

Potenzialanalyse zu technischer Eignung und Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in verschiedenen Anwendungsbereichen der dezentralen/netzfernen Stromversorgung

Kurzvorstellung und Kernergebnisse

Veranstaltung „Perspektiven für die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in der dezentralen Energieversorgung“, NOW GmbH, Berlin

07. Dezember 2022

Die Energiewende erfordert sowohl die Transformation existierender Anwendungsfelder als auch die Lösung neuer Problemstellungen

Zielgrößen und Treiber der Energiewende



Klimawandel und Dekarbonisierung



Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit



Effizienzsteigerung und Innovation



Energiepolitische Stabilität und Versorgungssicherheit



Urbanisierung vs. ländlicher Raum



Digitalisierung und Vernetzung



Verbesserung der Lebensbedingungen

Potenziale neuer Geschäftsmodelle

Implikationen für die dezentrale Energieversorgung

1 Ersatz bzw. künftige Vermeidung konventioneller Technologien auf Basis fossiler Energieträger* durch...

- a) neue nachhaltige Technologiekonzepte
- b) den Einsatz grüner (klimaneutraler) Energieträger

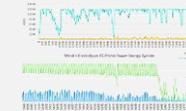
...in **bestehenden** Einsatzgebieten.



* bspw. Diesel- und Erdgasgeneratoren

2 Umgang mit den Charakteristika und (technischen) Anforderungen des künftigen Energiesystems, wie...

- a) der Netzstabilisierung aufgrund volatiler EE-Erzeugung
- b) dem zunehmenden Trend der Dezentralisierung (Microgrids, etc.)



- a) dem raschen Ausbau von Ladeinfrastruktur in netzfernen bzw. -schwachen Gebieten



...in **neuen** Einsatzgebieten.

Kernfragestellung und übergeordnetes Ziel der Untersuchungen:

Inwiefern und unter welchen Umständen lässt sich der Einsatz von stationären Wasserstoff- und Brennstoffzellensystemen in der dezentralen, netzfernen Energieversorgung technisch und wirtschaftlich sinnvoll darstellen und welche Parameter haben dabei relevanten Einfluss auf deren Marktpotenziale.

Die der Modellierung zugrunde gelegten Technologie- und Preisentwicklungen fokussieren auf das Jahr 2026 und können als Inputparameter bedarfsgerecht angepasst werden.

Exemplarische Anwendungsfelder der dezentralen Energieversorgung und deren Charakterisierung anhand übergeordneter Einsatzkategorien

Kritische Infrastrukturen, bspw. in der Telekommunikation

Strom

Stationäre Primärenergie /
Notstrom



Modulare Systeme für Baustellen oder den Katastrophenschutz

Strom, ggf. Wärme, Sauerstoff, Wasser

Semi-stationäre (netzferne)
Primärenergie / Notstrom



Abgelegene Bildungseinrichtungen, wie Schulen und Universitäten

Strom, ggf. Wärme, Wasser

Stationäre (netzferne)
Primärenergie / Notstrom

Systemgröße



Abgelegene Inselnetze, Quartiere, Hotels und Gewerbetriebe

Strom, ggf. Wärme, Sauerstoff, Wasser

Stationäre (netzferne)
Primärenergie / Notstrom

Medizinische Versorgung, insb. Krankenhäuser

Strom, ggf. Wärme, Sauerstoff, Wasser

Stationäre (netzferne)
Primärenergie / Notstrom



Autarke Minen und Landwirtschaftsbetriebe

Strom, ggf. Wärme, Sauerstoff, Wasser

Stationäre (netzferne)
Primärenergie



Heterogene technisch-betriebsseitige Eigenschaften und Anforderungen erfordern die Analyse und die systematische Clusterung von Anwendungen

