

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-04-41  
Datum der Einreichung: 27.01.2026  
Datum der Annahme: 11.03.2026  
Datum der Veröffentlichung: 26. Mai 2026

## Nutzung von Photovoltaik-Überschuss in der Produktion

# Direct Air Capture und PEM-Elektrolyse im Vergleich

Y. Eboumbou Ebongue, A. Sauer

**ZUSAMMENFASSUNG** Diese Arbeit untersucht die Nutzung von PV-Überschussstrom durch Direct Air Capture (DAC) und durch eine Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse. Basierend auf einem Mixed-Integer-Linear-Programming-Optimierungsmodell wird ein technoökonomischer Vergleich beider Technologien durchgeführt. Die Analyse zeigt, wie CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Preise sowie der PV-Überschuss die Wirtschaftlichkeit der DAC-Anlage und des Elektrolyseurs beeinflussen und unter welchen Bedingungen DAC oder Elektrolyse wirtschaftlich vorteilhaft ist.

### STICHWÖRTER

PV-Überschuss, Direct Air Capture, PEM-Elektrolyseur

## Direct air capture compared with electrolysis – Use of surplus photovoltaic energy in production

**ABSTRACT** This paper examines the use of surplus PV electricity by direct air capture (DAC) and polymer electrolyte membrane electrolysis. A techno-economic comparison of both technologies is carried out based on a mixed-integer linear programming optimization model. The analysis shows how CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, and O<sub>2</sub> prices, as well as PV surplus, influence the economic efficiency of the DAC plant and the electrolyzer, and under which conditions DAC or electrolysis is economically advantageous.

## 1 Einleitung

Die vermehrt angestrebte Dekarbonisierung des industriellen Sektors erfordert Technologien, die sowohl CO<sub>2</sub>-Minderungen erzielen als auch flexibel im Zusammenspiel mit fluktuierenden erneuerbaren Energien betrieben werden können. Zwei Technologien rücken dabei besonders in den Fokus: Direct Air Capture (DAC) und Polymerelektrolytmembran-(PEM)-Elektrolyseure. DAC-Anlagen erlauben die Abscheidung von CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft und tragen damit zu negativen Emissionen bei [1]. PEM-Elektrolyseure wandeln Strom in Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) um und zeichnen sich durch hohe Dynamik wie geringe Mindestlasten und schnelle Laständerungen aus. Diese Eigenschaften qualifizieren die PEM-Elektrolyse für den Betrieb in Kombination mit volatilen erneuerbaren Energiequellen [2].

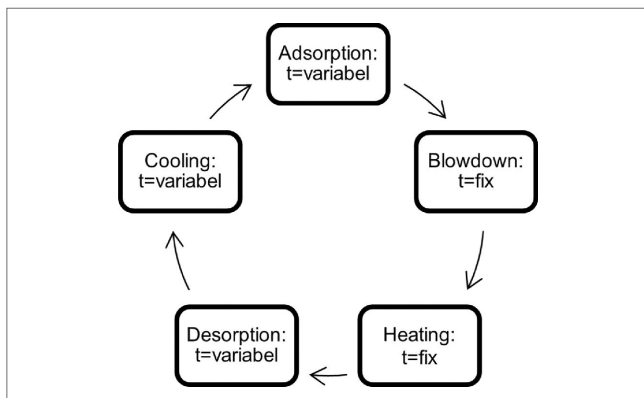
Mit dem fortschreitenden Ausbau der Photovoltaik (PV)-Kapazitäten entstehen zunehmend PV-Überschüsse, die aufgrund begrenzter Netzkapazitäten oder fehlender Flexibilitätsoptionen abgeregelt werden müssen. Die Nutzung dieser Überschüsse für DAC oder PEM bietet potenziell wirtschaftliche und ökologische Vorteile, indem Stromspitzen verwertet und zusätzliche CO<sub>2</sub>-Reduktions- beziehungsweise H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale erschlossen werden. Welche Technologie unter welchen Rahmenbedingungen vorteilhaft ist, hängt maßgeblich von den Marktpreisen für CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> sowie deren zukünftigen Entwicklungen ab. Der CO<sub>2</sub>-Preis im EU-Emissions Trading System (ETS) lag 2024 und 2025 überwiegend im Bereich von 60 €/tCO<sub>2</sub> bis 90 €/tCO<sub>2</sub> [3]. Verschiedene Modellstudien schätzen CO<sub>2</sub>-Preise zwischen 200 €/tCO<sub>2</sub> bis 300 €/t CO<sub>2</sub> bis 2030 und 370–670 €/t CO<sub>2</sub> bis

2045, wenn Klimaschutzmaßnahmen allein über den ETS-Preis wirken [4]. Für grünen Wasserstoff werden die heutigen Kosten typischerweise im Bereich von etwa 5 €/kg bis 10 €/kg verortet, abhängig von Standort, Strompreis und Anlageneffizienz [5, 6]. Auch der Nebenproduktverkauf von Sauerstoff kann in bestimmten industriellen Anwendungen zusätzliche Erlöspotenziale erschließen. Diese liegen preislich jedoch meist im niedrigstelligen Cent-Bereich pro Kilogramm.

Daher gewinnt die Frage an Bedeutung, welche der beiden Technologien unter Nutzung begrenzter PV-Überschussenergie ökonomisch und energetisch bevorzugt betrieben werden sollte und wie sensitiv diese Entscheidung gegenüber CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Preisentwicklungen ist. Die Beantwortung dieser Frage ist entscheidend für die strategische Auslegung industrieller Energiesysteme sowie die langfristige Planung von Negativemissions- und Wasserstoffinfrastrukturen in einem zunehmend volatilen Energiesystem. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung einer Methode zur techno-ökonomischen Bewertung beider Technologien unter Berücksichtigung ihres flexiblen Betriebsverhaltens, ihrer energetischen und stofflichen Kopplungen sowie der Marktmechanismen zum Erwerb von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten beziehungsweise H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Verkauf.

## 2 Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik von Direct-Air-Capture-Anlagen und PEM-Elektrolyseuren mit besonderem Fokus auf deren Betriebsverhalten,



**Bild 1** Zyklischer Phasenbetrieb einer DAC (Direct Air Capture)-Anlage.  
Grafik: Fraunhofer IPA

Flexibilität und Einbindung in energiewirtschaftliche Systeme mit fluktuierenden erneuerbaren Energien.

## 2.1 DAC-Anlagen

Das DAC-Verfahren ist eine technologische Option zur aktiven Entfernung von CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft. Das Nieder-temperatur-DAC-Verfahren ermöglicht die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft bei Temperaturen zwischen 80 °C und 120 °C [1]. Es basiert auf der reversiblen Bindung von CO<sub>2</sub> an feste sorptive Materialien wie Amin-funktionalisierte Harze, Zeolithe oder anionische Ionenaustauscher. Mehrere Pilot- und kommerzielle DAC-Projekte zeigen die technische Umsetzbarkeit der Technologie und liefern wertvolle Daten zu Energiebedarf, Betriebsverhalten und Skalierungspotenzial [7, 8].

Die Studie von Liu *et al.* [9] untersucht die Kopplung von DAC mit PV-Überschussenergie und zeigt, dass flexibel betriebenes DAC erheblich zur Nutzung von Abregelungsstrom beitragen kann. Aktuelle Arbeiten zeigen zudem, dass vor allem adsorptionsbasierte DAC-Systeme ein hohes Potenzial für energetische und ökonomische Flexibilität besitzen, da ihr intrinsisch zyklischer Adsorptions-Desorptions-Prozess modifizierbar ist. Die Studie von Postweiler [10] demonstriert erstmals systematisch, wie variabel gestaltete Zyklusphasen genutzt werden können, um energieintensive Schritte wie die Desorption in Zeiten niedriger Strompreise zu verlagern. Die Grundlage bildet dabei ein zyklisch betriebener Adsorptions-Desorptions-Prozess, dessen Ablauf gezielt modifiziert werden kann, um Lastverschiebung und energieadaptive Betriebsweisen zu ermöglichen. **Bild 1** zeigt die verschiedenen Zyklusphasen. Durch die gezielte Anpassung von Zyklusdauer, Phasenintensität und -timing können diese Systeme als lastflexible Verbraucher in industrielle Energiesysteme integriert werden.

