

# Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Power-to-Gas-Projekten mittels GHOST und Validierung mit EnergyPLAN

Franziska Hönig<sup>(\*)</sup>, Diana Duque-Gonzalez, Martin Hafemann, Jens Schneider, Matthias Ebert, Ulrich Blum

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Otto-Eißfeldt-Straße 12, 06120 Halle (Saale), Tel.: +49 345 5589 5216, franziska.hoenig@csp.fraunhofer.de, www.csp.fraunhofer.de

**Kurzfassung:** Wasserstoff besitzt ein großes Potential, ein wichtiger „Baustein bei der Abkehr von fossilen Brennstoffen in der Industrie und Mobilität zu werden“ [1]. Er kann in die bestehende Erdgasinfrastruktur integriert werden und so den Kohlenstoffausstoß von Erdgas als Energie für Heizung, Verkehr und Industrie reduzieren. Darüber hinaus kann er als kohlenstofffreier Energieträger in Verkehrs-, Logistik- und Industrieprozessen, wie in der chemischen Industrie, oder als Energiespeicher für die Stromerzeugung eingesetzt werden und trägt damit maßgeblich zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung bei. Dies ist jedoch nur bei mit Erneuerbaren Energien erzeugtem Wasserstoff der Fall. Hier kommt das Power-to-Gas (PtG)-Verfahren ins Spiel, welches Wasserstoff und Sauerstoff frei von Kohlendioxidemissionen erzeugen kann, solange die Energiequelle regenerativ ist. Wird ein Strommix aus erneuerbaren und fossilen Energieträgern verwendet, sind für jeden Fall die entstandenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu überprüfen. Ab 2020 wird es die CO<sub>2</sub>-Regulierung geben, dass Neuwagen den gesetzlich fixierten Grenzwert von 95 g CO<sub>2</sub>/km nicht überschreiten dürfen [2].

Für die Auslegung von PtG-Anlagen und die Simulation des Gesamtsystems gibt es verschiedene Modelle. In den meisten Fällen ist nur das Produkt Wasserstoff interessant, weswegen auf bisherige Simulationstools zurückgegriffen werden kann. Das gleichzeitig anfallende Koppelprodukt Sauerstoff spielt eine untergeordnete Rolle, kann aber bei bestimmten Anwendungsgebieten zu einer Nutzenoptimierung führen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des HYPOS-Projektes LocalHy ein neues Simulationstool GHOST entwickelt, das sowohl den Wasserstoff- als auch den Sauerstoffpfad und diverse Anwender berücksichtigt. Mit diesem ist es mitunter möglich, die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen durch die Nutzung eines realen Strommixes für die Wasserelektrolyse entstehen, zu ermitteln. Bei GHOST handelt es sich um ein neues Simulationswerkzeug, welches zum jetzigen Zeitpunkt mit noch keinen Realdaten aus dem Testbetrieb validiert werden konnte. Um das hinterlegte Elektrolyseverhalten dennoch abgleichen zu können, wurde das bereits für Energiesystemmodelle für Deutschland genutzte Simulationstool EnergyPLAN der Universität Aalborg herangezogen [3, 4].

**Keywords:** Wasserelektrolyse, Wasserstoff, Sauerstoff, Power-to-Gas (PtG), Erneuerbare Energien, Energiesystemmodelle, Validierung, GHOST, EnergyPLAN, Net Present Value (NPV)

## 1 Motivation

Der größte Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist auf den menschlichen Energiekonsum und den dafür benötigten Vorketten zurückzuführen [5, 6]. Dabei stellt der Endenergiebedarf für den Sektor Verkehr einen entscheidenden Teil dar. Die Elektromobilität kann zur Energiewende maßgeblich beitragen, unter der Voraussetzung, dass der Strom ebenfalls aus Erneuerbaren Energien erzeugt wird [7]. Solange der aktuelle Strommix bezogen wird, fallen dennoch CO<sub>2</sub>-Emissionen an, die es zu ermitteln gilt. Für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit Wasserstoff werden neben den bisherigen Herstellungsverfahren wie beispielsweise Dampfreforming auch Power-to-Gas-Anlagen für eine umweltfreundlichere Herstellung benötigt werden, die mittels Strom aus Wasser die beiden Produkte Wasserstoff und Sauerstoff erzeugen, um die Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen [8].

Die Verifizierung und Validierung von neuen Simulationsmodellen entscheiden darüber, ob diese für Auslegungszwecke für Demonstrationsprojekte genutzt werden können.

## 2 Aktueller Stand Energiesystemmodelle

Es gibt bereits mehrere Simulationsumgebungen, die für die Auslegung von Wasserelektrolyseuren herangezogen werden können. Hier sind insbesondere TRNSYS [9], Matlab Simulink [10], Aspen Custom Modeler [11], Aspen Plus [12], INSEL [13], EDGAR [14] und EnergyPLAN [4] zu nennen. Speziell für die techno-ökonomische Auslegung eines Elektrolyseurs mit Wasserstoff- und gleichzeitig Sauerstoffanwendern mit diversen Anforderungen, wie es für das HYPOS-Projekt LocalHy innerhalb des BMBF Zwanzig20-Programmes benötigt wurde, gab es keine vorgefertigte Lösung, sodass ein eigenes Simulationstool, genannt GHOST für *Green Hydrogen Oxygen Simulation Tool*, entwickelt wurde.

