
Ermittlung der CO₂-Emissionen von Power-to-Gas-Projekten mittels GHOST und Validierung mit EnergyPLAN

Franziska Hönig^(*), Diana Duque-Gonzalez, Martin Hafemann, Jens Schneider, Matthias Ebert, Ulrich Blum



EnInnov2020

16. Symposium Energieinnovation

Graz, 12. Februar 2020

Agenda

- Motivation
- Aktueller Stand Energiesystemmodelle
 - Vorstellung GHOST
 - Vorstellung EnergyPLAN
- Validierung der beiden Modelle
 - Unterschiede zwischen den Tools
 - Einstellgrößen für Vergleichssimulation
 - Ergebnis der Validierung und CO₂-Bilanz
- Ausblick
- Schlussfolgerung

Motivation

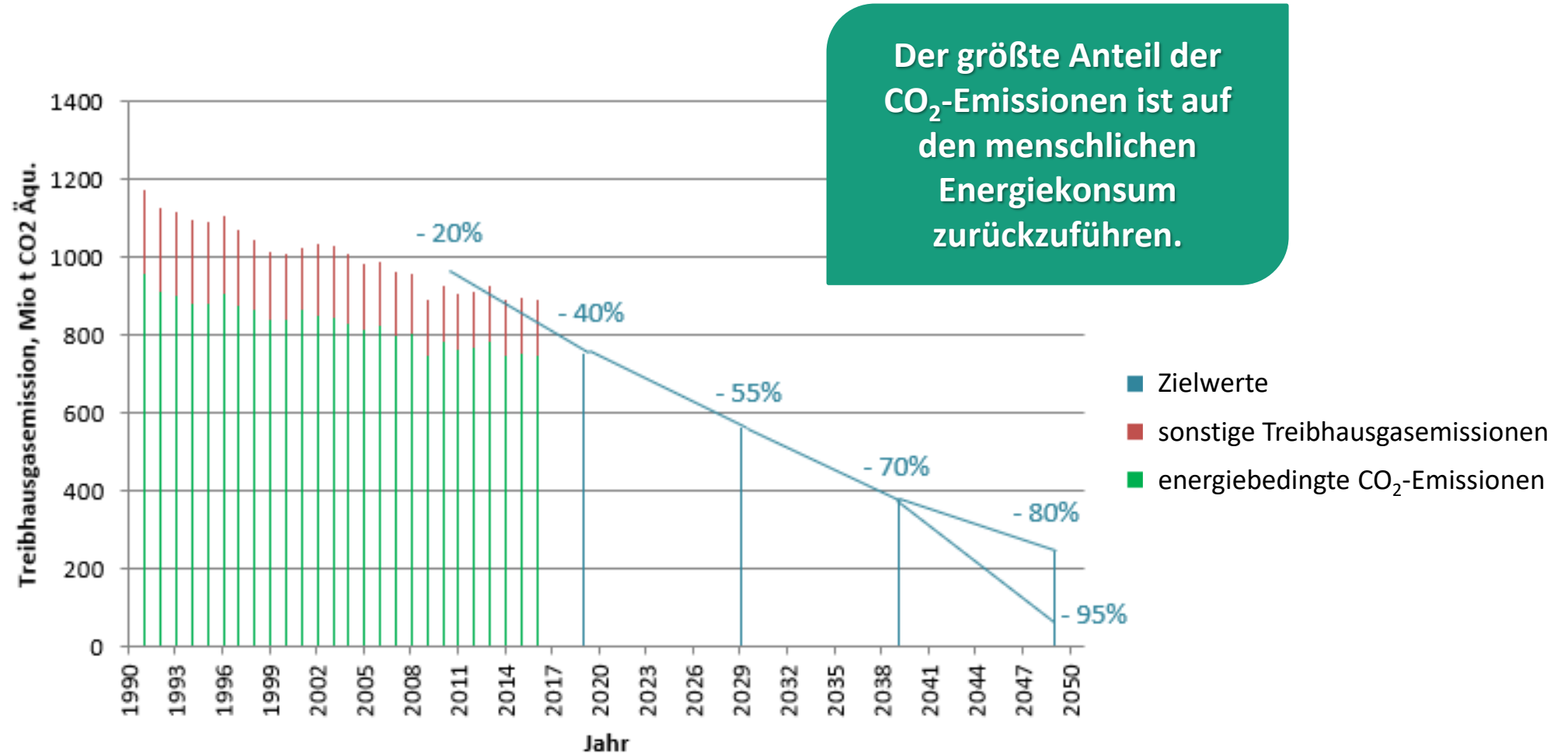


Abb. 1: Treibhausgasemissionen Deutschlands von 1990 bis 2017 und Zielwerte für die Jahre bis 2050 (basierend auf Daten in [1] und [2])