## 2.2 PEM-Elektrolyseure

Die Wasserelektrolyse ist eine in der Industrie eingesetzte Technologie zur Erzeugung von H<sub>2</sub>. Dabei wird Wasser in seine Bestandteile O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> unter Anlegen einer elektrischen Spannung zerlegt. Die elektrochemische Wasserzersetzung erfolgt räumlich getrennt in zwei Teilreaktionen an Anode und Kathode. Diese sind durch eine ionenleitende Membran voneinander getrennt, die den Ladungstransport ermöglicht und gleichzeitig die Produktgase separiert. Bei der PEM-Elektrolyse wird eine feste,

protonenleitende Polymermembran als Elektrolyt eingesetzt. Die Protonenleitung erfolgt über die hydratisierte Membran, ein flüssiger Elektrolyt ist nicht erforderlich. Die PEM-Elektrolyse arbeitet meist im Temperaturbereich von etwa 20 °C bis 100 °C. [11]

Für PEM-Elektrolyseure liegt im Vergleich zu anderen Elektrolysearten ein weiter fortgeschrittener industrieller Erfahrungsstand vor, insbesondere in Demonstrations- und kommerziellen Anlagen im MW-Maßstab. Die Literatur hebt vor allem die hohe Dynamikfähigkeit der PEM-Technologie hervor, welche sich in schnellen Anfahrzeiten, geringen Mindestlasten, hohen Teillastwirkungsgraden und moderaten Startkosten äußert. Diese Eigenschaften machen PEM-Systeme besonders geeignet für den Betrieb mit fluktuierenden Energiequellen wie PV oder Wind. Studien analysieren die flexible Fahrweise, die Kopplung an variable Strompreise, die optimale Elektrolysegröße sowie techno-ökonomische Parameter wie Systemwirkungsgrad und Opex/Capex-Entwicklung. [12, 13]

## 2.3 Forschungslücke

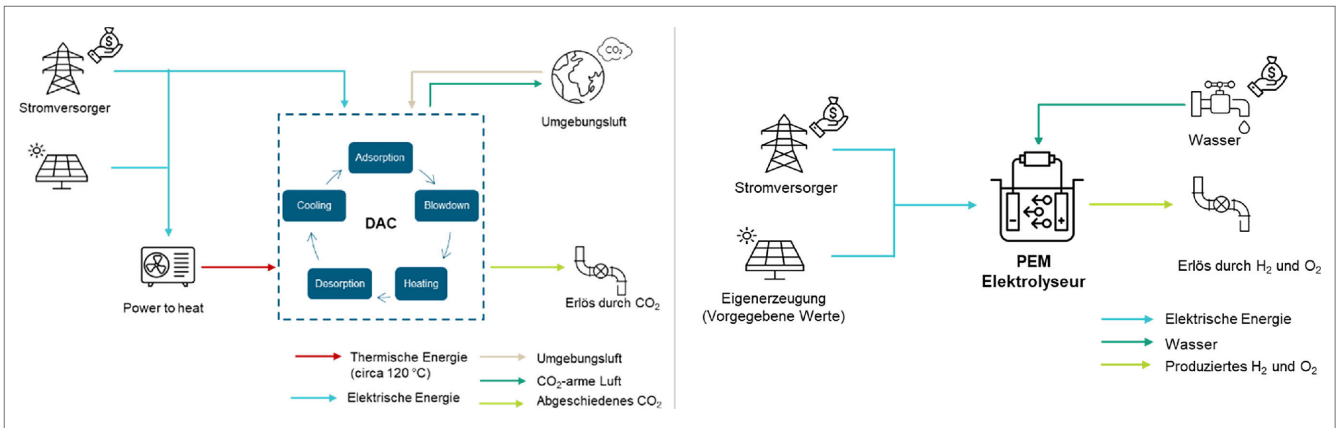
Direct Air Capture (DAC) und PEM-Elektrolyse adressieren unterschiedliche, aber komplementäre Ziele eines klimaneutralen Energiesystems: die Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre sowie die Bereitstellung von Wasserstoff als Energieträger und Grundstoff. Beide Technologien zeichnen sich durch einen hohen Strombedarf und prinzipielle Flexibilität im Betrieb aus und konkurrieren damit potenziell um dieselben energiewirtschaftlichen Ressourcen wie erneuerbare Erzeugung, Netzanschlusskapazitäten und Investitionen.

In der aktuellen Forschung sind direkte Vergleiche zwischen DAC und PEM nicht vorhanden. Vor allem fehlt es an systematischen Untersuchungen, wie beide Technologien unter identischen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen arbeiten und welche der beiden Anlagen unter welchen Rahmenbedingungen wirtschaftlich bevorzugt wird. Eine weitere Forschungslücke besteht darin, dass die meisten DAC-Studien auf vereinfachten oder quasi-stationären Modellen beruhen. Nur wenige Arbeiten bilden den mehrphasigen Adsorptions-Desorptions-Zyklus mit variablen Phasendauern, Mindestlaufzeiten, Rampenbegrenzungen und startabhängigen Energieverbräuchen realitätsnah ab, obwohl gerade diese Faktoren den flexiblen Betrieb maßgeblich bestimmen. Auf Basis der vorhandenen Literatur ergeben sich somit zentrale Forschungslücken:

- Bisher existieren keine techno-ökonomischen Vergleiche unter gleichen Randbedingungen, die beide Technologien hinsichtlich Energieflexibilitätsanforderungen, Energieeinsatz und Wirtschaftlichkeit gegenüberstellen.
- Break-even-Analysen für CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>-Preise sowie Indifferenzpunkte zwischen DAC- und PEM-Betrieb sind nicht Gegenstand bestehender Forschung, obwohl sie für industrielle Entscheidungen zentrale Kennzahlen darstellen.

## 3 Methode

In dieser Arbeit werden im ersten Schritt der PEM-Elektrolyseur und die DAC-Anlage mit den zum energieflexiblen Betrieb notwendigen technischen Parametern modelliert. Anschließend erfolgt die mathematische Optimierung der Auslegung und des Betriebs zur ökonomischen Bewertung und zum Vergleich der beiden Technologien.



**Bild 2** Modellaufbau einer Photovoltaik (PV)-Anlage, gekoppelt mit einer DAC-Anlage (links) und einem PEM (Polymerelektrolytmembran)-Elektrolyseur (rechts). Grafik: Fraunhofer IPA

### 3.1 Modellierung

Zur Modellierung der technologischen und energetischen Zusammenhänge beider Anlagen wird die Open-Source-Bibliothek "oemof.solph" eingesetzt, die eine energieflexible Modellierung komplexer Energiesysteme ermöglicht [14]. **Bild 2** zeigt die energetischen Ein- und Ausgänge eines PEM-Elektrolyseurs (rechts) sowie einer Niedertemperatur-DAC-Anlage (links). Beide Anlagen lassen sich in oemof.solph über Converter-Komponenten abbilden, wobei die Energieströme über elektrische, thermische und stoffliche Busse miteinander verknüpft werden.

Das Betriebsverhalten der Anlagen wird mit den in **Tabelle 1** angegebenen Parameter modelliert, um den energieflexiblen Betrieb abzubilden.

Die Modelle berücksichtigen Mindestbetriebsdauern und Mindeststillstandzeiten als nicht-konvexe Betriebsbedingungen über eine NonConvex-Formulierung in oemof.solph. NonConvex bedeutet, dass der Optimierungsraum oder die Zielfunktion nicht-konvex ist, also mehrere lokale Minima oder Sprünge enthält und lineare Kombinationen von Lösungen nicht zulässig sind. In oemof.solph legen die Parameter positive\_gradient\_limit und negative\_gradient\_limit die maximal zulässigen Laständerungen fest und begrenzen so die Rampen von Anlagen. Zudem werden elektrische und thermische Energiebedarfe der Anlagen implementiert.