### 2.1 GHOST

Mittels GHOST ist es möglich, Power-to-Gas-Konzepte gekoppelt mit Öko- bzw. Graustrom abzubilden und für jeden individuellen Bedarfsfall die optimale Systemkonfiguration sowohl technisch als auch wirtschaftlich zu ermitteln [15]. Speziell für die Betankung der Brennstoffzellenfahrzeuge als Wasserstoffabnehmer kann so der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck je nach ausgewählter Energie berechnet werden. Als Zielgrößen im Allgemeinen werden der *Kapitalwert* (NPV,  $K_0 > 0$ , so groß wie möglich), die CO<sub>2</sub>-Bilanz ( $< 95 \text{ g CO}_2/\text{km}$ ) als *Klimawert* und als *Zuverlässigkeitswert* die Anzahl der Fälle, in denen es zu einer fehlenden Deckung des Bedarfs kommt, angesehen. Hierbei ist es möglich, die Anzahl der Fälle von vornherein auf null zu beschränken, in dem bei den Verbrauchern die Prio 1-Einstellung gewählt wird. Falls die Konstellation der eingestellten Komponenten den Bedarf nicht decken kann, bricht die Simulation ab und die Konfiguration muss entsprechend der angezeigten Fehlermeldungen angepasst werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, diese Fälle bei der Prio 2-Einstellung zuzulassen und so die Anzahl der Fälle und die fehlenden Kilogramm an Wasserstoff oder Sauerstoff aufzuzeichnen und die Simulation entsprechend nicht zu unterbrechen. [16]

In GHOST gibt es drei Möglichkeiten für den Elektrolyseurbetrieb (Dauerbetrieb, nur während der Sonnenstunden und Standardbetrieb). Zudem wurde eine Regelung für Flauten implementiert und das Einstellen des optimalen Teillastbereiches des Elektrolyseurs unter Berücksichtigung des Strombezuges der Verdichter zur bestmöglichen Ausnutzung der Erneuerbaren

Energien und zur Reduzierung des Netzstrombezuges. In Abbildung 1 ist die Programmoberfläche zu erkennen.

