
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

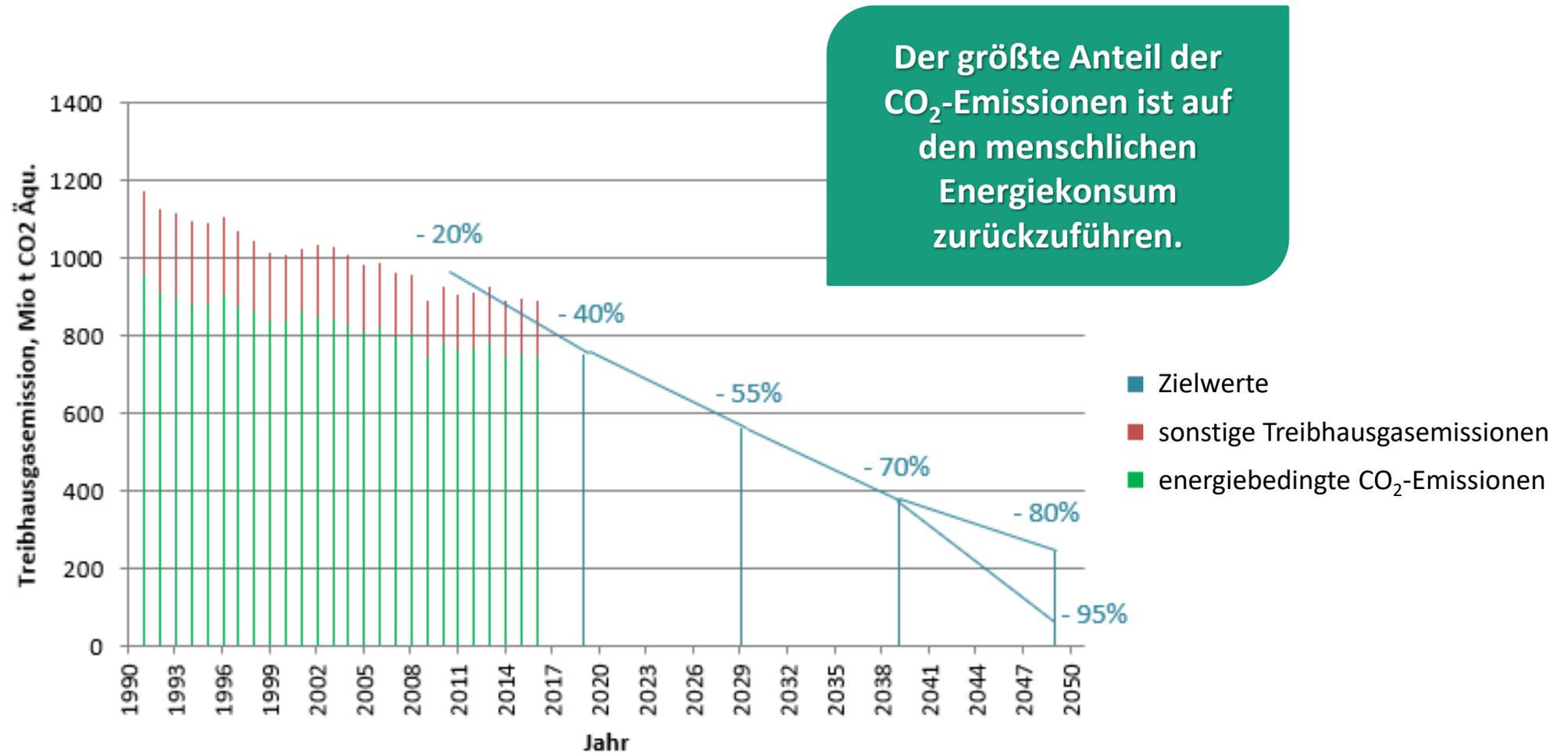


Abb. 1: Treibhausgasemissionen Deutschlands von 1990 bis 2017 und Zielwerte für die Jahre bis 2050 (basierend auf Daten in [1] und [2])