Die DAC-Anlage wird durch einen fünfphasigen Zyklus repräsentiert. In der Modellierung wird die Anlage als mehrphasige Komponente in oemof.solph implementiert. Jede Phase des DAC-Zyklus (Adsorption, Blowdown, Heating, Desorption, Cooling) wird durch einen eigenen Converter abgebildet, der über spezifische stoffliche und energetische Busse mit dem industriellen Energiesystem gekoppelt ist. Da Niedertemperatur-DAC-Anlagen modular aufgebaut sind, wird der Prozess in der Modellierung so abgebildet, dass sich unterschiedliche Module gleichzeitig in unterschiedlichen Phasen des Zyklus befinden können. Die gleichzeitige Aktivität mehrerer Phasen resultiert somit aus der Parallelisierung über eine endliche Anzahl identischer Module. Die Gesamtleistung der DAC-Anlage wird dabei durch übergeordnete Kapazitätsrestriktionen begrenzt, insbesondere durch die maximale CO<sub>2</sub>-Abscheiderate, die installierte thermische und elektrische Anschlussleistung sowie die Anzahl der verfügbaren Module. Diese Nebenbedingungen stellen sicher, dass die Summe der gleichzeitig aktiven Phasen die reale Anlagenkapazität nicht

überschreitet und der Betrieb realitätsnah abgebildet wird. Die in **Tabelle 1** angegebenen Parameter der DAC-Anlage sind bis auf die Mindeststillstandzeit phasenspezifisch und beziehen sich jeweils auf eine Phase des DAC-Zyklus pro Modul. [1, 7–10, 15]

Im Gegensatz zur DAC-Anlage wird der PEM-Elektrolyseur als einzelne, kontinuierliche Converter-Komponente modelliert. Entscheidende Unterschiede ergeben sich aus dem kontinuierlichen Betrieb des PEM-Elektrolyseurs und dem zyklischen Prozess der DAC-Anlage. [5, 13, 16]

### 3.2 Optimierung

Ziel der Optimierung ist es, eine Zielfunktion aus jährlichen Gesamtkosten und Erlösen aus der Verwertung von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> zu minimieren, wobei sowohl technische Restriktionen als auch betriebliche Bedingungen und Emissionsgrenzen eingehalten werden müssen. Hierfür eignet sich das Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP)-Verfahren, da es die simultane Behandlung von kontinuierlichen und diskreten Entscheidungsvariablen ermöglicht [17, 18]. Die Optimierung liefert zwei zentrale Ergebnisse:

- Zeitlich variabler Betrieb: Die MILP-Lösung gibt für jeden Zeitschritt vor, welche Leistung die Anlage aus Strom und Wärme aufnimmt, unter Berücksichtigung der Start-/Stopp-Bedingungen, Mindestlaufzeiten und der Abhängigkeit von Energiepreisen. Dadurch wird eine wirtschaftlich optimale Nutzung der verfügbaren PV-Überschussenergie gewährleistet.
- Optimale Auslegung: Die Investitionsvariable der Anlage wird so gewählt, dass die jährlichen Gesamtkosten minimiert werden, während technische Restriktionen eingehalten werden. Das Ergebnis zeigt die optimal installierte Leistung der Anlage, die aus ökonomischer Sicht im Zusammenspiel mit dem Energiesystem am sinnvollsten ist.

Die Zielfunktion berücksichtigt Investitionen, Betriebskosten, Erlöse aus H<sub>2</sub>-, O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Verwertung, wodurch das Modell die wirtschaftlich effizienteste Betriebsstrategie bestimmt.

Für einen vereinfachten Fall mit einem repräsentativen Jahr kann die Zielfunktion formuliert werden als Minimierung der Summe aus jährlichen Gesamtkosten und Erlösen aus der Verwertung von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> [17, 19]:

$$\min x = \sum_{k \in K} c_{\text{TOTEX},k}(x) - c_{\text{Verwertung CO}_2/\text{H}_2/\text{O}_2}(x)$$

Tabelle 1 Technische Parameter des PEM-Elektrolyseurs und der DAC-Anlage.

	PEM [5, 13, 16]	NT DAC [1, 7–10, 15]
Mindestbetriebsdauer	30 min	45 min
		15 min
		15 min
		75 min
		45 min
Mindeststillstandzeit	30 min	90 min
Positiver Gradient	600 %/h	100 %/h
		2000 %/h
		150 %/h
		200 %/h
		100 %/h
Negativer Gradient	600 %/h	600 %/h
		2000 %/h
		100 %/h
		200 %/h
		400 %/h
Minimale Teillast	10%	30%
		15%
		50%
		30%
		25%
Elektrischer Energiebedarf	55 kWh/kgH <sub>2</sub>	300 kWh/tCO <sub>2</sub>
		200 kWh/tCO <sub>2</sub>
		-
		100 kWh/tCO <sub>2</sub>
		100 kWh/tCO <sub>2</sub>
Thermischer Energiebedarf	-	-
		-
		2000 kWh/tCO <sub>2</sub>
		-
		-

Die jährlichen Gesamtkosten setzen sich zusammen aus jährlichen Investitionen auf Basis der Annuitätenmethode und den Betriebs- sowie Wartungskosten:

$$c_{TOTEX,k}(x) = c_{CAPEX,k}(x) + c_{OPEX,k}(x) + c_{Startkosten,k}(x)$$

Die initialen Investitionen  $c_{Invest,k}$  lassen sich mittels der Annuitätenmethode und unter Verwendung des Zinssatzes  $r$  sowie der Abschreibungsdauer einer Komponente  $N_k$  auf das Jahr beziehen.

$$c_{CAPEX,k}(x_n) = (AF_k + y_k) * c_{Invest,k}$$

$$AF_k = \frac{r(1+r)^{N_k}}{(1+r)^{N_k} - 1}$$

$x_{min} \leq x \leq x_{max}$  Optimierungsvariablen, im Vektor  $x^T = (x_1, \dots, x_n)$

$c_{TOTEX,k}$  Jährliche Gesamtkosten

$c_{Verwertung CO_2/H_2}$  Erlös durch Verwendung oder Verkauf von H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>

Tabelle 2 Wirtschaftliche Parameter des PEM-Elektrolyseurs und der DAC-Anlage.

	PEM [5, 21, 22]	DAC [1, 7, 8, 10, 20]
Spezifische Investitionen	1200 €/kWel	3000 €/kWth
Lebensdauer	15 Jahre	20 Jahre
Zinssatz	7 %/a	5 %/a
Wartungskosten	3 % der Investitionen/a	5% der Investitionen/a
Startkosten	1 €/kgH <sub>2</sub>	3 €/tCO <sub>2</sub>

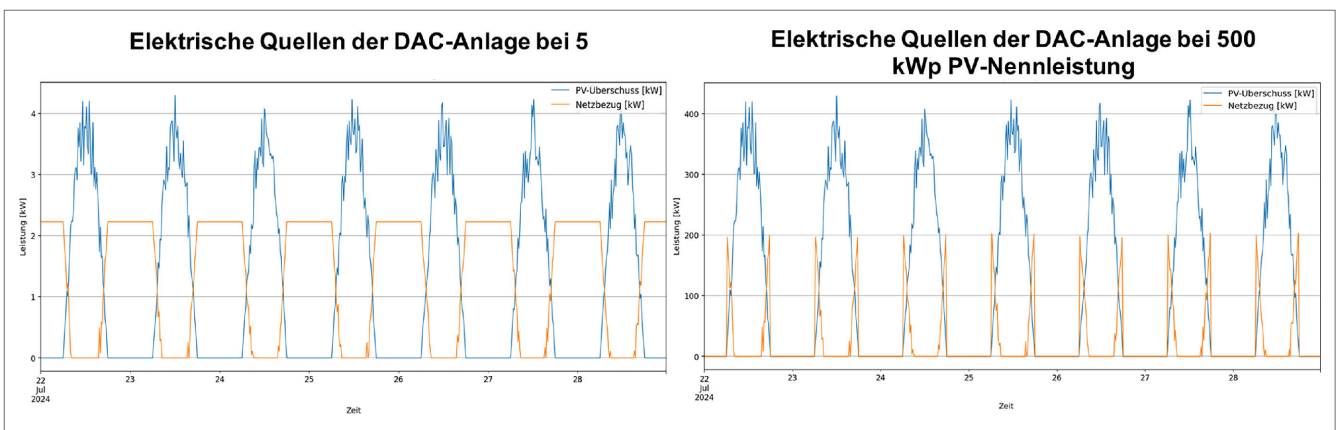


Bild 3 Stromversorgung der DAC-Anlagen bei unterschiedlichen PV-Überschüssen. Grafik: Fraunhofer IPA