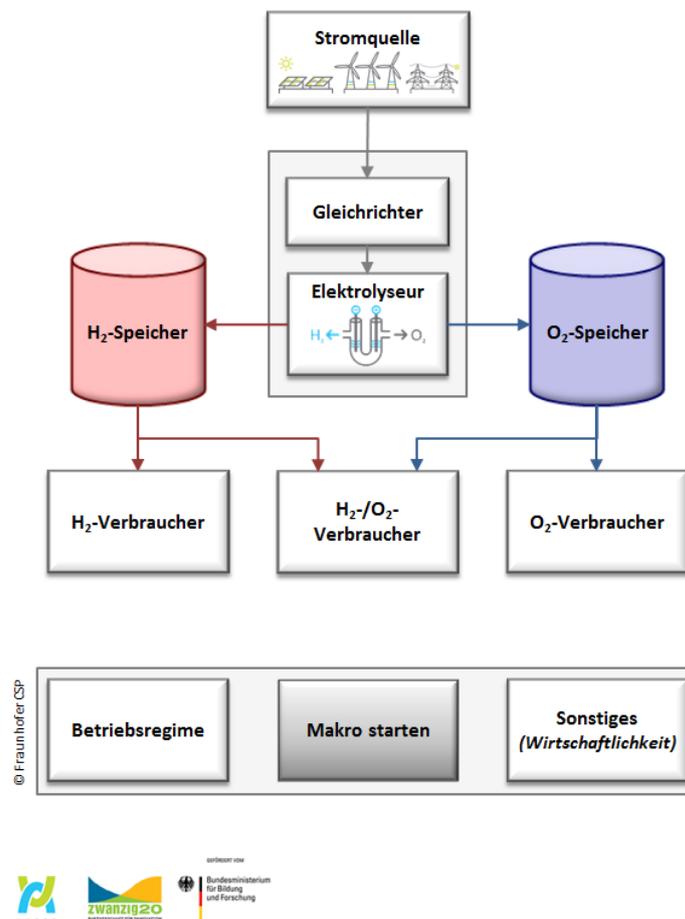


Abbildung 1 Benutzeroberfläche des Systemanalysetools GHOST

## 2.2 EnergyPLAN

EnergyPLAN ist ein frei verfügbares Energiesystemsimulationstool der dänischen Universität Aalborg und basiert auf einem deterministischen Input/Output-Modell. Das Programm ermöglicht die energetische und wirtschaftliche Analyse von Energiesystemen in den Sektoren Elektrizität, Wärme und Mobilität auf stündlicher Basis mit stoff- und energiestromoptimierten Berechnungsmethoden. Der maximal betrachtbare Zeithorizont beträgt dabei ein Jahr. Modelle können anhand der gängigsten thermischen und regenerativen Speicher-, Umwandlungs- und Transporttechnologien erstellt werden, wobei die einzelnen Technologien vom Programm aggregiert und abstrahiert dargestellt werden. [4] Eingaben werden dabei auf sektoral getrennten Eingabemasken in Form von technologischen und ökonomischen Parametern sowie prädiktiven Verteilungen für Energieproduktion und Bedarf getroffen (vgl. Abbildung 2). Zu den Simulationsergebnissen gehören neben dem jährlichen Brennstoffbedarf und den Kosten des Energiesystems auch Import/Export-Bilanzen von Elektrizität bzw. Erdgas und die Menge der Treibhausgasemissionen.

Electrolysers							
Electrolyser unit	Demand TWh/year	Capacities		Efficiencies			Hydrogen Storage GWh
		MW-e	MJ/s	fuel	DH gr2	DH gr3	
Transport and Electrofuel*	0,00	<input type="text" value="0"/>		0,73	0,00	0,05	<input type="text" value="0"/> GWh
Transport (Hydrogen)	0,00			<input type="text" value="0,73"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,05"/>	
Industry (Hydrogen)	0,00			<input type="text" value="0,73"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,05"/>	
Electrofuel (Biomass)	0,00			<input type="text" value="0,73"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,05"/>	
Electrofuel (Biogas)	0,00			<input type="text" value="0,73"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,05"/>	
Electrofuel (CO2)	0,00			<input type="text" value="0,73"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,05"/>	
Ammonia (NH3)	0,00			<input type="text" value="0,73"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,05"/>	
Micro CHP		<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="0,73"/>			<input type="text" value="0"/> GWh
CHP and Boilers in Group 2		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,73"/>	<input type="text" value="0,05"/>		<input type="text" value="0"/> GWh
CHP and Boilers in Group 3		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,73"/>		<input type="text" value="0,05"/>	<input type="text" value="0"/> GWh

Abbildung 2 Elektrolyseurinformationen des Energiesystemsimulationstools EnergyPLAN [4]

Neben der relativ leichten Zugänglichkeit, gekennzeichnet durch eine einfache Bedienbarkeit und Übersichtlichkeit, zeichnet sich EnergyPLAN besonders gegenüber anderen Open-Access-Modellen durch seine breite energiesektorale Abdeckung aus (vgl. Abbildung 3) [17]. Zudem werden dank der deterministisch-analytischen Programmstruktur sehr kurze Berechnungszeiten ermöglicht, die reproduzierbaren Simulationsergebnisse liefern, was insbesondere die Gegenüberstellung verschiedener Versorgungsstrukturen und -szenarien ermöglicht. Die Simulationen liefern dabei realitätsnahe Werte, beispielsweise erkennbar an verschiedenen Referenzmodellen. So liegen die relativen Abweichungen eines Referenzmodells für das deutsche Energiesystem von 2015 im Primärenergiebedarf bei insgesamt 1,3% und bei den resultierenden Emissionen bei 3,7% [3].

Anwendung findet das Programm vor allem in wissenschaftlichen Untersuchungen zur Darstellung und Entwicklung von regionale und nationale Energiesystemen, wie beispielsweise in der Integration verschiedener Wärmeversorgungsstrategien und im optimierten Ausbau von erneuerbaren Energiesystemen in China [18, 19] oder der sozioökonomischen Beurteilung von Wärmepumpeninstallationen in einem Inselnetz [20]. Als Grundlage für die Untersuchungen werden von den Entwicklern bereits Referenzmodelle von 22 Ländern und eine Vielzahl szenarienspezifischer Modelle auf der Website zur Verfügung gestellt [4].