Motivation

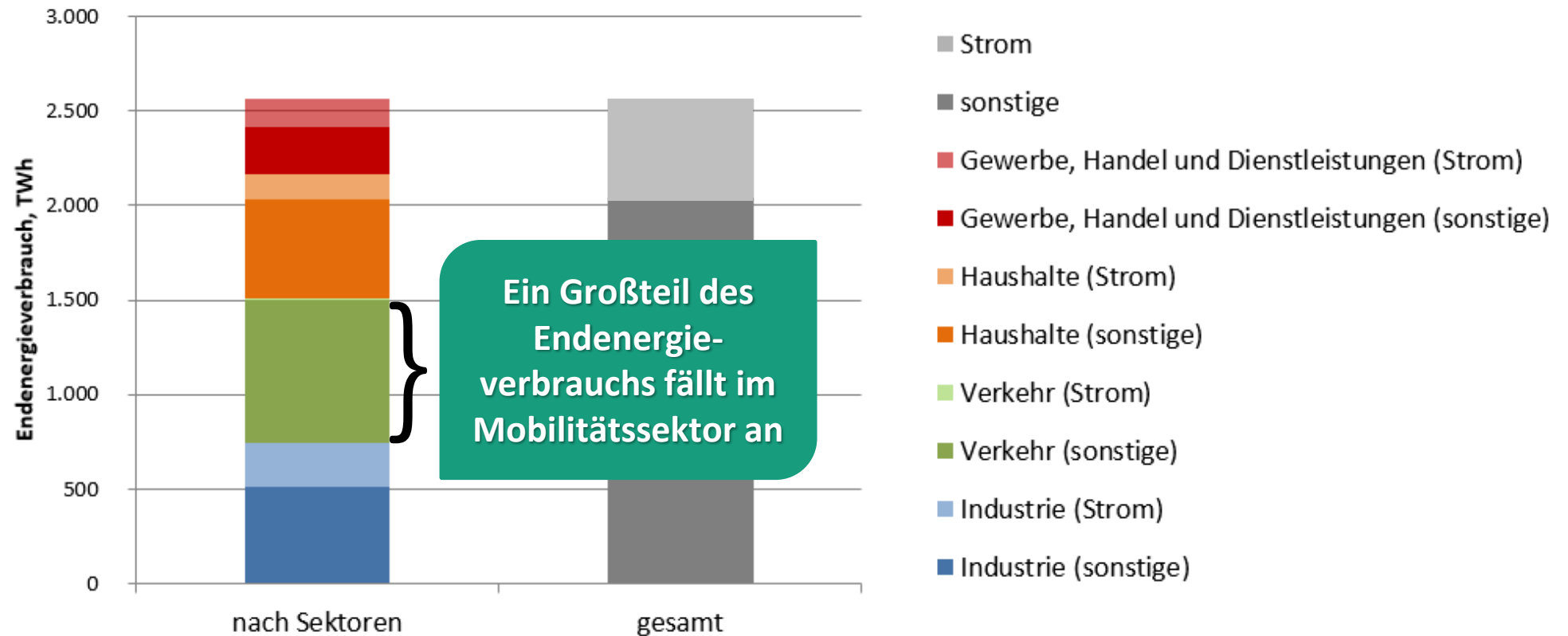


Abb. 2: Zusammensetzung der Endenergienutzung nach Verbrauchssektoren für Deutschland im Jahr 2017 (basierend auf Daten in [2] und [3])

Strom: Endenergie Strom; sonstige: andere Endenergieträger (Brenn- und Kraftstoffe, Fernwärme)

Strom (hellgrau) nur für einen geringen Anteil des Endenergieverbrauchs verantwortlich

Motivation

- **batteriebetriebene** und **brennstoffzellenbasierte** Elektromobilität wird zur umweltfreundlicheren Mobilität und Energiewende einen großen Beitrag leisten [4]
- Voraussetzung: (überschüssiger) Strom aus **Erneuerbaren Energien (EE)**
- Bei Verwendung des **aktuellen Strommixes**: dennoch indirekte **CO₂-Emissionen**
- **Power-to-Gas (PtG)**-Anlagen zur Herstellung von grünem Wasserstoff notwendig zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung [5]
- Für Auslegung von PtG-Projekten **validierte Simulationsmodelle** notwendig