- K Einzelkomponente
- $C_{CAPEX,k}$  Jährliche Investitionen
- $C_{OPEX,k}$  Jährliche Betriebs- und Wartungskosten
- $C_{Invest,k}$  Initiale Investitionen
- $C_{Startkosten,k}$  Startkosten der Komponente
- $AF_k$  Annuitätenfaktor der Komponente
- $y_k$  Wartungsrate pro Jahr
- $r$  Zinssatz pro Jahr
- $N_k$  Abschreibungsdauer der Komponente

Da Erlöse aus der Verwertung von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> mit negativem Vorzeichen in der Zielfunktion berücksichtigt werden, führt die Minimierung der Zielfunktion zu einer Maximierung des Jahresgewinns. Ein positiver Jahresgewinn liegt vor, wenn die Erlöse die jährlichen Gesamtkosten übersteigen.

Die Zielfunktion setzt sich in oemof.solph aus mehreren Komponenten zusammen: Zum einen umfassen sie die annuitätisch umgelegten Investitionen aller Anlagen, die aus den solph.Investment-Objekten und der Annuitätenberechnung resultieren. Zum anderen werden die variablen Betriebskosten berücksichtigt, die sich aus Strom-, Wärme- und Brennstoffpreisen sowie betriebskostenäquivalenten Zuschlägen wie Wartung, Lösungsmittelverlusten oder Hilfsenergie ergeben. Erlöse aus dem Verkauf von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> werden abgebildet und steigern somit den wirtschaftlichen Nutzen abgeschiedener CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Mengen. Die für die Vermarktung benötigten Anlagen wie Verdichter oder Abfüller werden ebenfalls berücksichtigt. **Tabelle 2** zeigt eine Übersicht der verwendeten ökonomischen Parameter.

Über Investment-Parameter kann die installierte Leistung der DAC-Anlage und des PEM-Elektrolyseurs als optimierbare Variable eingebunden werden, sodass das Modell die wirtschaftlich

optimale Dimensionierung und den optimalen Betrieb bestimmt. [1, 7, 8, 10, 20–22]

Startkosten beziehen sich auf zusätzlichen Kosten, die beim Anfahren oder Hochfahren einer Anlage anfallen und setzen sich aus energetischen Kosten, mechanischer Abnutzung, chemischen Zusatzkosten und operativen Aufwänden zusammen.

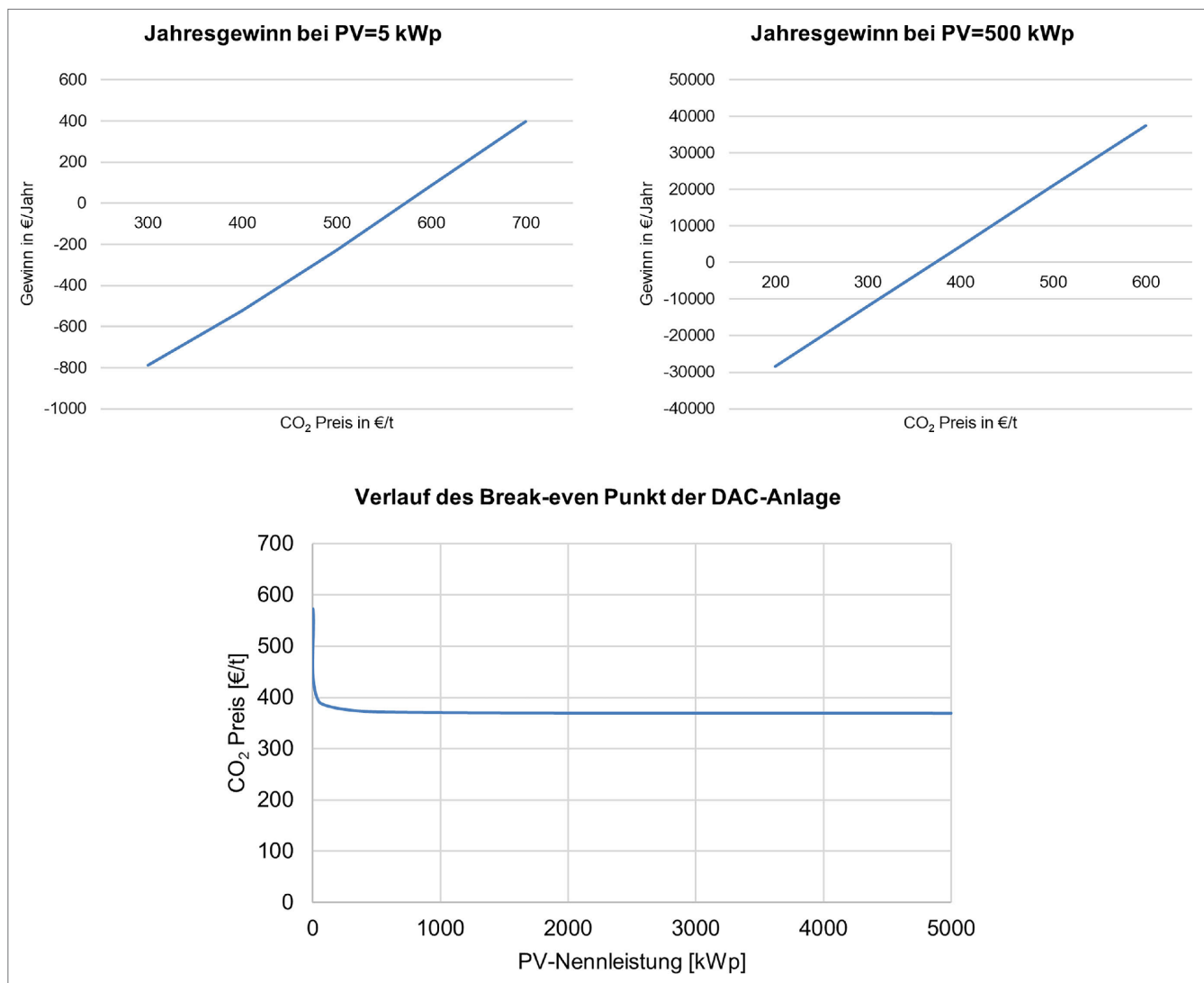
## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der mathematischen Optimierung vorgestellt und das Betriebsverhalten, die Auslegung sowie die Wirtschaftlichkeit von DAC-Anlagen und PEM-Elektrolyseuren unter unterschiedlichen PV-Überschussbedingungen sowie CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>-Preisen gegenübergestellt.

### 4.1 Betriebsverhalten

Im folgenden wird das Betriebsverhalten von DAC-Anlagen und Elektrolyseuren unter verschiedenen PV-Überschüssen simuliert. Untersucht werden Szenarien mit niedrigen und hohen PV-Überschüssen, um die Auswirkungen auf Nennleistungen, Energieeinsatz, CO<sub>2</sub>-Abscheidung beziehungsweise H<sub>2</sub>-Produktion und wirtschaftliche Kennzahlen zu verdeutlichen. **Bild 3** zeigt exemplarisch das optimierte Betriebsverhalten der DAC-Anlage bei einer PV-Nennleistung von 5 kWp (links) und 500 kWp (rechts). Zusätzlich zum PV-Überschuss können die Anlagen Grünstrom vom Netz beziehen. In beiden Fällen wird ein konstanter Strompreis von 0,18 €/kWh angenommen. Der PV-Strom wird als kostenlos angenommen.