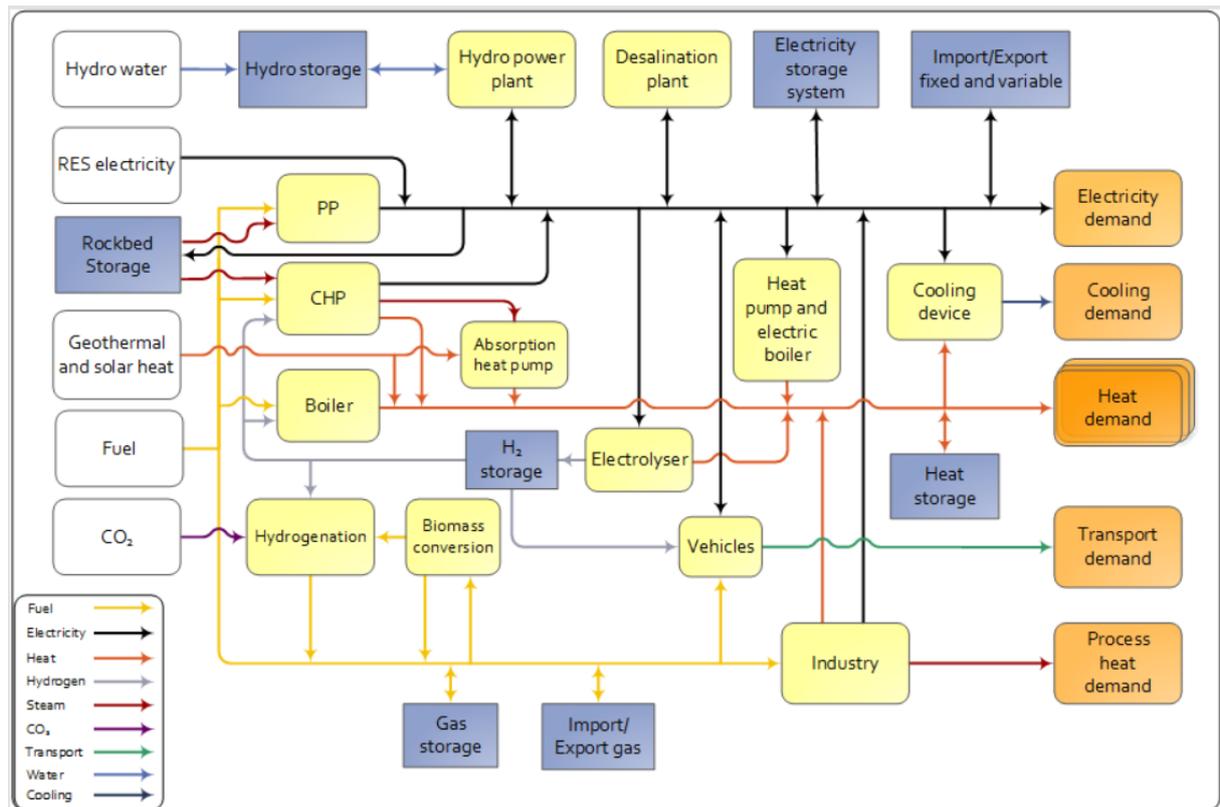


Abbildung 3 Energietransformationsschema in EnergyPLAN [4]

### 3 Validierung

Beide Programme werden für die Anwendung des Wasserstoffs für Mobilitätsw Zwecke verglichen. Das neu entwickelte Tool GHOST soll so auf seine Einsetzbarkeit validiert werden, indem das Betriebsverhalten der Elektrolyseure in Abhängigkeit des Tankverhaltens und der Fluktuation der Photovoltaikanlage miteinander verglichen wird.

#### 3.1 Unterschiede zwischen den Tools

GHOST ist ein sehr technologiespezifisches Tool, das die technischen Rahmenbedingungen und das Betriebsverhalten eines Elektrolyseurs möglichst realitätsnah darstellen soll. Technische Parameter können genau und dem jeweiligen Betriebszustand entsprechend definiert werden. Demgegenüber steht EnergyPLAN mit seinem allgemeinen Ansatz zur Modellierung von gesamten Energiesystemen, der auf einer abstrahierten Darstellung gängiger energiewirtschaftlicher Technologien beruht. Das Betriebsverhalten der modellierten Komponenten wird dabei durch wenige Parameter wie der umsetzbaren Leistung, den Anlagenwirkungsgrad und den energetischen Bedarf beschrieben. Bei der Vorbereitung des Validierungsszenarios haben sich mehrere Unterschiede zwischen den verwendeten Tools gezeigt, die stellenweise Anpassungen von GHOST zum Zweck der Vergleichbarkeit der Ergebnisse erforderlich machen. Die Unterschiede lassen sich in Abweichungen bei den technischen Parametern und dem Betriebsverhalten der Elektrolyseure zusammenfassen.

Die größte parametertechnische Abweichung war, dass sich in EnergyPLAN kein Mindestlastbereich, keine Arbeitspunkte und keine variablen Wirkungsgrade bei unterschiedlichen

Teillastbetriebspunkten definieren lassen. Um den Vergleich zwischen den Tools zu ermöglichen, wurde daher die Wasserstoffproduktion in den Teillastbereichen in GHOST linear interpoliert. Außerdem ist es nicht wie bei GHOST möglich, den Wasserstoffbedarf an der Tankstelle nach bestimmten Kriterien zu simulieren. Dieser wurde anhand der Vorgaben von GHOST als eine Bedarfsverteilung erstellt und übernommen. Zudem ist eine drucktechnische Betrachtung von Fluiden in EnergyPLAN nicht möglich. Die benötigte Verdichterleistung und ihre zeitliche Auflösung sind daher komplett von GHOST übernommen. Da die Gegenstände der Validierung das Betriebsverhalten der Elektrolyseure und die Ermittlung der Emissionen der kompletten Anlage sind, bleibt die Vergleichbarkeit der beiden Programme trotzdem erhalten. Außerdem werden Gleichrichter und andere Peripheriegeräte für die Elektrolyseure von EnergyPLAN nicht separat erfasst. Daher wurden die entsprechenden Wirkungsgrade miteinander verrechnet. Bei EnergyPLAN gibt es keine gesonderte Einstellung für das Betriebsverhalten des Elektrolyseurs. Eine Vergleichbarkeit der beiden Tools ist somit nur im Standardbetrieb möglich. Die parametertechnischen Anpassungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 Abweichende technische Parameter zwischen GHOST und EnergyPLAN