Aktueller Stand Energiesystemmodelle

- Bekannte Simulationsumgebungen für Wasserelektrolyse:
 - TRNSYS
 - Matlab Simulink
 - Aspen Customer Modeler / Aspen Plus
 - INSEL
 - EDGAR
 - EnergyPLAN
 - (...)
- Bisheriger Fokus: **Wasserstoffverwertung (H₂)**
- Nebenprodukt: Sauerstoff (O₂)
- Für PtG-Anlagen mit H₂ und O₂-Verwertung: Simulationsprogramm GHOST

Techno-ökonomisches Systemanalysetool GHOST (Green Hydrogen Oxygen Simulation Tool)

- Simulationstool für (dezentrale) PtG-Systeme
- simuliert ein Betriebsjahr auf stündlicher Basis
- deckt die Sektoren **Elektrizität** und **Mobilität** ab, Wärme integrierbar
- wasserstoff- und/oder sauerstoffseitige Auslegung
- technische und betriebswirtschaftliche **Systemoptimierung (Kapitalwert)** über mehrere Jahre möglich
- Ermittlung des **CO₂-Fußabdruckes** bei Herstellung von H₂ 5.0 (**Klimawert**)
- Bestimmung der **Versorgungssicherheit (Zuverlässigkeitswert)**