Ansatz und Vorgehen

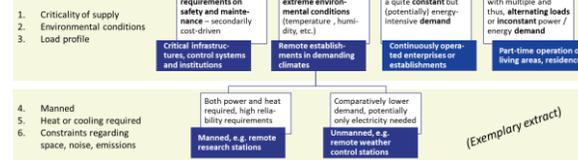
Longlist

Analyse und Strukturierung

Shortlist

Aggregation und qualitative Beschreibung einzelner Anwendungen

Applications	Power system type	Criticality of supply	Change-over time	Power demand	Operating constraints e.g. SWaC, noise	Rly product situation	Market outlook
Hospitals	Back-up power	Required by law	Fast	Medium-high	Depending on location	High	Stay the same
Nuclear sites	Back-up power	Required by law	Fast	High	Depending on location	Low	Decrease
Data centres	Back-up power	High due to commercial interest	Fast	Medium-high	Depending on location	Low	Increase
Cell towers	Back-up power	High due to commercial interest	Fast	Low	Depending on location	Low	Increase
Hospitals	Prime power	High	N/A	High	No: generally remote areas	High	Stay the same
Airports	Prime power	High	N/A	High	No: generally remote areas	Medium	Stay the same
Weather stations	Prime power	Medium	N/A	Low	No: generally remote areas	Low	Primary (off-grid) Power
Astronomy observations	Prime power	Medium	N/A	Low	No: generally remote areas	Low	Stay the same

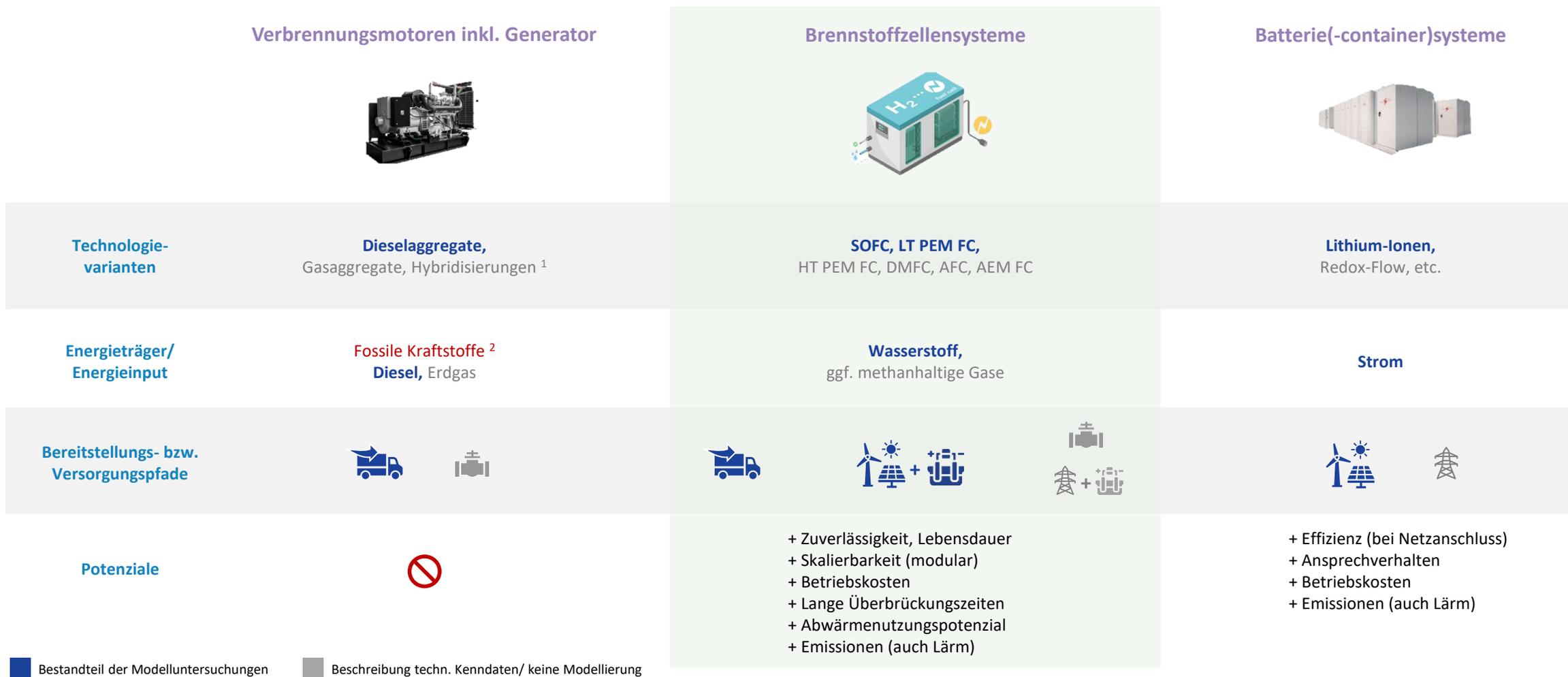


Gruppierung anhand definierter Differenzierungsmerkmale (Kriterien)

