sowie die Schulung des Personals. Auch nach dem Start des Betriebs ist ein kontinuierliches Monitoring notwendig, um den Energiefluss zu optimieren und mögliche Abweichungen frühzeitig zu erkennen.

Insgesamt zeigt sich, dass der Weg zu einem wasserstoffbasierten BHKW-System zwar mit erheblichen Anforderungen verbunden ist, durch digitale Planungs- und Simulationstools jedoch gut strukturiert und effizient begleitet werden kann.

II.3.4. Bewertung aus kommunaler Sicht

Aus Sicht der Stadt Offenburg liefert das Projekt CO2InnO wertvolle Erkenntnisse zur technischen Machbarkeit und zu den Grenzen wasserstoffbasierter Versorgungssysteme im kommunalen Kontext. Die auf realen Verbrauchsprofilen basierenden Simulationen erlauben eine praxisnahe Bewertung verschiedener Systemarchitekturen und deren Potenzial zur Reduktion von CO₂e-Emissionen.

Besonders hervorzuheben sind der Realitätsbezug des Modells sowie die Transparenz der getroffenen Annahmen. Die Kombination aus BHKW, PEM-Elektrolyseur, Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie Wärmepumpe zeigt eine hohe technische Flexibilität. Die Simulationsergebnisse bestätigen, dass durch den gezielten Einsatz erneuerbarer Energien und modularer Betriebsstrategien relevante Emissionsminderungen möglich sind.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse auch deutliche Grenzen auf: Die für eine ganzjährige Versorgung erforderlichen Speichergrößen – insbesondere für Wasserstoff – sind aus kommunaler Sicht nur schwer realisierbar. Bereits Volumina über 50 m³ bei einem Druck von 80 bar stellen hohe Anforderungen an Sicherheit, Kosten und Platzbedarf. Auch bei optimierten Betriebsstrategien bleibt die wirtschaftliche Tragfähigkeit solcher Systeme fraglich. Zwar lässt sich der Wasserstoffverbrauch durch Modulation reduzieren, dies geht jedoch zulasten der thermischen Deckung.

Ein weiterer Punkt betrifft die gewählte Systemkonfiguration: Der parallele Einsatz eines BHKW und einer Wärmepumpe erhöht die Systemkomplexität und wirft Fragen hinsichtlich der Ressourceneffizienz auf. Vor einer etwaigen Umsetzung wäre zu prüfen, ob alternative Konzepte – etwa eine rein elektrische Wärmeversorgung mit thermischem Speicher – wirtschaftlicher und robuster wären.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass einige kommunale Gebäude in Offenburg bereits energetisch saniert wurden. Zwar sinkt dadurch der Wärmebedarf, jedoch ist zu erwarten, dass sich die Lastprofile insgesamt verändern – nicht nur in ihrer Höhe, sondern auch in ihrem zeitlichen Verlauf. Dies ist unter anderem auf neue Technologien zur Wärmebereitstellung und Raumlufttechnik zurückzuführen, die im Zuge der Sanierung implementiert werden. Die Stadt befindet sich aktuell in der Phase der Inbetriebnahme und Datenerfassung solcher Gebäude. Eine zukünftige Modellierung dieser Effekte stellt ein wichtiges Forschungsvorhaben dar, um die Systemplanung weiter zu präzisieren.

Nicht zuletzt hätte eine systematische Optimierung unter Einbeziehung von Investitionskosten, Betriebskosten und CO₂-Vermeidungspotenzial eine fundiertere Entscheidungsgrundlage für kommunale Akteure geschaffen. Dieser Aspekt wurde im Projekt nicht behandelt, bleibt aber für weiterführende Untersuchungen von großer Bedeutung.

Insgesamt bietet das Projekt trotz der genannten Einschränkungen eine solide technische Basis für weiterführende Forschung und für die strategische Planung einer klimafreundlichen Energieversorgung auf kommunaler Ebene.

II.3.5. Nutzung der grafischen Benutzeroberfläche

Zur Vereinfachung der Bedienung des entwickelten Simulationsmodells wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) in der Programmiersprache Python implementiert. Ziel war es, insbesondere kommunale Akteure ohne Programmierkenntnisse zu befähigen, verschiedene

Systemkonfigurationen zu analysieren und deren Auswirkungen auf Emissionen und Energieflüsse zu simulieren. Die GUI bietet somit einen niederschweligen Zugang zur Nutzung des Digitalen Zwillings.

Die Oberfläche gliedert sich in drei interaktive Eingabebereiche:

1. Eingabe der Modelldaten (z. B. Verbrauchsprofile),
2. Definition der Systemparameter (z. B. Dimensionierung einzelner Komponenten),
3. Festlegung der Simulationsbedingungen (z. B. Zeiträume oder Regelstrategien).