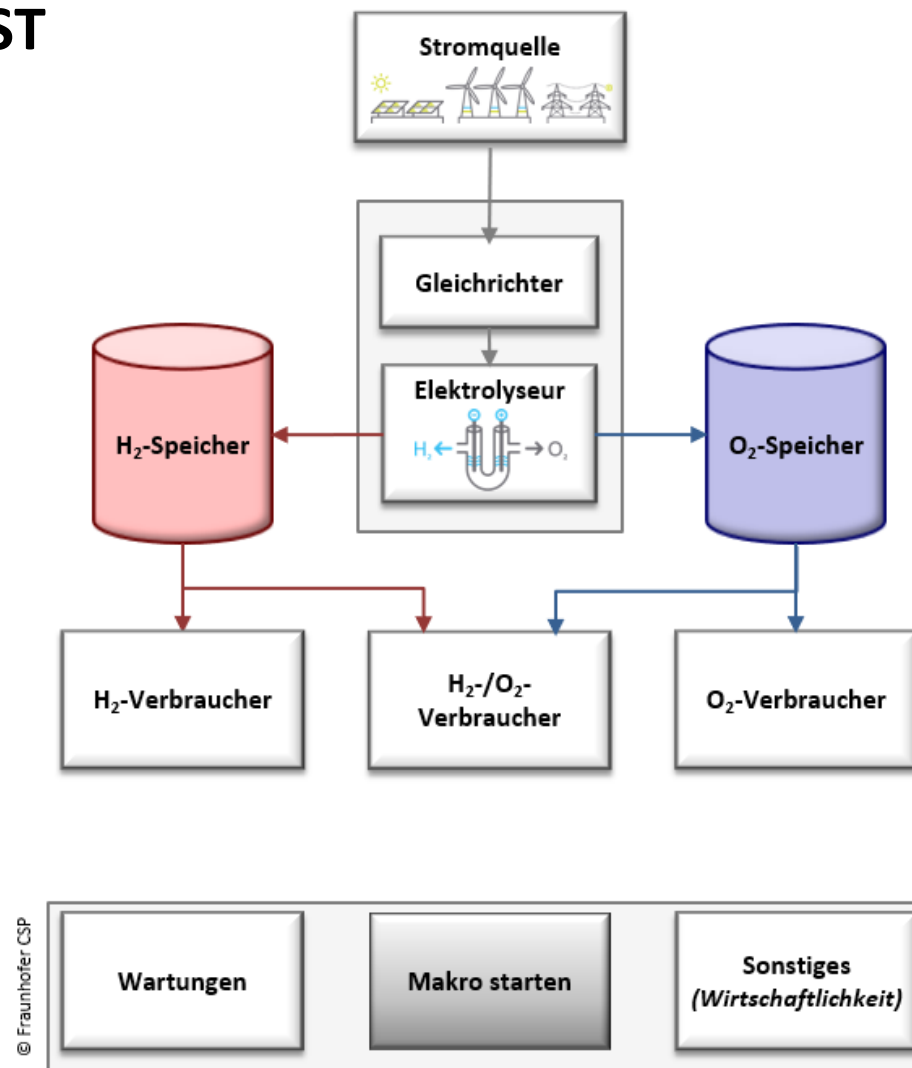


Abb. 3: Benutzeroberfläche des Systemanalysetools GHOST

Techno-ökonomisches Systemanalysetool GHOST

- **Priorisierung** der Verbraucher möglich
 - Prio 1 mit Simulationsabbruch
 - Prio 2 mit Aufzeichnung der fehlenden Deckung des Bedarfs
- Implementierte **Flautenregelung** (bei Einstellung *EE+Netz*) zur Vermeidung von unnötigem Herunter- und Herauffahren des Elektrolyseurs und **Teillastoptimierung** zur bestmöglichen Ausnutzung der EE
- Auswertung der **Auslastung** der Einzelkomponenten

Eingabemaske

Stromquelle |

Simulation Wirtschaftlichkeit

Photovoltaik | Windenergieanlage | Sonstiges | Netz | Batteriespeicher |

Stromnutzung

Eigennutzung zu 100%

Einspeisung von Überschussstrom ins Netz (Anteil wird nach der Simulation berechnet)

Eigennutzungsanteil % % / a

Jahresertrag kWh % / a

Einspeiseanteil aus PV-Anlage %

Auszahlungen

Anschaffungsauszahlungen
(inkl. Solarmodule, Wechselrichter, Montagegestell, elektrische Verkabelung, Planung und Installation)

Anschaffungskosten: € / kWp

Anschaffungskosten (gesamt) €

Jährliche Auszahlungen **Veränderungsraten**

Betriebskosten % = € / a % / a

EEG-Umlage Eigenverbrauch € / kWh % / a

verringertes EEG-Umlagesatz von: % Ab mindestens % Eigenverbrauch

Unregelmäßige Auszahlungen **Periode** **Periode**

Austausch Wechselrichter € / kWp

€

Einzahlungen

Liquidationserlöse

Verkauf PV-Anlage €

Jährliche Einzahlungen **Veränderungsraten**

Einspeisevergütung PV-Anlage € / kWh % / a

Abb. 4: Beispielhafte Dateneingabe Wirtschaftlichkeit Stromquelle

Techno-ökonomisches Systemanalysetool GHOST

- entwickelt am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP im Rahmen des HYPOS-Projektes *LocalHy* (Laufzeit: 08/2015-05/2020)
- programmiert in VBA mit zusätzlicher Nutzung von Python
- deterministisches Input/Output Modell
 - stochastisches Modell zur Generierung des Tankstellenbedarfs
- benutzerfreundlich aufgebaut für individuelle, projektspezifische Eingaben