Motivation

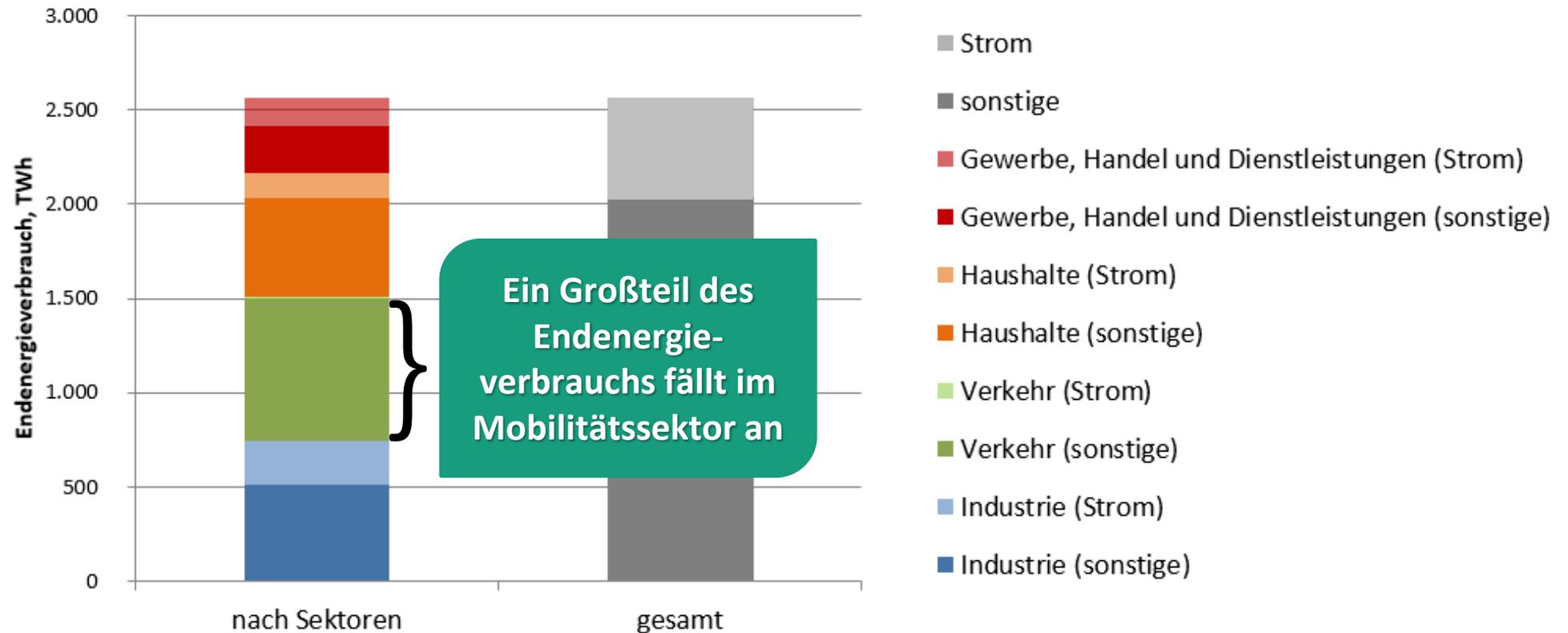


Abb. 2: Zusammensetzung der Endenergienutzung nach Verbrauchssektoren für Deutschland im Jahr 2017 (basierend auf Daten in [2] und [3])

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)