Bei dem Betrieb einer DAC-Anlage mit einer PV-Nennleistung von 5 kWp zeigt das linke Bild, dass die verfügbare PV-Leistung über weite Teile des Tages nicht ausreicht, um den elektrischen



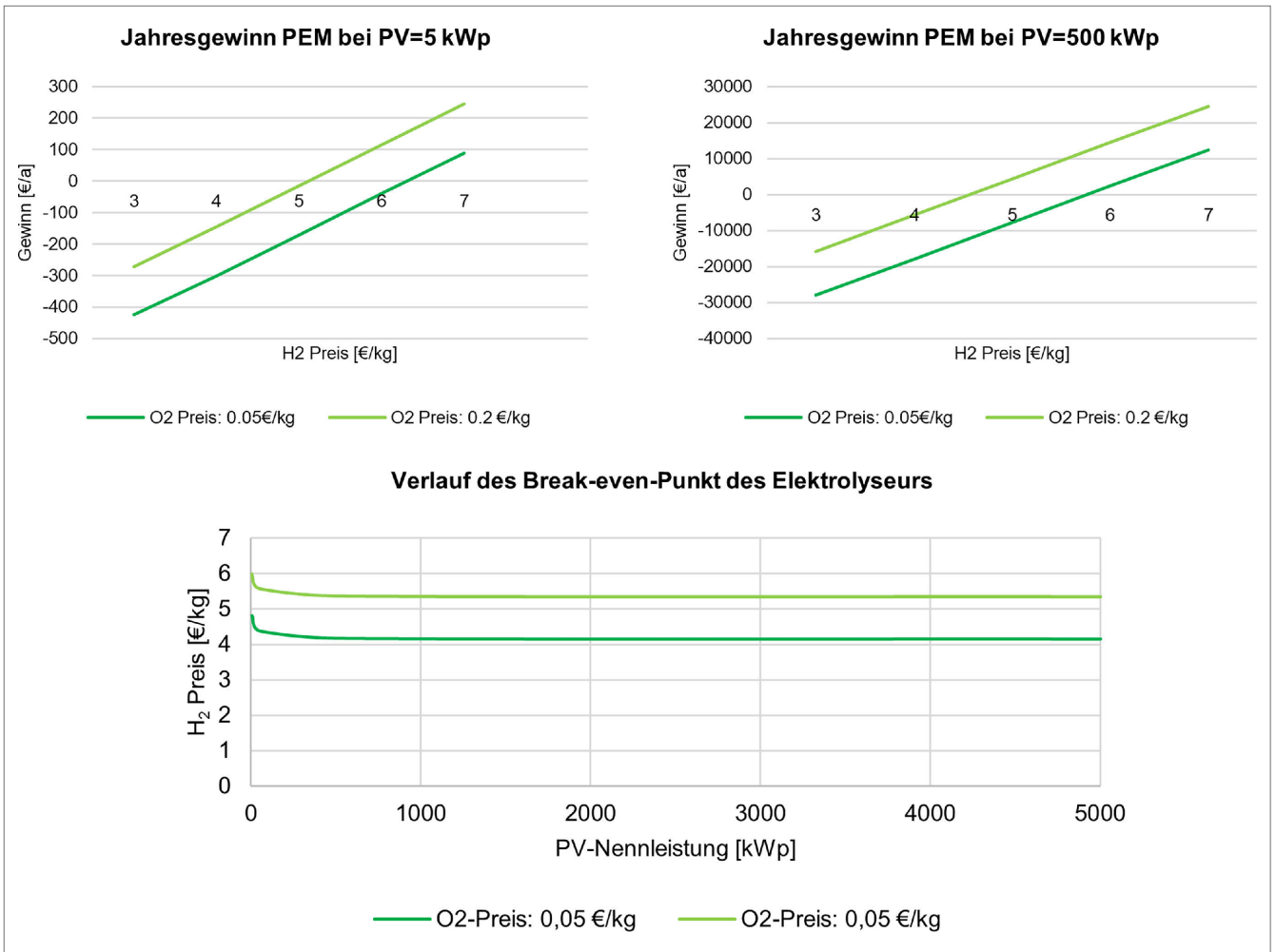
**Bild 4** Jahresgewinn der DAC-Anlage bei unterschiedlichen PV-Überschüssen (oben) und daraus resultierender Verlauf des Break-even Punkts (unten).  
Grafik: Fraunhofer IPA

Bedarf der Anlage vollständig abzudecken. Die optimierte elektrische Nennleistung beträgt 1,2 kW, die thermische Nennleistung 3,6 kW, wobei jährlich 12 t CO<sub>2</sub> abgeschieden werden. Bei steigenden CO<sub>2</sub>-Preisen erhöhen sich sowohl die optimierten Nennleistungen wie die Menge des abgeschiedenen CO<sub>2</sub>, der PV-Anteil und der Jahresgewinn. Die Anlage nutzt den PV-Überschuss von 4654 kWh/a und bezieht zusätzlich 8683 kWh/a aus dem Netz, sodass sich die gesamte zugeführte elektrische Energie auf 13 338 kWh/a beläuft. Der PV-Anteil an der Energiezufuhr der DAC-Anlage liegt bei 34,87 %. In den Nachtstunden läuft die Anlage auf Minimalleistung und bezieht ausschließlich Netzstrom. Dieser Betriebsmodus resultiert aus der nichtkonvexen Struktur des Optimierungsproblems: Das vollständige Abschalten der Anlage würde wiederholte Startvorgänge erforderlich machen, deren Kosten höher ausfallen als die zusätzlichen Aufwendungen für den temporären Netzstrombezug. Die Optimierung entscheidet sich daher dafür, die Anlage über Nacht und während PV-armer Zeitintervalle im Teillastbetrieb zu halten, um kostenintensive Startzyklen zu vermeiden.

Im Vergleich dazu zeigt eine DAC-Anlage mit einer PV-Nennleistung von 500 kWp ein anderes Betriebsverhalten. Die opti-

mierte elektrische Nennleistung beträgt 123 kW, die thermische Nennleistung 363 kW, und die Anlage scheidet jährlich 659 t CO<sub>2</sub> ab. Auch hier steigen bei hohen CO<sub>2</sub>-Preisen die Nennleistungen, die abgeschiedene CO<sub>2</sub>-Menge, der prozentuale PV-Anteil und der Jahresgewinn. Die Anlage nutzt einen PV-Überschuss von 465 455 kWh/a und bezieht zusätzlich 235 163 kWh/a aus dem Netz, wodurch sich die gesamte zugeführte elektrische Energie auf 700 618 kWh/a summiert. Der PV-Anteil an der Energiezufuhr liegt in diesem Fall bei 66,48 %. In den Nachtstunden wird die Anlage heruntergefahren, da der Bezug von Netzstrom verhältnismäßig teuer ist.