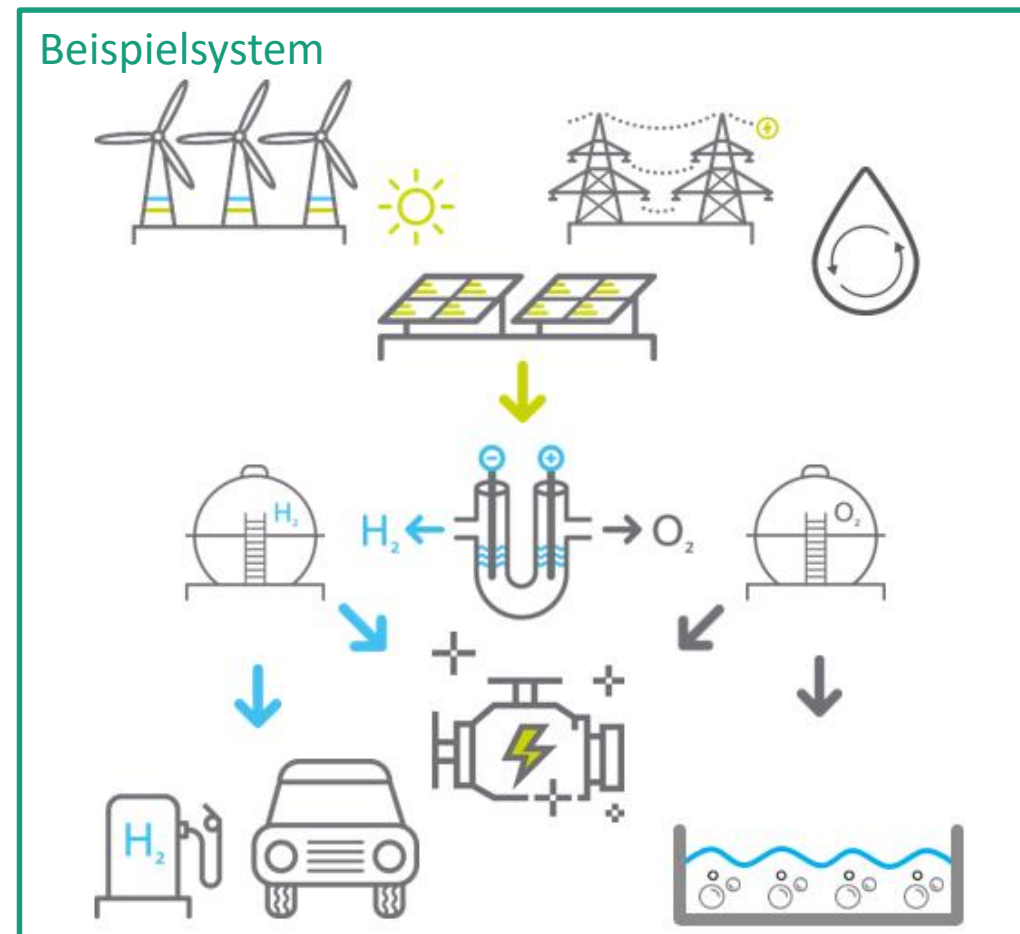


Abb. 5: Beispielsystem

Energiesystemsimulationstool EnergyPLAN

- Simulationstool für **Energiesysteme bis zur nationalen Ebene**
- grenzüberschreitende Stromflüsse abbildbar
- simuliert auf **stündlicher Basis**
- deckt die **Sektoren Elektrizität, Wärme und Mobilität** ab
- Technologien sind aggregiert
- ausgelegt für **technische Systemoptimierung**
- betriebswirtschaftliche Optimierung begrenzt möglich