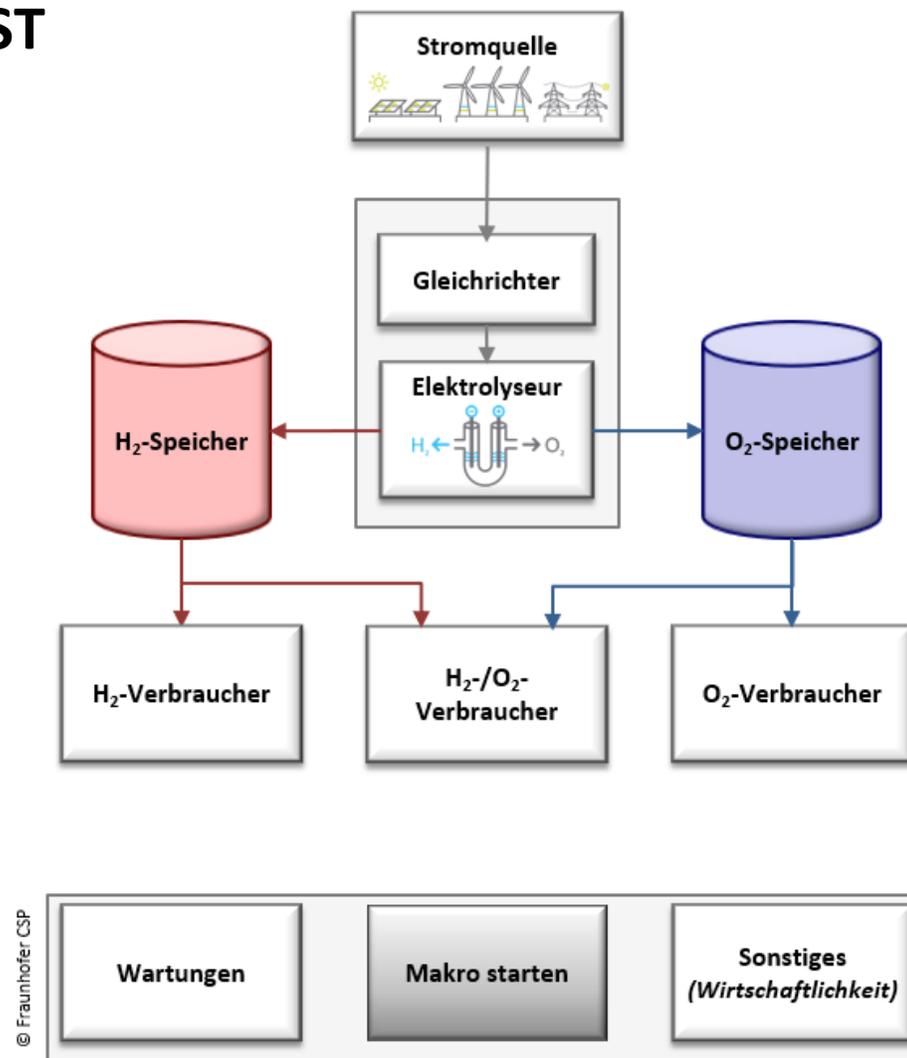


Abb. 3: Benutzeroberfläche des Systemanalysetools GHOST

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

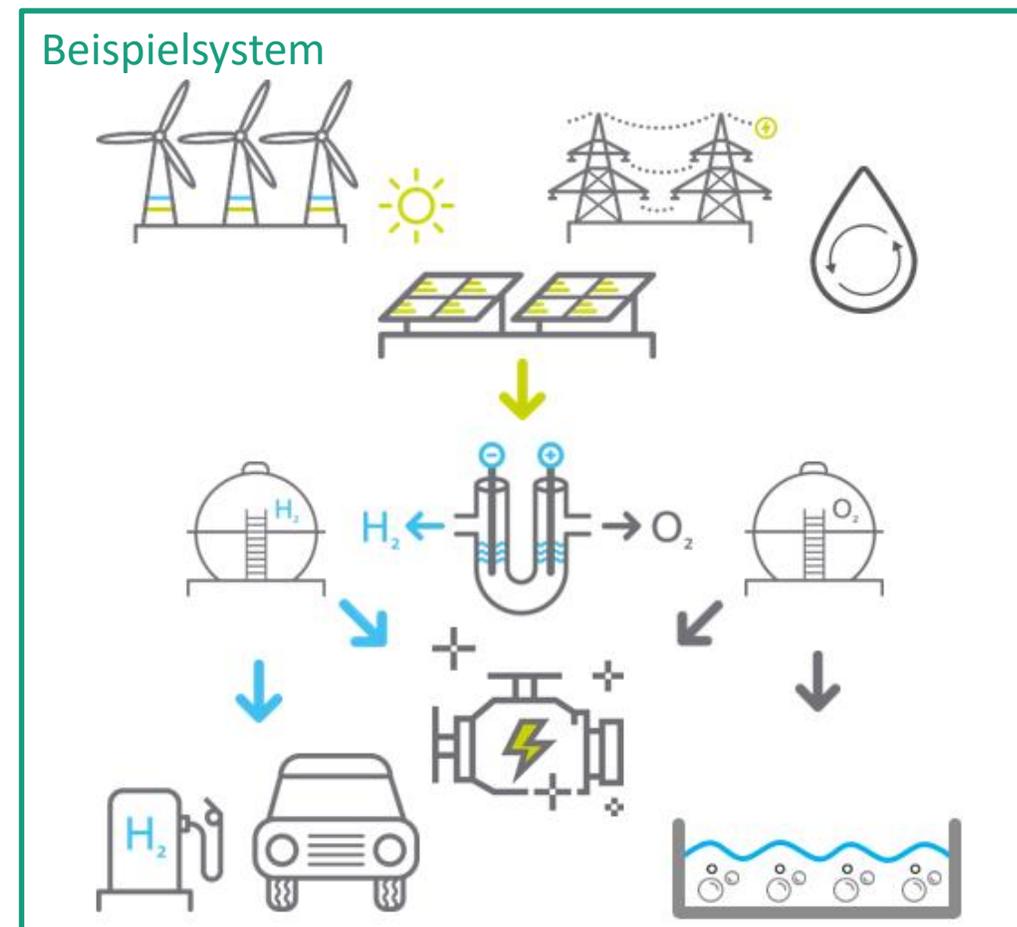


Abb. 5: Beispielsystem