Ableitung und Charakterisierung von homogenen Anwendungsfeldern (Archetypen), untergliedert nach den drei definierten übergeordneten Einsatzkategorien:

- 1 Semi-stationäre (Primär-)Energieversorgung
- 2 Backup- bzw. Notstromversorgung
- 3 (Stationäre) Primärenergieversorgung

Übersicht und Einordnung verschiedener untersuchter Technologieoptionen und deren Versorgungspfade für die Energiebereitstellung



■ Bestandteil der Modelluntersuchungen

■ Beschreibung techn. Kenndaten/ keine Modellierung

¹ Hybridisierung durch Batterien und ggf. EE-Kapazitäten

² Auch auf Basis grüner Kraftstoffe (eFuels) mgl. – H₂-Verbrenner war Bestandteil der Untersuchungen

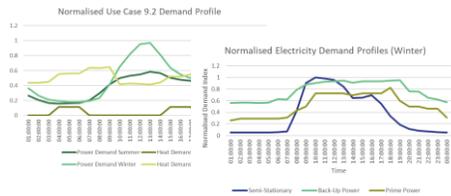
Als Grundlage für den objektiven Technologievergleich bedarf es unter anderem der Bestimmung optimaler Systemkonfigurationen

Methode und Vorgehen

Input

Optimierungsalgorithmus

Output



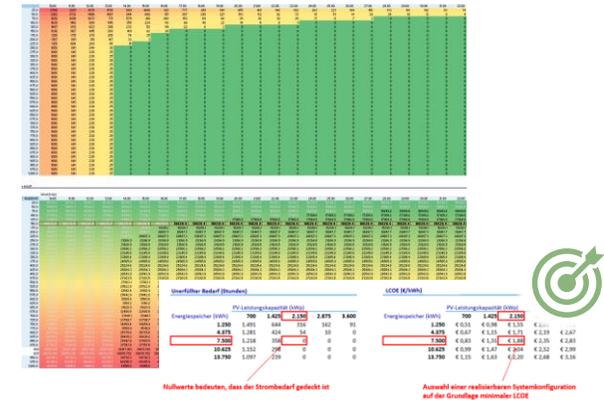
Use-Case-spezifische **Verbrauchs- bzw. Bedarfsprofile für Strom und ggf. Wärme** in stündlicher Auflösung für ein Referenzjahr



Charakteristische **Lastprofile für Wind und PV** für den Standort Deutschland



Iterativer Abgleich und **Optimierung von möglichen Systemkonfigurationen** unter der Maßgabe der **vollständigen Bedarfsdeckung**



Ausweis des **kostengünstigsten Gesamtsystems** hinsichtlich dessen **Stromgestehungskosten (LCOE)**

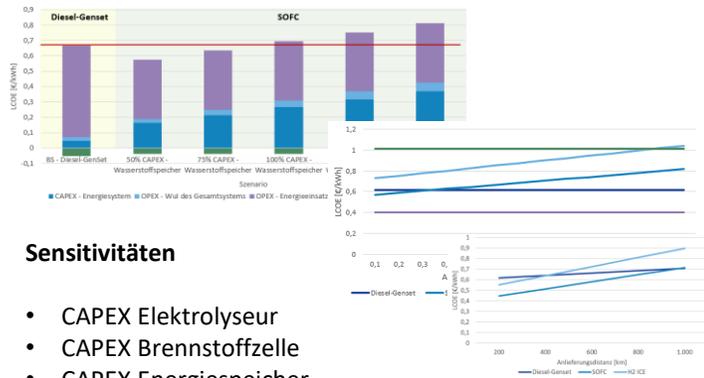
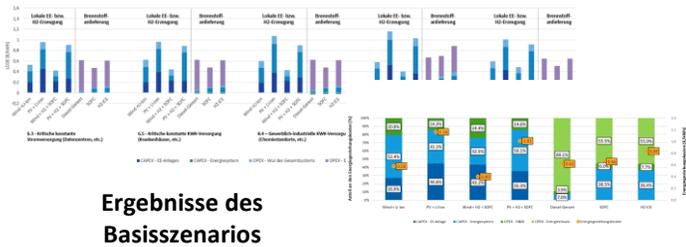
Bitte beachten:

Modelluntersuchungen und deren **Ergebnisse** müssen im Kontext der getroffenen **Annahmen und Prämissen** betrachtet und verstanden werden, wie auch der Tatsache, dass es sich um eine **vereinfachte Abbildung der Realität** handelt. Folglich können auch im Rahmen der vorliegenden Analysen nicht alle techno-ökonomischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen erfasst und in den Resultaten und Interpretationen abgebildet werden.

Weiterhin basieren die modell- bzw. kalkulationsseitigen Ergebnisse auf Datengrundlagen, die sich hinsichtlich den lokalen **Erzeugungspotenzialen für erneuerbare Energien** (Wind und PV) sowie den anwendungsspezifischen **Bedarfs- bzw. Verbrauchsprofilen** für Strom (und ggf. Wärme) auf den **Standort Deutschland** beziehen. Dies begründet sich in der Verfügbarkeit adäquater Datenbasen zum Zeitpunkt der Durchführung der Untersuchungen.

Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien verfügen unter gewissen Rahmenbedingungen bereits über signifikantes Potenzial

Modell- bzw. kalkulationsseitige Kernergebnisse



Kippunkte

Mit Energieträgern belieferte Systeme



Brennstoffzellensysteme können in **gewissen Anwendungen** bereits **Wettbewerbsfähigkeit** gegenüber der konventionellen Dieselsechologie erreichen



Anwendungsseitige Erfolgsfaktoren: Auslastungsgrad (Betriebskostenvorteil bei OPEX-getriebenen Use Cases), Leistungsklasse, erforderl. lokale Speicherkapazität, Anlieferungsdistanz
Technologieseitige Erfolgsfaktoren: CAPEX-Reduktion von Brennstoffzellen und Wasserstoffsystemkomponenten (insb. spezif. Speicherkosten), Wasserstoffpreis, Anlieferungskosten

Systeme mit lokaler EE-Erzeugung



Windkraftbasierte Wasserstoffsysteme weisen im Bereich der **stationären Primärenergie** über alle Technologieoptionen und Anwendungsfälle hinweg die **niedrigsten LCOE** auf



Auf **lokalen PV- oder Windkraftanlagen** basierende **Wasserstoffsysteme** weisen **geringere LCOE** als entsprechende **Lithium-Ionen-Batteriesysteme** auf



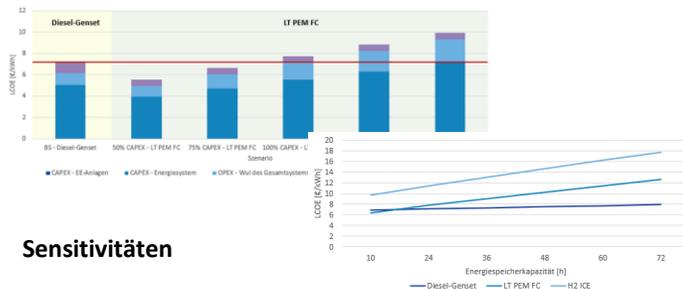
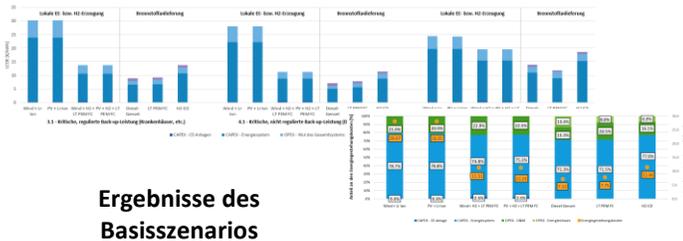
PV-basierte vollständig autarke Energieversorgungssysteme erweisen sich **hierzulande** aufgrund hoher saisonaler Lastschwankungen als **ineffizient** und **nicht wettbewerbsfähig**