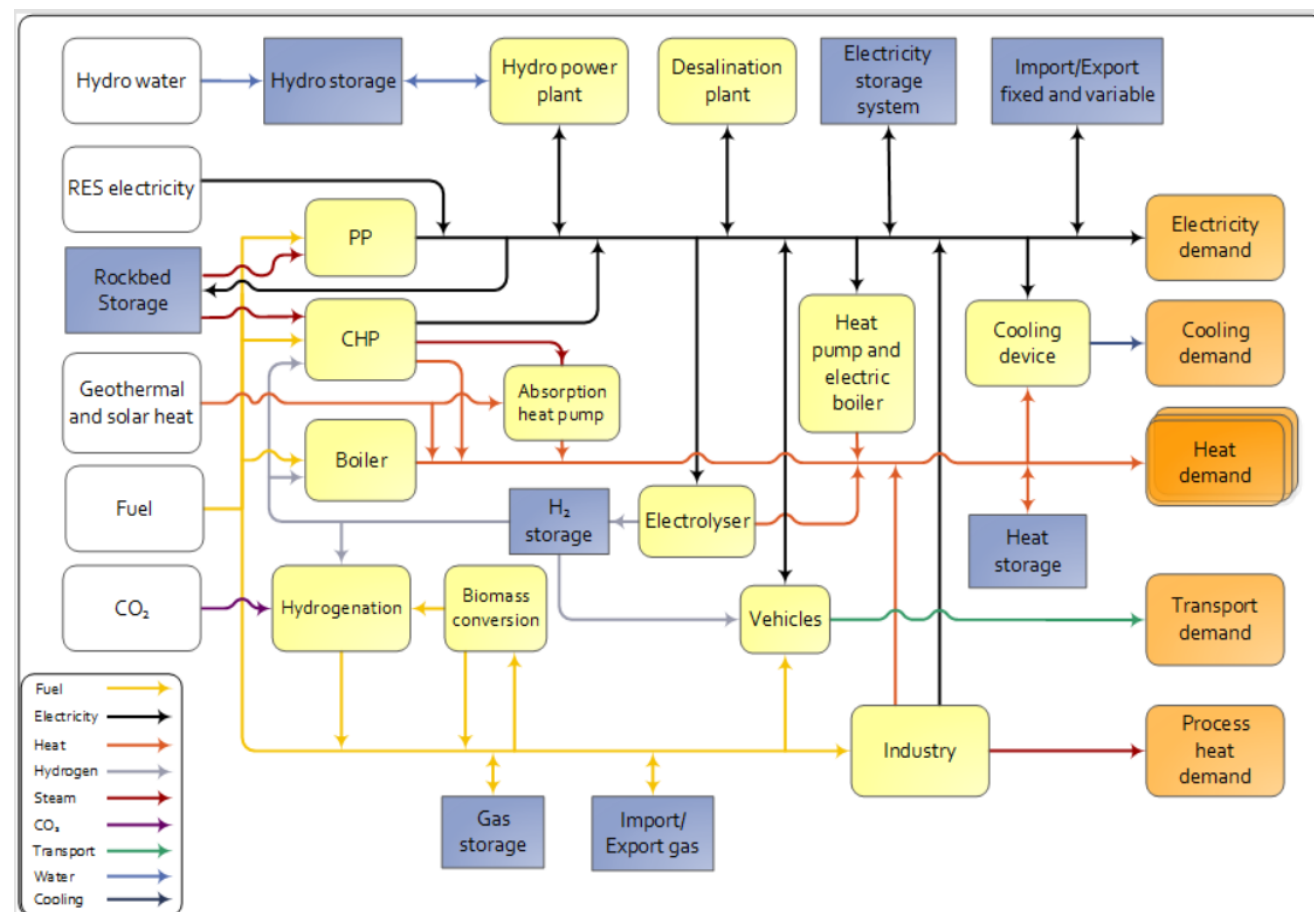


Abb. 6: Energietransformationsschema in EnergyPLAN [6]

Energiesystemsimulationstool EnergyPLAN

- entwickelt an der Aalborg University (DK)
- programmiert in Delphi Pascal
- deterministisches Input/Output Modell
 - alle berechnungsrelevanten Parameter sind bekannt
- analytisch programmiert
 - keine bis wenig Iterationen usw.
 - schnelle Berechnung
- sehr nutzerfreundlicher Aufbau

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"/>	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"/>	0	<input type="text" value="0,73"/>		<input type="text" value="0,05"/>	<input type="text" value="0"/> GWh

Abb. 7: Elektrolyseurinformationen des Energiesystemsimulationstools EnergyPLAN [6]

Unterschiede zwischen GHOST und EnergyPLAN

Ziel: Validierung des Betriebsverhalten der Elektrolyseure in Abhängigkeit des Tankverhaltens und der Fluktuation der Photovoltaikanlage

Tab. 1: Abweichende technische Parameter zwischen GHOST und EnergyPLAN

Abweichung ¹⁾	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
1) Alle Abweichungen sind bezogen auf die Einstellungen von EnergyPLAN	

Unterschiede zwischen GHOST und EnergyPLAN

Tab. 2: Abweichendes Betriebsverhalten der Elektrolyseure zwischen GHOST und EnergyPLAN

Abweichung ¹⁾	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
¹⁾ Alle Abweichungen sind bezogen auf die Einstellungen von EnergyPLAN	

Einstellgrößen für Vergleichssimulation

- Bezug von Photovoltaik- und Netzstrom
- PV-Leistung: 4 MWp
- Elektrolyseurleistung (inkl. Peripherie): 833 kW (in GHOST: 10 Elektrolyseurmodule je 83,3 kW, in EnergyPLAN: 1 Elektrolyseur 833 kW)
- Tankstellenbedarf: 100.000 kg H₂/a
- Speichergröße insgesamt: 1.010 kg H₂
- CO₂-Emissionsfaktor für den Strommix von 2020: 450 g CO₂/kWh (linear extrapoliert) [7, 8]

Formel für die Berechnung der CO₂-Bilanz für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit aus dem aktuellen Strommix erzeugtem Wasserstoff [9, 10] :

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

Ergebnis

Tab. 3: Übersicht der CO₂-Bilanzen der Beispielsimulation mit GHOST und EnergyPLAN

	GHOST	EnergyPLAN	
Bezogener Netzstrom	2.050.645,21 kWh/a	1.854.692,00 kWh/a	
Ermittelte CO₂-Bilanz	92,28 g CO ₂ /km	83,46 g CO ₂ /km	< 95 g CO ₂ /km Zielgröße [11]