Die Simulation der Elektrolyseure unter verschiedenen PV-Überschüssen zeigt ein ähnliches Betriebsverhalten wie die DAC-Anlagen. Bei einem Elektrolyseur mit einer PV-Nennleistung von 5 kWp beträgt die optimierte elektrische Leistung 4,9 kW, wodurch jährlich 113 kgH<sub>2</sub> erzeugt werden. Bei steigenden H<sub>2</sub>-Preisen erhöhen sich sowohl die optimierte Nennleistung als auch die Menge an erzeugtem H<sub>2</sub> und der Jahresgewinn. Die Anlage nutzt einen PV-Überschuss von 4654 kWh/a und bezieht zusätzlich 1559 kWh/a aus dem Netz, sodass sich die gesamte zugeführte elektrische Energie auf 6214 kWh/a summiert. Der PV-Anteil be-



**Bild 5** Jahresgewinn des PEM-Elektrolyseurs bei unterschiedlichen PV-Überschüssen (oben) und daraus resultierender Verlauf des Break-even Punkts (unten). Grafik: Fraunhofer IPA

trägt 74,9%. In den Nachtstunden läuft die Anlage auf Minimalleistung und bezieht Netzstrom, um Startkosten zu vermeiden. Dieser Betriebsmodus resultiert ebenfalls aus der nichtkonvexen Struktur des Optimierungsproblems. Die optimierte elektrische Leistung mit einer PV-Nennleistung von 500 kWp beträgt 495 kW, wodurch jährlich 8740 kgH<sub>2</sub> erzeugt werden. Auch in diesem Fall steigen bei hohen H<sub>2</sub>-Preisen Nennleistung erzeugte H<sub>2</sub>-Menge und Jahresgewinn an. Der PV-Überschuss von 465 454 kWh/a wird nahezu vollständig genutzt, der Netzbezug beträgt 15 270 kWh/a, sodass die gesamte zugeführte elektrische Energie 480 724 kWh/a beträgt. Der PV-Anteil liegt bei 96,83%. In den Nachtstunden wird die Anlage heruntergefahren, da der Bezug von Netzstrom verhältnismäßig teuer ist.

**4.2 Auslegung der DAC-Anlage**

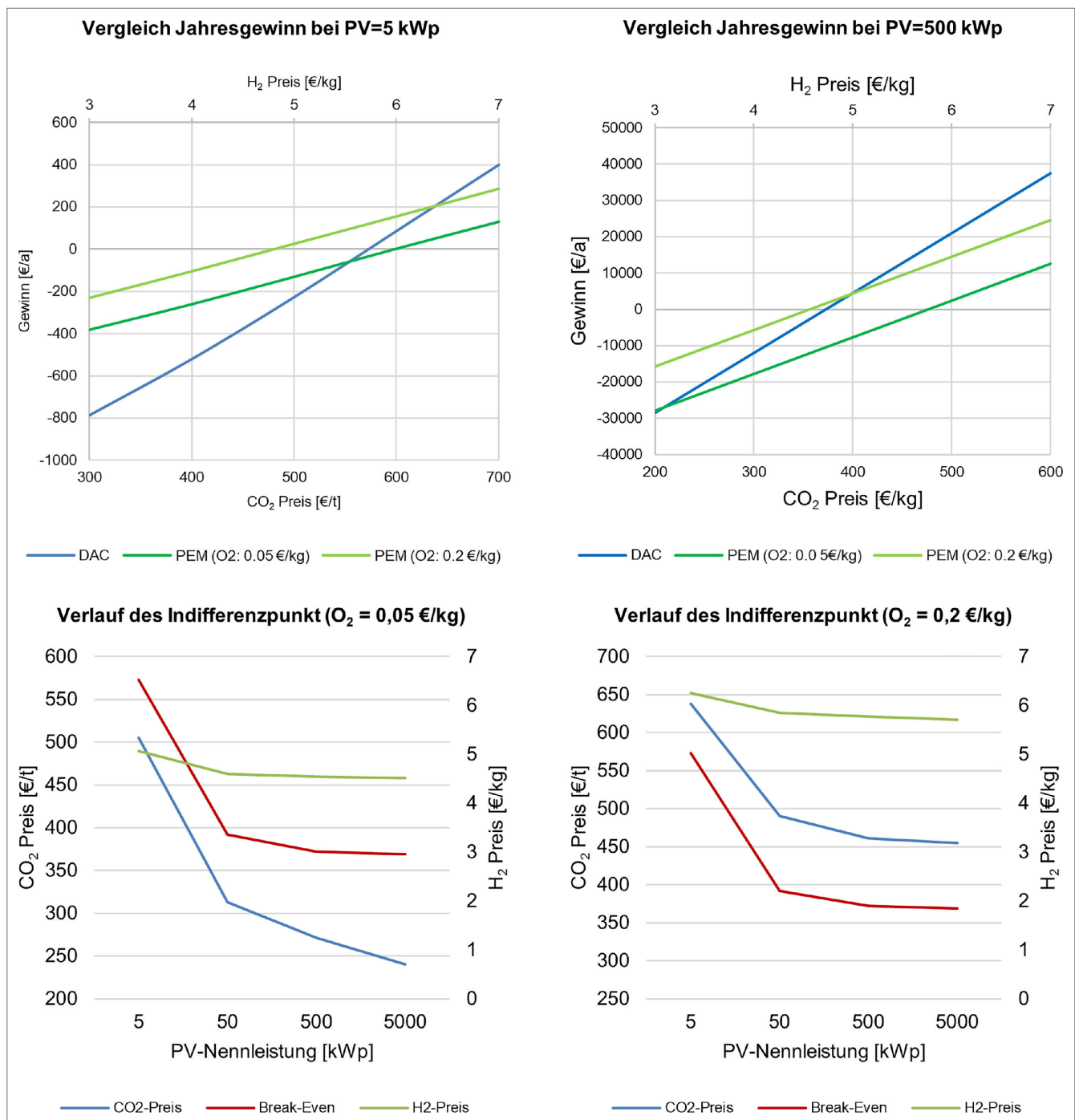
Die Simulationen zeigen, dass die optimalen Leistungen der DAC-Anlagen proportional mit zunehmendem PV-Überschuss wachsen. Gleichzeitig sinkt der benötigte CO<sub>2</sub>-Preis zur Kostendeckung, da sowohl Startkosten als auch Fixkosten auf eine höhere Produktionsmenge von CO<sub>2</sub> verteilt werden.

Der Break-even-Punkt beschreibt die Preisgrenze, ab der eine Technologie kostendeckend arbeitet. Bei einem PV-Überschuss von 5 kW liegt der Break-even-Punkt bei etwa 573 €/t CO<sub>2</sub>,

während er bei 500 kW nur noch circa 369 €/t CO<sub>2</sub> beträgt. Mit steigendem PV-Überschuss nehmen sowohl die Nennleistung der DAC-Anlage und damit die Investitionen als auch die Betriebskosten zu, gleichzeitig steigt die produzierte Menge an CO<sub>2</sub> an. Zudem sinkt der Einfluss der anfänglichen Startkosten auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage, da die höheren Produktionsmengen die Fixkosten relativieren. Der Break-even-Punkt der DAC-Anlage nähert sich einem Wert von 369 €/tCO<sub>2</sub>. **Bild 4** vergleicht den jährlichen Gewinn einer DAC-Anlage bei einer PV-Nennleistung von 5 kWp mit einer PV-Nennleistung von 500 kWp und zeigt den Verlauf des Break-even-Punkts.

**4.3 Auslegung des PEM-Elektrolyseurs**

Beim Betrieb eines Elektrolyseurs mit einer PV-Nennleistung von 5 kWp liegt der Break-even-Punkt zwischen 5,07 €/kgH<sub>2</sub> und 6,25 €/kgH<sub>2</sub>. Im Vergleich dazu zeigt ein Elektrolyseur mit einer PV-Nennleistung von 500 kWp eine verbesserte Wirtschaftlichkeit. Hier liegt der Break-even-Punkt zwischen 4,51 €/kgH<sub>2</sub> und 5,71 €/kgH<sub>2</sub> abhängig vom O<sub>2</sub>-Preis. Mit steigendem PV-Überschuss nehmen sowohl die Investitionen als auch die Betriebskosten zu, gleichzeitig steigt die produzierte Menge an H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> an. Zeitgleich sinkt der Einfluss der anfänglichen Startkosten auf die



**Bild 6** Vergleich der Jahresgewinne von DAC und PEM bei unterschiedlichen PV-Überschüssen (oben) und daraus resultierender Verlauf der Indifferenzpunkte und des Break-even Punktes der DAC-Anlage. Grafik: Fraunhofer IPA

Wirtschaftlichkeit der Anlage, da die höheren Produktionsmengen die Fixkosten relativieren. Die Ergebnisse zeigt **Bild 5**.