Abweichung <sup>1)</sup>	Lösungsansatz
Mindestteillastbereich für den Elektrolyseurbetrieb nicht definierbar	Einschränkung des Mindestteillastbetriebs wird aufgehoben
Wirkungsgrad bei Teillastbetrieb ist konstant	Lineare Interpolation der Wasserstoffproduktionen je Teillastbereich in GHOST
Betrachtung des Wasserstoffdrucks nicht möglich	Energiebedarf der Verdichter separat angerechnet
Maximale Wasserstoffproduktion je Zeiteinheit kann nicht definiert werden	-
Gleichrichter werden technisch nicht betrachtet	Wirkungsgrade von Gleichrichter und Elektrolyseur miteinander verrechnet
<sup>1)</sup> Alle Abweichungen sind bezogen auf die Einstellungen von EnergyPLAN	

Aufgrund der technischen und systematischen Abstrahierungen in EnergyPLAN wird auch das Betriebsverhalten der Elektrolyseure vereinfacht dargestellt, was zu einigen kritischen Fehlern in der Simulation führen kann, die unbedingt zu vermeiden sind. Grundlage für das Betriebsverhalten der Elektrolyseure in EnergyPLAN ist eine bedarfsgeführte und energieflossoptimierte Berechnung der Eingangsleistung an der Elektrolyseuranlage. Steht nicht genug Energie aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung, um neben der Peripherie der Anlage auch den Elektrolyseur zu speisen, wird dieser ganzjährig von EnergyPLAN mit einer konstanten Eingangsleistung betrieben, um Erzeugungsschwankungen bei konventionellen Kraftwerken zu vermeiden und die Grundlast im System zu erhöhen. GHOST trifft diese Unterscheidung nicht. Daher ist es wichtig, die Dimensionierung der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen entsprechend so anzupassen, dass der Grundlastbetrieb der Elektrolyseure in EnergyPLAN vermieden wird, um die Vergleichbarkeit beider Programme zu erhalten. Des Weiteren kann EnergyPLAN die Maximalleistung der Elektrolyseure erhöhen, sollte der Wasserstoffbedarf nicht vom Speicher und der definierten Maximalleistung der Elektrolyseure gedeckt werden können.

Somit entsteht keine fehlende Deckung des Bedarfs. Um dieses Verhalten zu vermeiden, sind die angesetzte Maximalleistung und der Wasserstoffbedarf iterativ im Vorfeld der Validierung ermittelt worden. Um das Szenario mit GHOST vergleichbar zu machen, musste der Wasserstoffverbraucher, im vorliegenden Fall die Brennstoffzellenfahrzeuge, mit Prio 1 angegeben werden. Bezogen auf den Füllstand der Wasserstoffspeicher unterscheiden sich beide Tools dadurch, dass EnergyPLAN versucht, die Menge des gespeicherten Wasserstoffvolumens zu Beginn und zum Ende der Simulation auszugleichen. GHOST versucht, zum Ende der Simulation möglichst volle Speicher zu realisieren. Ebenso gibt es keine einzuhaltende Mindestfüllmenge und auch nicht das Kriterium des verbleibenden Restdrucks von 5 bar in den Speichern. Eine Anpassung wurde hier nicht vorgenommen, wodurch es zu Abweichungen beim Betriebsverhalten der Elektrolyseure kommen kann. Abschließend wird die Zeit, die die Elektrolyseure zum Hochfahren benötigen, nicht von EnergyPLAN betrachtet. Für vergleichbare Werte wurde die Hochfahrzeit in GHOST daher auf Null gesetzt. Alle Anpassungen in Bezug auf das Betriebsverhalten sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Abweichendes Betriebsverhalten der Elektrolyseure zwischen GHOST und EnergyPLAN

Abweichung <sup>1)</sup>	Lösungsansatz
Bei alleinigem Energiebezug aus konventionellen Quellen, über das Jahr konstante Eingangsleistung am Elektrolyseur	Angepasste Dimensionierung der Erneuerbaren Energieanlagen
Automatische Anhebung der maximalen Elektrolyseurleistung, falls der Bedarf nicht gedeckt werden kann	Iterative Anpassung der Elektrolyseurleistung im Validierungsszenario
Füllstand der Speicher muss zu Beginn und am Ende der Simulation gleich sein	-
Zeit zum Hochfahren der Elektrolyseure wird nicht betrachtet	Hochfahrzeit in GHOST deaktiviert
<sup>1)</sup> Alle Abweichungen sind bezogen auf die Einstellungen von EnergyPLAN	

### 3.2 Einstellgrößen für die Vergleichssimulation

Für den Betrieb des Elektrolyseurs wird neben PV-Strom auch grauer Netzstrom verwendet. Dieser wird aus konventionellen Energiequellen und auch Erneuerbaren Energien erzeugt. Der aktuelle CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für den Strommix berücksichtigt diesen Anteil an regenerativen Energiequellen bei der Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes, der die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Betankung der Brennstoffzellenautos mit durch Mixstrom erzeugten Wasserstoff entstehen, widerspiegelt.