Gründe für etwas erhöhten CO₂-Fußabdruck mit GHOST:

- GHOST versucht, so wenige Elektrolyseurmodule wie möglich auszuschalten
- in EnergyPLAN keine Berücksichtigung des niedrigen Speicherfüllstands → bei GHOST: Elektrolyseurmodule auf Vollast bei Unterschreitung der Mindestfüllmenge in den Speichern

Ergebnis

Zusätzliche **Sauerstoffnutzung** kann PtG-Projekte über die Rentabilitätsschwelle schieben:

- GHOST kann neben einer wasserstoffseitigen Auslegung auch Sauerstoffverbraucher in der Simulation berücksichtigen
- In der Vergleichssimulation: **Produktion von 335.139 kg Sauerstoff pro Jahr**
- **Ab einem Verkaufspreis von 0,18 €/kg Sauerstoff** (hier: 100 bar) erreicht das Projekt mit einer angenommenen Laufzeit von 20 Jahren einen, davor negativen, **Kapitalwert von Null** → ab diesem Preis lohnt es sich, in das Projekt zu investieren

Ausblick

- Ab März 2020 Testphasen des Gesamtsystems LocalHy auf der Kläranlage Sonneberg-Heubisch (Thüringen)
- GHOST legt für Testbetrieb Betriebsparameter und Regelung der Komponenten fest
- Bis Ende Mai 2020 (Projektende LocalHy): Validierung von GHOST mit Realdaten möglich
- Live-Daten von allen Energie- und Stoffströmen in Fließbild auf Webseite einsehbar: <https://www.localhy.de/>
- Stand auf der 6. Woche der Umwelt, 09.-10. Juni 2020 im Park von Schloss Bellevue (Abschlusspräsentation LocalHy)
- Beurteilung der Anwendbarkeit von derartigen Anlagen sowohl national als auch international für die Entwicklung eines neuartigen Geschäftsmodells

Schlussfolgerung

- Notwendigkeit von **verschiedene Ansätzen im Mobilitäts-, Strom- und Wärmesektor zur langfristigen Senkung der CO₂-Emissionen**
- **PtG-Anlagen** bei gleichzeitigem EE-Ausbau unabdingbar
- **Techno-ökonomische Auslegung von PtG-Anlagen** zur Gewinnmaximierung verpflichtend
- **GHOST** als Simulationswerkzeug für PtG-Anlagen mit **Wasserstoff UND Sauerstoffnutzung**
- **Erfolgreiche Validierung** mit EnergyPLAN: Betriebsverhalten der Elektrolyseure annähernd übereinstimmend
- durch **Flautenregelung** unnötiges Herunterfahren des Elektrolyseurs vermeidbar und durch **Teillastoptimierung** Netzstrombezug weiter reduzierbar
- **realitätsnähere Abbildung** von PtG-Anlagen aufgrund diverser, auf das Projekt abgestimmte Einstellmöglichkeiten wie Mindestteillastbereich, Hochfahrzeiten der Elektrolyseure und kritische Speichermenge

Literatur

- [1] 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]
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Energiedaten: Gesamtausgabe,“ BMWi, 9. September 2019. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>. [Zugriff am 23. Januar 2020]
- [3] Das Umweltbundesamt - Für Mensch und Umwelt, „Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen,“ Umweltbundesamt, Januar 2019. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>. [Zugriff am 23. Januar 2020]
- [4] VDI / VDE, „VDI / VDE-Studie Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge – Bedeutung für die Elektromobilität“, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2019
- [5] 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
- [6] Department of Development and Planning, Aalborg University, „EnergyPLAN,“ [Online]. Available: <https://www.energyplan.eu/>. [Zugriff am 21. November 2019]
- [7] 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
- [8] P. Icha, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, April 2019
- [9] ElektroMobilität NRW, „Emissionsfrei auf der Langstrecke,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.elektromobilitaet.nrw/unternehmen/wasserstoff/>. [Zugriff am 26. Januar 2020]
- [10] 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. [Zugriff am 26. Januar 2020]
- [11] B. Chatain, „Pressemitteilung "Begrenzung der CO₂-Emissionen von Pkw",“ Europäisches Parlament, Brüssel, 25. Februar 2014

Fragen?

Kontakt:

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP Halle (Saale)

Franziska Hönig

E-mail: franziska.hoenig@csp.fraunhofer.de

Web: <http://www.csp.fraunhofer.de/>

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).