#### 4.4 Vergleich der Technologien

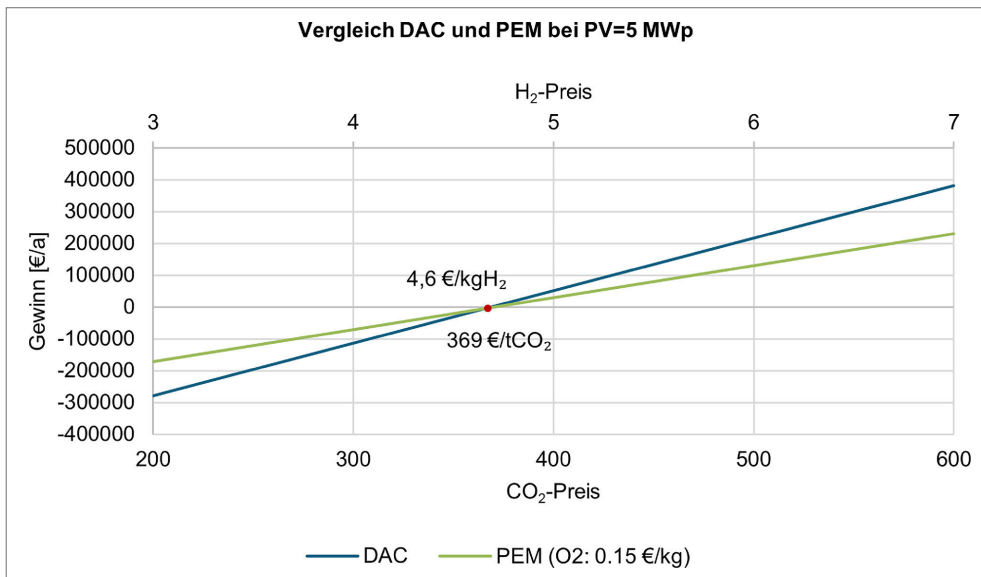
Am Indifferenzpunkt sind die Jahresgewinne der Energieversorgung mit einer DAC-Anlage und einer PEM-Elektrolyseanlage gleichgesetzt, wenn die Erlöse aus den jeweiligen Produkten berücksichtigt werden. Mathematisch lässt sich dies durch die folgende Gleichung ausdrücken: [23]

$$c_{TOTEX,DAC}(x) - E_{CO_2}(x) = c_{TOTEX,PEM}(x) - E_{H_2}(x)$$

Damit die Investition in eine DAC-Anlage wirtschaftlich vorteilhafter ist als die Investition in einen PEM-Elektrolyseur müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Erstens muss der CO<sub>2</sub>-Preis über dem Indifferenzpunkt liegen, sodass die Einnahmen aus der CO<sub>2</sub>-Abscheidung die höheren Kosten der DAC-Anlage ausgleichen. Zweitens muss der H<sub>2</sub>-Preis unter dem Indifferenzpunkt liegen, sodass die PEM-Anlage weniger attraktiv ist und die DAC-Anlage wirtschaftlich bevorzugt wird.

**Tabelle 3** Vergleich der Jahresgewinne und Indifferenzpunkte von DAC und PEM.

PV-Nennleistung	O <sub>2</sub> -Preis	CO <sub>2</sub> -Preis	H <sub>2</sub> -Preis	Jahresgewinn
5 kWp	0,05 €/kg	525 €/t	5,17 €/kg	-170 €/a
5 kWp	0,2 €/kg	618 €/t	6,25€/kg	145 €/a
500 kWp	0,05 €/kg	215 €/t	3,08 €/kg	-28.800 €/a
500 kWp	0,2 €/kg	382€/t	4,92 €/kg	4.900 €/a

**Bild 7** Kostenoptimale Technologiewahlbereiche von DAC und PEM in Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>-Preisen. Grafik: Fraunhofer IPA

Bei einer PV-Nennleistung von 5 kWp kann der Betrieb einer DAC-Anlage ab einem CO<sub>2</sub>-Preis von 525 €/t beziehungsweise 618 €/t wirtschaftlicher als der PEM-Elektrolyseur sein, bei einer 500 kWp Anlage bereits ab einem CO<sub>2</sub>-Preis von 215 €/t beziehungsweise 382 €/t. Die Ergebnisse sind in **Bild 6** und **Tabelle 3** dargestellt.

Bei einem O<sub>2</sub>-Preis von 0,05 €/kg liegt der Indifferenzpunkt unterhalb des Break-even-Punkts der DAC-Anlage. Die DAC-Anlage erreicht bei geringen CO<sub>2</sub>-Preisen den Indifferenzpunkt, wird jedoch erst bei höheren CO<sub>2</sub>-Preisen kostendeckend. Bei einem O<sub>2</sub>-Preis von 0,2 €/kg liegt der Indifferenzpunkt oberhalb des Break-even-Punkts der DAC-Anlage. Die DAC-Anlage erreicht bei geringen CO<sub>2</sub>-Preisen die Kostendeckung, wird aber erst bei höheren CO<sub>2</sub>-Preisen wirtschaftlicher als PEM, was in **Bild 7** dargestellt ist. Der Indifferenzpunkt nähert sich einem Wert zwischen 215 €/tCO<sub>2</sub> und 3,08 €/kgH<sub>2</sub> und 382 €/tCO<sub>2</sub> und 4,92 €/kgH<sub>2</sub> abhängig vom Erlös des Sauerstoffs.

Im Vergleich zwischen DAC-Anlage und PEM-Elektrolyse zeigt sich, dass der Break-even-Punkt der DAC-Anlage gegen 369 €/tCO<sub>2</sub> tendiert, während der Break-even-Punkt der PEM-Anlage bei einem O<sub>2</sub>-Preis von 0,15 €/kg einem H<sub>2</sub>-Preis von rund 4,6 €/kg entspricht. An diesem Punkt fallen die Break-even-Punkte beider Technologien zusammen, was genau dem Indifferenzpunkt entspricht. Liegt der CO<sub>2</sub> Preis darüber oder der H<sub>2</sub>- beziehungsweise O<sub>2</sub>-Preis darunter, arbeitet die DAC-Anlage nicht nur kostendeckend, sondern ist auch wirtschaftlich vorteilhafter als der PEM-Elektrolyseur, wie **Bild 7** zeigt. Direct Air Capture ist also ab einem CO<sub>2</sub>-Preis von 369 €/t kostendeckend und gegenüber der PEM-Elektrolyse wirtschaftlich vorteilhafter,

sofern zusätzlich entweder der H<sub>2</sub>-Preis unter 4,6 €/kg oder der O<sub>2</sub>-Preis unter 0,15 €/kg liegt.

## 5 Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick

Die Arbeit zeigt, dass sowohl DAC als auch PEM-Elektrolyse Potenziale für die Nutzung von PV-Überschussenergie bieten, ihre wirtschaftliche Attraktivität jedoch von den Rahmenbedingungen abhängt. Besonders relevant ist dabei die Größenordnung des PV-Überschusses: Große Überschussmengen senken die spezifischen Kosten beider Technologien. Werden diese Ergebnisse in Beziehung zu den aktuellen Marktpreisen gesetzt, wird deutlich, dass die PEM-Elektrolyse derzeit klar im Vorteil ist.