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

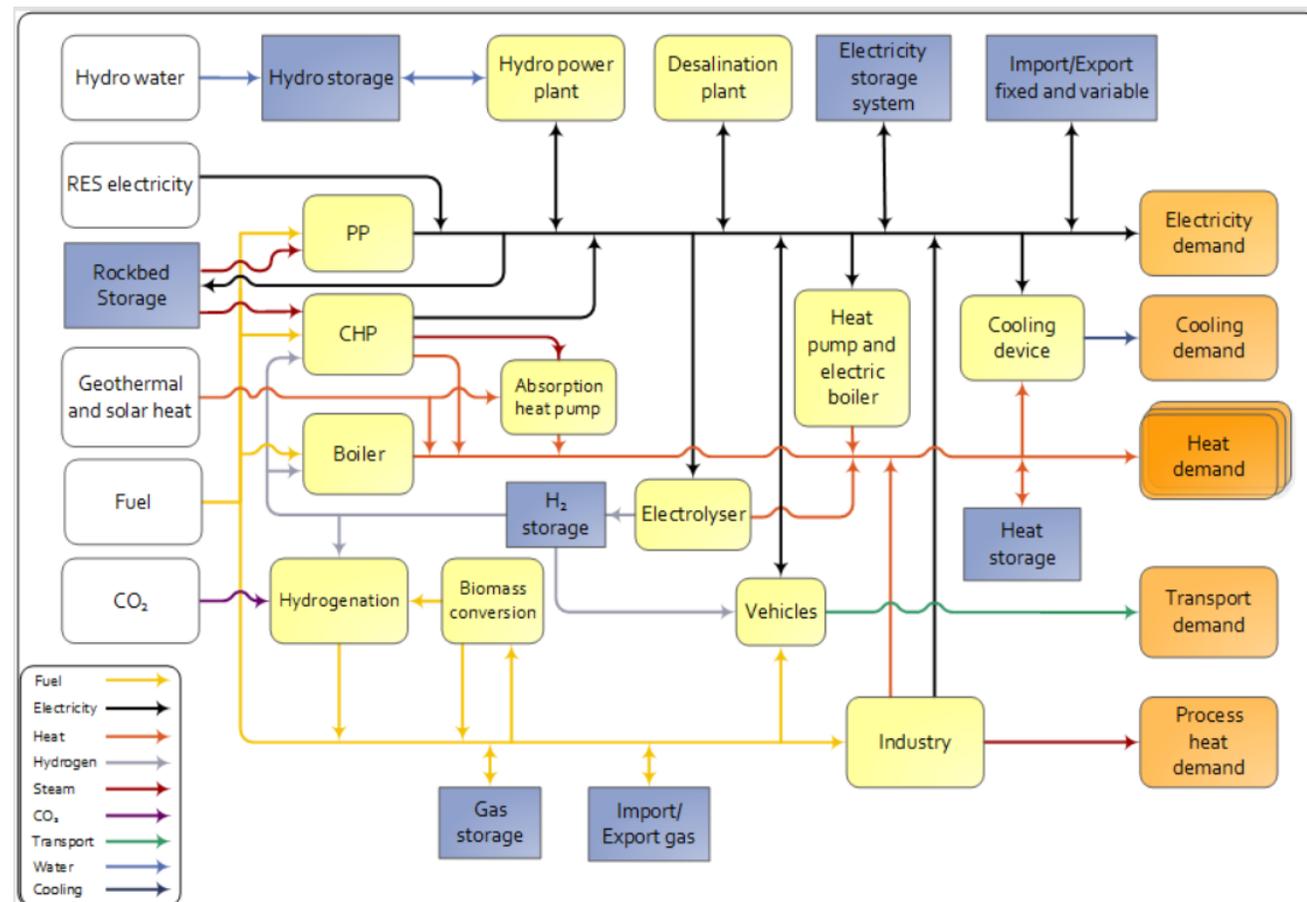


Abb. 6: Energietransformationsschema in EnergyPLAN [6]

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).