Ein erster Überblick der Benutzeroberfläche ist in Abbildung II-10 dargestellt.

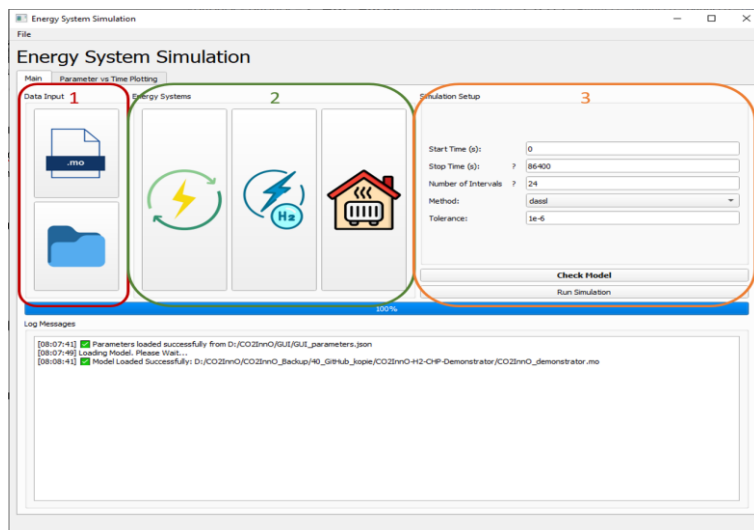


Abbildung II-10: Das Dashboard der Benutzeroberfläche

Für eine detailliertere Analyse bietet die GUI einen integrierten Ergebnisplotter, mit dem die berechneten Daten grafisch dargestellt und direkt ausgewertet werden können. Dies umfasst sowohl Energiebilanzen als auch zeitliche Verläufe von CO₂-Emissionen, Speicherständen und Betriebsmodi.

Eine ausführliche Installations- und Bedienungsanleitung zur Nutzung der GUI ist im Anhang dokumentiert.

II.4. Probleme und Herausforderungen

Zu Beginn des Projekts war vorgesehen, dass das BHKW als zentrale Komponente die benötigte Energiemenge bereitstellt. Daher lag der Fokus zunächst auf der Abdeckung der thermischen Grundlast durch das BHKW.

Eine Weiterentwicklung des Simulationsmodells zur genaueren Untersuchung der Abdeckung von thermischen Spitzenlasten durch das BHKW war angedacht, wurde jedoch im weiteren Projektverlauf nicht umgesetzt. Grund dafür war vor allem der hohe Zeitaufwand für die Pro-

grammierung sowie die zusätzliche Komplexität des Modells, insbesondere vor dem Hintergrund fehlender technischer Unterstützung der Modelica-Umgebung. Angesichts des Projektzeitrahmens wurde entschieden, diese Erweiterung nicht weiterzuverfolgen. Stattdessen wird dieser Ansatz in einem potentiellen Folgeprojekt angestrebt.

Im Verlauf des Projekts wurden in mehreren Austauschrunden zwischen den Projektpartnern weiterführende Überlegungen diskutiert, um dem Vorhaben neben der technischen Tiefe auch einen stärker anwendungsorientierten Fokus zu geben. Ziel war es, realistische Entscheidungsgrundlagen für kommunale Akteure zu schaffen – unter Berücksichtigung knapper Haushaltsmittel und der ambitionierten Zielvorgaben zur Klimaneutralität bis 2035.

So entstand unter anderem der Impuls, das entwickelte Simulationsmodell um eine Optimierungsperspektive zu ergänzen. Anstatt ausschließlich einzelne Szenarien zu simulieren, wäre es denkbar gewesen, mit Hilfe mathematischer Verfahren verschiedene grüne Energiesysteme automatisiert zu vergleichen – etwa hinsichtlich Investitionskosten und CO₂-Einsparpotenzial. Eine solche Betrachtung hätte dazu beigetragen, die Relevanz von wasserstoffbasierten Systemen besser einzuordnen – gerade im Vergleich zu anderen dezentralen Technologien.

Ein direkter Vergleich mit alternativen Konzepten, wie beispielsweise einer rein elektrischen Wärmeversorgung, war im Rahmen des Projekts nicht vorgesehen. Der Fokus lag auf der Untersuchung eines dezentralen BHKW-Konzepts. Ein solcher Vergleich hätte eine umfassende Erweiterung des Simulationsmodells erfordert, was ebenfalls mit erheblichem Zeitaufwand verbunden gewesen wäre. Aus diesen Gründen wurde darauf verzichtet.