Ab dem Jahr 2020 dürfen Neuwagen den Grenzwert von 95 g CO<sub>2</sub>/km nicht überschreiten [21]. Um für dieses Jahr Simulationen durchführen zu können, war es notwendig, den voraussichtlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für den Strommix von 2020 mittels linearer Extrapolation zu ermitteln: 450 g/kWh [16, 22].

Für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird die CO<sub>2</sub>-Bilanz folgendermaßen definiert [23, 24]:

$$CO_2\text{Bilanz} \left[ \frac{g_{CO_2}}{km} \right] = \frac{\text{bezogener Netzstrom} \left[ \frac{kWh}{a} \right] \cdot CO_2\text{Emissionsfaktor} \left[ \frac{g_{CO_2}}{kWh} \right]}{\text{Betankungsmenge} \left[ \frac{kg_{H_2}}{a} \right] \cdot 100 \left[ \frac{km}{kg_{H_2}} \right]} \quad (3-1)$$

Ausgangspunkt für die Simulation war der in GHOST hinterlegte alkalische Druckelektrolyseur mit 83,3 kW inklusive Peripherie, der durch seine modulare Bauweise beliebig skaliert werden kann. Die Leistung für das Validierungsszenario beträgt 833 kW mit einem betrachteten Tankstellenbedarf von 100.000 kg Wasserstoff pro Jahr, was einem Fuhrpark von rund 500 Fahrzeugen gleichkommen könnte (siehe Tabelle 3). Die Elektrolyseurleistung wurde so groß gewählt, da sonst, bedingt durch die in EnergyPLAN nur begrenzt skalierbare Einheitsgröße und den fehlenden Nachkommastellen bei den stündlichen Ergebnisgrößen, relativ große Rundungsfehler für die zeitaufgelöste Auswertung auftreten würden. In EnergyPLAN handelt es sich daher um einen Elektrolyseur mit der Leistung 833 kW, in GHOST sind es 10 Elektrolyseurmodule zu je 83,3 kW, die unterschiedlich je nach Füllstand und Bedarf angesteuert werden können.

Tabelle 3 Einstellungen für die Simulation in GHOST und EnergyPLAN

Photovoltaikleistung	4 MWp
Elektrolyseurleistung (inkl. Peripherie)	833 kW
Tankstellenbedarf	100.000 kg H <sub>2</sub> /a
Speichergröße insgesamt	1.010 kg H <sub>2</sub>

Die Betankungsmengen pro Stunde werden uhrzeitgewichtet und zufällig generiert. Bis zu einem Bedarf von 160.000 kg/a konnten in GHOST alle Betankungsvorgänge vollständig durchgeführt werden – es kam zu keiner fehlenden Deckung des Bedarfs. Die Simulation wurde anschließend mit PV-Anlagenleistungen bis 10 MWp simuliert, jedoch wurden Werte größer als 95 g CO<sub>2</sub>/km erreicht. Aus diesem Grund wurde der Tankstellenbedarf entsprechend auf 100.000 kg H<sub>2</sub>/a reduziert und die Speichergröße soweit angepasst, um die Klimabilanz einhalten zu können.

### 3.3 Ergebnis

Beide Simulationen erzielten einen Klimawert von kleiner 95 g CO<sub>2</sub>/km, wobei die mit EnergyPLAN ausgeführte mit 83,46 g CO<sub>2</sub>/km 10% unterhalb von der mit GHOST mit 92,28 g CO<sub>2</sub>/km liegt. Die Werte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4 Übersicht der CO<sub>2</sub>-Bilanzen der Beispielsimulation mit GHOST und EnergyPLAN

	GHOST	EnergyPLAN
Bezogener Netzstrom	2.050.645,21 kWh/a	1.854.692,00 kWh/a
Ermittelte CO <sub>2</sub> -Bilanz	<b>92,28 g CO<sub>2</sub>/km</b>	<b>83,46 g CO<sub>2</sub>/km</b>

Der Grund für die etwas erhöhten CO<sub>2</sub>-Werte bei der Simulation mit GHOST ist unter anderem der, dass GHOST versucht, so wenige Elektrolyseurmodule wie möglich auszuschalten. Ener-

gyPLAN schaltet den Elektrolyseur früher aus und somit wird weniger Netzstrom benötigt. Außerdem berücksichtigt EnergyPLAN den niedrigen Speicherfüllstand nicht. Es ist nicht relevant, ob die Speicher leer werden – EnergyPLAN würde automatisch die Maximalleistung der Elektrolyseure erhöhen, falls eine fehlende Deckung des Bedarfs entstehen würde, was nicht der Realität entsprechen würde. Falls bei GHOST die Mindestfüllmenge in den Speichern unterschritten wird, laufen die Elektrolyseurmodule auf Volllast, auch wenn keine regenerativen Energien zur Verfügung stehen, also auch nachts. Aus diesem Grund kam es bei der Simulation mit GHOST zu manchen Zeiten zu einem erhöhten Netzstrombezug, was die höhere CO<sub>2</sub>-Bilanz begründet. Auf der anderen Seite konnte aber auch festgestellt werden, dass aufgrund der Funktion der Teillastoptimierung der Netzstrombezug teilweise auch im Vergleich zu EnergyPLAN niedriger lag.