Anwendungsseitige Erfolgsfaktoren: Geograf. Lage der Anlagen und entsprech. EE-Erzeugungspotenziale – hohe Erträge sowie geringe saisonale Schwankungen als vorteilhaft, Auslastungsgrad (Betriebskostenvorteil bei OPEX-getriebenen Use Cases)
Technologieseitige Erfolgsfaktoren: CAPEX-Reduktion sowohl für EE-Erzeugung als auch Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien (Gesamtsystem)

Dies gilt ebenso für den Bereich der Notstromversorgung, wengleich sich dieser signifikant von der (netzfernen) Primärenergie unterscheidet

Modell- bzw. kalkulationsseitige Kerneergebnisse



Sensitivitäten

- CAPEX Brennstoffzelle
- CAPEX Energiespeicher
- Energiespeicherkapazität
- Wasserstoff- und Dieselpreis
- Anlieferungsdistanz
- ...

Kippunkte

Besonderheiten in der Backup- bzw. Notstromversorgung

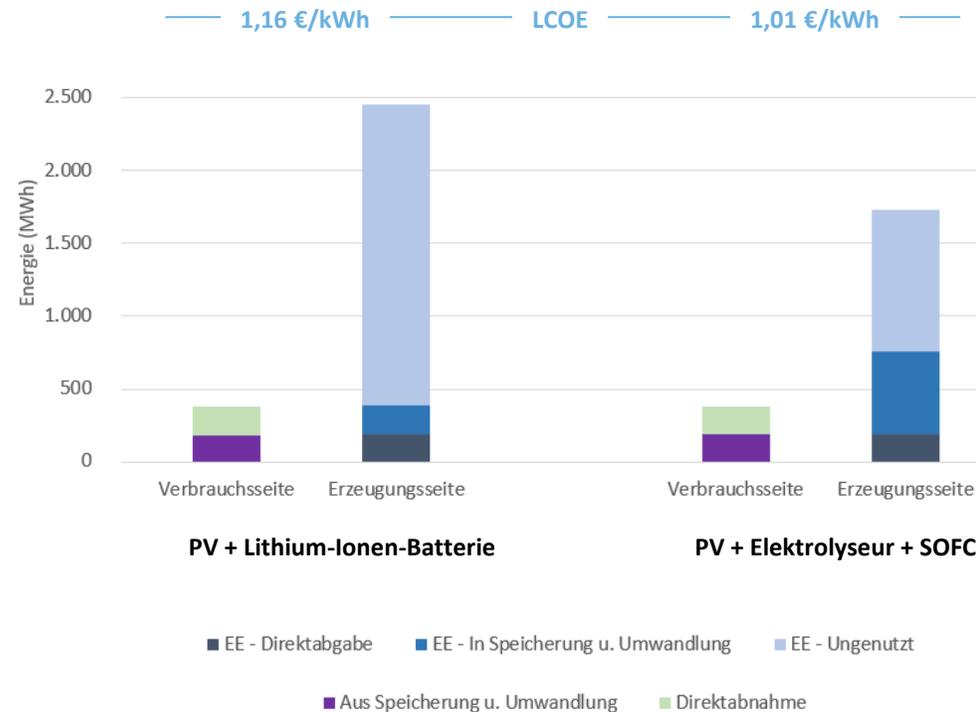
- ✓ Allgemein **höhere LCOE** als (netzferne) Primärenergiesysteme, die aufgrund ihrer hohen **Auslastung** eine signifikant größere Menge an jährlicher **Nutzenergie** erzeugen
- ✓ Folglich sind **CAPEX-intensive Systeme** in dieser Einsatzkategorie aus ökonomischer Sicht **benachteiligt**
- ✓ An **Standorten**, wo deutlich **höhere Auslastungsgrade** erforderlich bzw. möglich sind, können jedoch **vorteilhafte OPEX** einen **künftigen Erfolgsfaktor** darstellen
- ✓ Stark **regulierter Bereich**, in dem **regulatorische Anpassungen** hinsichtlich der Anwendbarkeit von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien **erforderlich** werden können (Status quo)¹
- ✓ Abhängig von den anwendungsspezifischen **Verfügbarkeitsanforderungen** kann die **Hybridisierung mit Batterien** erforderlich werden, insb. im Bereich **kritischer Infrastrukturen**