Der CO<sub>2</sub>-Preis im EU-ETS lag 2024 und 2025 überwiegend im Bereich von 60 €/tCO<sub>2</sub> bis 90 €/tCO<sub>2</sub> und damit um den Faktor 4 bis 6 unterhalb der in dieser Arbeit ermittelten Break-even-Preise für DAC. Der Break-even-Punkt von 369 €/tCO<sub>2</sub> kann laut Studien im Jahr 2050 erreicht werden. Allgemein werden DAC-Anlagen erst wirtschaftlich interessant ab PV-Überschussleistungen im Bereich von mehreren hundert kW, insbesondere wenn gleichzeitig hohe Erlöse durch CO<sub>2</sub>-Preise erzielt werden. Die optimierte elektrische Nennleistung der DAC-Anlage liegt in der untersuchten Fallstudie bei etwa 120 kW bis 130 kW. Die heutigen H<sub>2</sub>-Preise von etwa 5 €/kgH<sub>2</sub> bis 10 €/kgH<sub>2</sub> liegen hingegen bereits im Bereich oder oberhalb des simulierten Break-even-Niveaus der PEM-Elektrolyse. Damit operiert die PEM-Elektrolyse unter heutigen Marktbedingungen bereits nahe oder über der Wirtschaftlichkeitsschwelle, während DAC-Anlagen ak-

tuell selbst bei optimierten Betriebsstrategien deutlich unterhalb der Kostendeckung bleiben.

Gleichzeitig zeigt die Analyse, dass sich diese Bewertung bei veränderten Preisannahmen verschieben kann. Steigende CO<sub>2</sub>-Preise im Zuge einer Verschärfung des EU-ETS oder zusätzlicher Vergütungsmechanismen für negative Emissionen verbessern die Wirtschaftlichkeit von DAC-Anlagen. Gleichzeitig können sinkende H<sub>2</sub>-Preise durch Skaleneffekte und zunehmenden Wettbewerb die Attraktivität der PEM-Elektrolyse begrenzen.


Zukünftige Arbeiten können DAC- und PEM-Technologien weiter bewerten, indem sie langfristige Entwicklungen der Energie- und Rohstoffmärkte, technologische Fortschritte und standortspezifische Rahmenbedingungen berücksichtigen. Außerdem kann die Integration in industrielle Prozesse untersucht werden, um die Kopplung von PV-Überschussenergie mit Abwärmenutzung zu optimieren. Eine Sensitivitätsanalyse, die sowohl Preisentwicklungen als auch Kostensenkungen und technologische Verbesserungen abbildet, kann frühzeitig wirtschaftlich attraktive Szenarien für den Einsatz von DAC und PEM identifizieren.

## Literatur


- [1] Miao, Y.; Selyanchyn, R.; Liu, Y. et al.: Critical Review on Feasibility and Challenges of Coupling Direct Air Capture with Renewable Energy. *ACS ES&T Engineering* 5 (2025) 7, pp. 1614–1629
- [2] Fabianek, P.; Madlener, R.: Techno-economic analysis and optimal sizing of hybrid PV-wind systems for hydrogen production by PEM electrolysis in California and Northern Germany. *International Journal of Hydrogen Energy* 67 (2024), pp. 1157–1172, doi.org/10.1016/j.ijhydne.2023.11.196
- [3] Deutscher Bundestag (Hrsg.): CO<sub>2</sub>-Emissionen: Preise und Kosten. Stand: 2024. Internet: [www.bundestag.de/resource/blob/1021378/WD-5-104-24-pdf.pdf](http://www.bundestag.de/resource/blob/1021378/WD-5-104-24-pdf.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [4] Fiedler, S.; Peiseler, F.; Maier, M.: Umsetzung des ETS II und des Klimafonds in Deutschland. CO<sub>2</sub>-Preis in Deutschland. Institut für angewandte Ökologie (2024) 2. Internet: [www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/co-2-preis-in-deutschland.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/co-2-preis-in-deutschland.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [5] Mohr, S.; Schmidt-Achert, T.; Ziemsky, V. et al.: Von der Theorie zur Praxis: Warum grüner Wasserstoff teurer ist als gedacht. Internet: [www.ffe.de/wp-content/uploads/2025/07/Discussion\\_Paper-Investitionskosten\\_Elektrolyse-2.pdf](http://www.ffe.de/wp-content/uploads/2025/07/Discussion_Paper-Investitionskosten_Elektrolyse-2.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [6] Deutscher Bundestag (Hrsg.): Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff. WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung, Landwirtschaft und 2020. Stand: 2020. Internet: [www.bundestag.de/resource/blob/691748/01a954b2b2d7c70259b19662ae37a575/WD-5-029-20-pdf.pdf](http://www.bundestag.de/resource/blob/691748/01a954b2b2d7c70259b19662ae37a575/WD-5-029-20-pdf.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [7] Umweltbundesamt (Hrsg.): Kostenanalyse für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung an Punktquellen und direkt aus der Atmosphäre (2026). Stand: 2026. Internet: [www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/2026-01/03\\_2026\\_CC.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/2026-01/03_2026_CC.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [8] Umweltbundesamt (Hrsg.): Techno-ökonomische Analyse von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien und Bewertung der CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten und -Projekte in Europa. Stand: 2026. Internet: [www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/2026-01/02\\_2026\\_CC.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/2026-01/02_2026_CC.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [9] Liu, Y.; Miao, Y.; Wang, L. et al.: Addressing solar power curtailment by integrating flexible direct air capture. *Carbon Capture Science & Technology* 14 (2025), #100304, doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100304
- [10] Postweiler, P.; Rezo, D.; Engelpracht, M. et al.: Low-cost negative emissions by demand-side management for adsorption-based direct air carbon capture and storage. *Carbon Neutrality* 4 (2025) 1, doi.org/10.1007/s43979-025-00123-0
- [11] Töpler, J.; Lehmann, J. (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven. Heidelberg: Springer Vieweg 2017
- [12] Maoulida, F.; Guilbert, D.; Camara, M. et al.: Dynamic electrical degradation of PEM electrolyzers under renewable energy Intermittency: Mechanisms, diagnostics, and mitigation strategies – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 225 (2026), #116170, doi.org/10.1016/j.rser.2025.116170
- [13] Rauls, E.: Dynamischer Betrieb von Polymer-Elektrolyt-Membran Wasserelektrolyseuren. Dissertation, RWTH Aachen University, 2024, publications.rwth-aachen.de/record/1006815/files/1006815.pdf?version=1
- [14] Nagel, J.: Optimierung von Energieversorgungssystemen. Cham: Springer Nature Switzerland 2023
- [15] Liu, Y.; Miao, Y.; Feng, Y. et al.: Wind curtailment powered flexible direct air capture. *Applied Energy* 377 (2025) part C, #124402, doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124402
- [16] Lopez, V. A.; Ziar, H.; Haverkort, J. W. et al.: Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 182 (2023), #113407, doi.org/10.1016/j.rser.2023.113407
- [17] Doleski, O. D.; Kaiser, T.; Metzger, M. et al.: Digitale Dekarbonisierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2021
- [18] Schellong, W.: Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen. Heidelberg: Springer 2016
- [19] VDI Technische Gebäudeausrüstung: VDI 6025. Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. Ausgabe 2012–11
- [20] Block, S.; Viebahn, P.; Jungbluth, C.: Analysing direct air capture for enabling negative emissions in Germany: an assessment of the resource requirements and costs of a potential rollout in 2045. *Frontiers in Climate* 6 (2024), doi.org/10.3389/fclim.2024.1353939
- [21] Fraunhofer ISE (Hrsg.): Analyse verschiedener Versorgungsoptionen Baden-Württembergs mit Wasserstoff und Wasserstoffderivaten. Abschlussbericht BWPLUS. Stand: 2025. Internet: [pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10754-H2BW.pdf](http://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10754-H2BW.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [22] Holst, M.; Aschbrenner, S.; Vogelstätter, C. et al.: Cost Forecast for Low-Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems. A cost analysis study on behalf of Clean Air Task Force. Stand: 2021. Internet: [www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf](http://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf). Zugriff am 23.03.2026
- [23] Carstensen, P.: Investitionsrechnung kompakt. Eine anwendungsorientierte Einführung. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage 2008

Yvonne Eboumbou Ebongue, M.Sc.   
yvonne.eboumbou.eboungue@ipa.fraunhofer.de

Prof. Alexander Sauer 

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA   
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
www.ipa.fraunhofer.de

Prof. Alexander Sauer

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)   
Allmandring 35, 70569 Stuttgart  
www.eep.uni-stuttgart.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)