Zusätzlich hervorzuheben wäre, dass mit GHOST das Koppelprodukt, der ebenfalls elektrolytisch gewonnene Sauerstoff, betrachtet wird, welches dazu beitragen kann, das Projekt über die Rentabilitätsschwelle zu schieben. In EnergyPLAN wird der Sauerstoff nicht beachtet, weder der Verwendungspfad noch die Produktion werden aufgezeigt. Die mittels GHOST ermittelte Sauerstoffproduktion beträgt 335.139 kg O<sub>2</sub>/a. Mit einem Verkaufspreis von 0,18 €/kg O<sub>2</sub> (100 bar) erreicht das Projekt einen, davor negativen, NPV von Null und trägt somit maßgeblich dazu bei, PtG-Projekte wirtschaftlicher zu machen. Dem gegenüber steht der Verkauf von Wasserstoff an der Tankstelle für 9,50 €/kg im 1. Jahr mit einer angenommenen Veränderungsrate von 1 % pro Jahr über die gesamte Projektdauer. Das Projekt, betrachtet über einen Zeitraum von 20 Jahren, beinhaltet dabei neben der Neuanschaffung der Elektrolyseure, der Speicher sowie der Wasserstofftankstelle auch die Errichtung der PV-Anlage.

## 4 Ausblick

Ab dem Frühjahr 2020 sollen intensive Testphasen und Dauerläufe der Komponenten des Projektes LocalHy durchgeführt werden, sodass bis Ende Mai 2020 Realdaten vorliegen, die mit dem Simulationstool GHOST abgeglichen werden können. Im Vorfeld wird für den Testbetrieb die Regelung der Projektkomponenten mittels GHOST festgelegt, da es im Rahmen des Projektes kein Regelungssystem, sondern nur eine Aufzeichnung der gemessenen Daten auf dem bestehenden Prozessleitsystem der Wasserwerke Sonneberg gibt. Die Live-Daten sollen außerdem auf der bereits entwickelten Webseite <https://www.localhy.de/> erscheinen.

## 5 Schlussfolgerung

Nur durch verschiedene Ansätze in der Mobilität, im Strom- und Wärmesektor ist es möglich, die CO<sub>2</sub>-Emissionen langfristig auf ein niedriges Niveau zu senken. PtG-Projekte sind bei gleichzeitigem Ausbau der Erneuerbaren Energien unabdingbar. Um solche Projekte je nach Anwendungsfall gewinnbringend umzusetzen, bedarf es eines Simulationswerkzeuges für die Auslegung der beteiligten Komponenten. Spielt auch Sauerstoff eine Rolle, eignet sich das Simulationsprogramm GHOST, welches beiden Produkten aus der Wasserelektrolyse eine gleichrangige Stellung zuschreibt. Mit diesem ist es möglich, neben dem NPV und dem Zuverlässigkeitswert auch den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für die optimal ausgelegte Systemkonfiguration zu ermitteln. Der Vergleich beider Tools ergab, dass das Betriebsverhalten der Elektrolyseure annähernd übereinstimmend ist, wenn im Vorfeld entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Aufgrund der zusätzlich implementierten Funktionen, der Flautenregelung und der

Teillastooptimierung, ist es möglich, den Netzstrombezug mit GHOST weiter zu reduzieren. Auch wenn in Summe eine etwas höhere CO<sub>2</sub>-Bilanz erreicht wird, kann GHOST PtG-Anlagen realitätsnäher abbilden, da verschiedene Einstellmöglichkeiten wie Mindestteillastbereich, Hochfahrzeiten der Elektrolyseure und kritische Speichermenge möglich sind.

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, welches im Rahmen der Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany (HYPOS)-Initiative das Projekt LocalHy möglich macht (Förderkennzeichen: 03ZZ0705D).