Die Umsetzung dieser Idee war im gegebenen Projektzeitrahmen jedoch nicht möglich und war auch nicht explizit im ursprünglichen Projektantrag vorgesehen. Dennoch wurde das Thema im Konsortium als relevant erkannt und bleibt als Ansatzpunkt für zukünftige Forschung bestehen. Gerade auf kommunaler Ebene braucht es Werkzeuge, die nicht nur wissenschaftlich fundierte Ergebnisse liefern, sondern auch eine praxisnahe Bewertung ökonomischer und ökologischer Kriterien ermöglichen.

Des Weiteren war es aufgrund der Programmierungskomplexität an erster Stelle nicht möglich, die rechtlichen Rahmenbedingungen in das Simulationstool zu integrieren. Diese bleibt ebenfalls als weiterer Ansatzpunkt im potentiellen Nachfolgeprojekt.

Darüber hinaus zeigten sich im Rahmen der GUI-Nutzung einzelne technische Herausforderungen, insbesondere bei der Installation der nötigen Open-Source-Bibliotheken. Obwohl Open-Source-Lösungen große Vorteile in Bezug auf Transparenz und Kostenfreiheit bieten, setzen sie bei der Anwendung teilweise technisches Vorwissen voraus und erfordern eine sorgfältige Dokumentation. Die entwickelte grafische Oberfläche erfüllt ihren Zweck und bietet eine zugängliche Möglichkeit zur Durchführung und Visualisierung von Simulationen, insbesondere

für technisch versierte Nutzerinnen und Nutzer. Eine Weiterentwicklung in Richtung einer web-basierten Lösung mit noch einfacherem Zugang wäre ein sinnvoller nächster Schritt zur Förderung der kommunalen Anwendung.

II.5. Abweichungen zum Projektplan

Im Rahmen des Projekts wurden keine Smart Meter implementiert, da der BHKW-Prüfstand speziell für Forschungszwecke als Einzeleinheit aufgebaut war. Anstelle eines Generators war das BHKW an eine Wirbelstrombremse gekoppelt, sodass keine elektrische Energie eingespeist oder direkt gemessen werden konnte. Die erzeugte mechanische Leistung konnte jedoch aus den Messdaten der Bremse rechnerisch bestimmt werden. Die bei der Verbrennung entstehende Wärme wurde über Temperaturmessungen der Abgase analysiert.

Die im Projekt ursprünglich vorgesehene Untersuchung des Zusammenspiels zwischen dem BHKW-Motor, dem Elektrolyseur und der Verdichtereinheit konnte im Projektverlauf nicht realisiert werden. Grund hierfür waren Lieferverzögerungen und Personalprobleme sowie technische Probleme seitens des Zulieferers der Verdichtereinheit. Aufgrund der fehlenden Komponente war es nicht möglich, die geplanten Systemtests und Betriebsanalysen im Verbund durchzuführen. Die Untersuchungen beschränkten sich daher auf isolierte Tests der einzelnen Komponenten, insbesondere des BHKW-Motors und des Elektrolyseurs. Für einen zukünftigen kombinierten Betrieb müsste die Verdichtereinheit – beziehungsweise die dazugehörige Speichereinheit – an die spezifischen Anforderungen der Wasserstoffproduktion und des -verbrauchs physikalisch angepasst bzw. skaliert werden. Nur so kann ein effizienter und sicherer Systembetrieb gewährleistet werden.

II.6. Ausblick

Die im Projekt entwickelten Modelle und Simulationswerkzeuge verdeutlichen, dass wasserstoffbetriebene BHKW grundsätzlich in kommunale Energiesysteme integrierbar sind und zur Minderung von CO₂e-Emissionen beitragen können. Gleichzeitig wurde deutlich, dass für eine fundierte Bewertung der praktischen Umsetzbarkeit noch wesentliche Untersuchungen fehlen – insbesondere im Hinblick auf Investitionskosten, Betriebskosten und die Skalierbarkeit solcher Systeme unter realen Bedingungen.

Aus Sicht kommunaler Akteure besteht daher ein klarer Forschungsbedarf, um verschiedene grüne Energiesysteme mithilfe von Optimierungsmodellen systematisch vergleichen zu können. Ziel ist es, technisch realistische Lösungen zu identifizieren, die unter Berücksichtigung verfügbarer Budgets eine möglichst hohe CO₂-Vermeidung ermöglichen.

Ein nächster Entwicklungsschritt könnte darin bestehen, die bestehende Simulationsumgebung durch Methoden der Künstlichen Intelligenz zu erweitern. Auf diese Weise ließe sich eine anwenderfreundliche Planungsplattform schaffen, mit der kommunale Entscheidungsträger

Szenarien modellieren, bewerten und auf konkrete Anwendungsfälle zuschneiden können – etwa in Verbindung mit Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge oder der Kombination verschiedener erneuerbarer Energiequellen. Dies würde es ermöglichen, zukünftige Energieprojekte ganzheitlich zu denken und praxisnah umzusetzen.