## Literaturverzeichnis

- [1] Mannheim Institute for Sustainable Energy Studies (MISES), „CO<sub>2</sub>-freier Wasserstoff kann günstiger hergestellt werden als bislang angenommen,“ 13. November 2019. [Online]. Available: <https://www.uni-mannheim.de/newsroom/presse/pressemitteilungen/2019/november/brennstoff/>. [Zugriff am 19. November 2019].
- [2] B. Chatain, „Pressemitteilung "Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw",“ Europäisches Parlament, Brüssel, 25. Februar 2014.
- [3] M. Hafemann, S. Penzel und J. Schneider, „Simulation of the German energy system 2015 with EnergyPLAN,“ 2019. [Online]. Available: [https://www.energyplan.eu/useful\\_resources/existingcountrymodels/](https://www.energyplan.eu/useful_resources/existingcountrymodels/). [Zugriff am 24. Januar 2020].
- [4] Department of Development and Planning, Aalborg University, „EnergyPLAN,“ [Online]. Available: <https://www.energyplan.eu/>. [Zugriff am 21. November 2019].
- [5] Das Umweltbundesamt - Für Mensch und Umwelt, „Treibhausgas-Emissionen,“ Umweltbundesamt, Januar 2019. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>. [Zugriff am 23. Januar 2020].
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Energiedaten: Gesamtausgabe,“ BMWi, 9. September 2019. [Online]. Available: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>. [Zugriff am 23. Januar 2020].
- [7] VDI / VDE, „VDI / VDE-Studie Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge – Bedeutung für die Elektromobilität,“ VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2019.
- [8] NOW GmbH, „Studie IndWEDe - Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme,“ NOW GmbH für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, 2018.
- [9] M. S. Saleem, N. Abas, A. R. Kalair, S. Rauf, A. Haider, M. S. Tahir und M. Sagir, „Design and optimization of hybrid solar-hydrogen generation system using TRNSYS,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, 25. Juni 2019.
- [10] S. M. Riedl, „Development of a hydrogen refueling station design tool,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, 1. Januar 2020.

- [11] P. Colbertaldo, S. L. G. Aláez und S. Campanari, „Zero-dimensional dynamic modeling of PEM electrolyzers,“ *Energy Procedia*, Dezember 2017.
- [12] M. Sánchez, E. Amores, D. Abad, L. Rodríguez und C. Clemente-Jul, „Aspen Plus model of an alkaline electrolysis system for hydrogen production,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, 31. Dezember 2019.
- [13] doppelintegral GmbH, „INSEL 8 :: Software zur Simulation, Überwachung und Visualisierung von Energiesystemen,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.insel.eu/files/public/inselFlyer.pdf>. [Zugriff am 26. Januar 2020].
- [14] FI Freiberg Institut GmbH, „Hallo, ich bin EDGAR. Power-to-X und Sektorkopplung,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.freiberg-institut.de/leistungen/simulation-und-optimierung/>. [Zugriff am 26. Januar 2020].
- [15] F. Hönig, M. Ebert und U. Blum, „Kläranlagen in Kombination mit der Wasserelektrolyse als neue Anbieter von Regelenergieprodukten,“ in *15. Symposium Energieinnovation*, Graz, 2018.
- [16] F. Hönig, D. Duque-Gonzalez, J. Schneider, M. Ebert und U. Blum, „Auslegung von dezentralen Wasserelektrolyseanlagen gekoppelt mit Erneuerbaren Energien,“ in *26. Energie-Symposium*, Stralsund, 2019.
- [17] S. Oberle und R. Elsland, „Analyse von Open-Access-Modellen und deren Relevanz für die Energiesystemanalyse,“ in *11. Internationale Energiewirtschaftstagung*, Wien, 2019.
- [18] M. F. Tahir, C. Haoyong, M. S. Javed, I. Jameel, A. Khan und S. Adnan, „Integration of Different Individual Heating Scenarios and Energy Storages into Hybrid Energy System Model of China for 2030,“ *energies*, 31. Mai 2019.
- [19] M. F. Tahir, C. Haoyong, A. Khan, M. S. Javed, N. A. Laraik und K. Mehmood, „Optimizing Size of Variable Renewable Energy Sources by Incorporation Energy Storage and Demand Response,“ *IEEE Access*, 16. Juli 2019.
- [20] P. A. Østergaard, J. Jantzen, Marczinkowski, H. Mareike und K. Michael, „Business and socioeconomic assessment of introducing heat pumps with heat storage in small-scale district heating systems,“ *Renewable Energy*, August 2019.
- [21] B. Chatain, „Pressemitteilung "Begrenzung der CO2-Emissionen von Pkw",“ Europäisches Parlament, Brüssel, 25.02.2014.
- [22] P. Icha, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, April 2019.
- [23] ElektroMobilität NRW, „Emissionsfrei auf der Langstrecke,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.elektromobilitaet.nrw/unternehmen/wasserstoff/>. [Zugriff am 26. Januar 2020].
- [24] PROJECT CLIMATE gemeinnützige Initiative UG (haftungsbeschränkt), „Wir fahren klimafreundlich,“ 18. März 2015. [Online]. Available: [https://wir-fahren-klimafreundlich.org/site/assets/files/1029/berechnungsformel\\_co2-emissionen\\_fahrzeug\\_18\\_03\\_2015.pdf](https://wir-fahren-klimafreundlich.org/site/assets/files/1029/berechnungsformel_co2-emissionen_fahrzeug_18_03_2015.pdf). [Zugriff am 26. Januar 2020].