Übergreifende Aspekte

- ✓ Der **Diesel-** bzw. auch der beinhaltete **CO₂-Preis** erweisen sich insb. **bei hohen Auslastungsgraden** als besonders sensitiv und folglich als **begünstigenden Faktor** für alle **nachhaltigen Technologieoptionen**
- ✓ Die **Abwärmenutzung** stellt modellseitig kein signifikantes Unterscheidungsmerkmal für die Technologien dar, gewinnt bzgl. der **Gesamtsystemeffizienz** und **Wärmeversorgung** künftig jedoch stark an **Bedeutung**

¹ Auch im Hinblick auf die Lagerfähigkeit von Dieseldieselkraftstoff für konventionelle Notstromgeneratoren

Die spezifischen EE-Erzeugungspotenziale einer geografischen Lage haben signifikanten Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit nachhaltiger Technologien

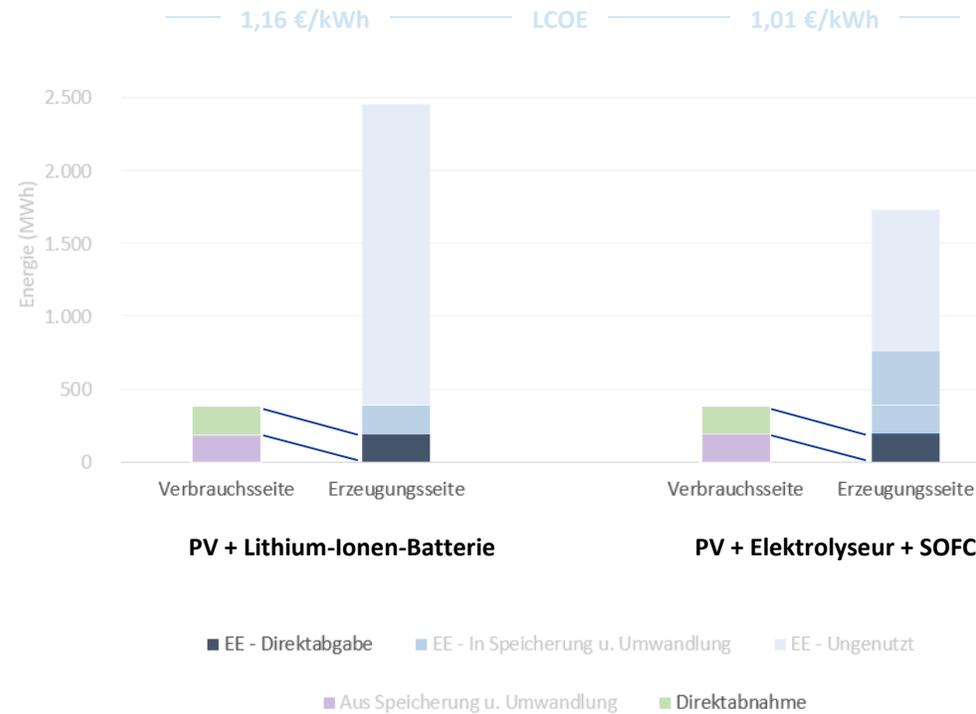


Vergleichende Energiemengen- und -flussbetrachtung für Verbrauchs- und Erzeugungssseite eines PV-basierten netzfernen dezentralen Energieversorgungssystems – exemplarische Darstellung von Use Case 9.2 für die stationäre Primärenergieversorgung (KWK) von Haushalten und Quartieren

Die spezifischen EE-Erzeugungspotenziale einer geografischen Lage haben signifikanten Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit nachhaltiger Technologien

- 1 Direktnutzung von Energie stets vorteilhaft – jedoch nur bei zeitlicher Korrelation von Angebot und Nachfrage möglich

Notwendigkeit der Speicherung



Vergleichende Energiemengen- und -flussbetrachtung für Verbrauchs- und Erzeugungssseite eines PV-basierten netzfernen dezentralen Energieversorgungsystems – exemplarische Darstellung von Use Case 9.2 für die stationäre Primärenergieversorgung (KWK) von Haushalten und Quartieren

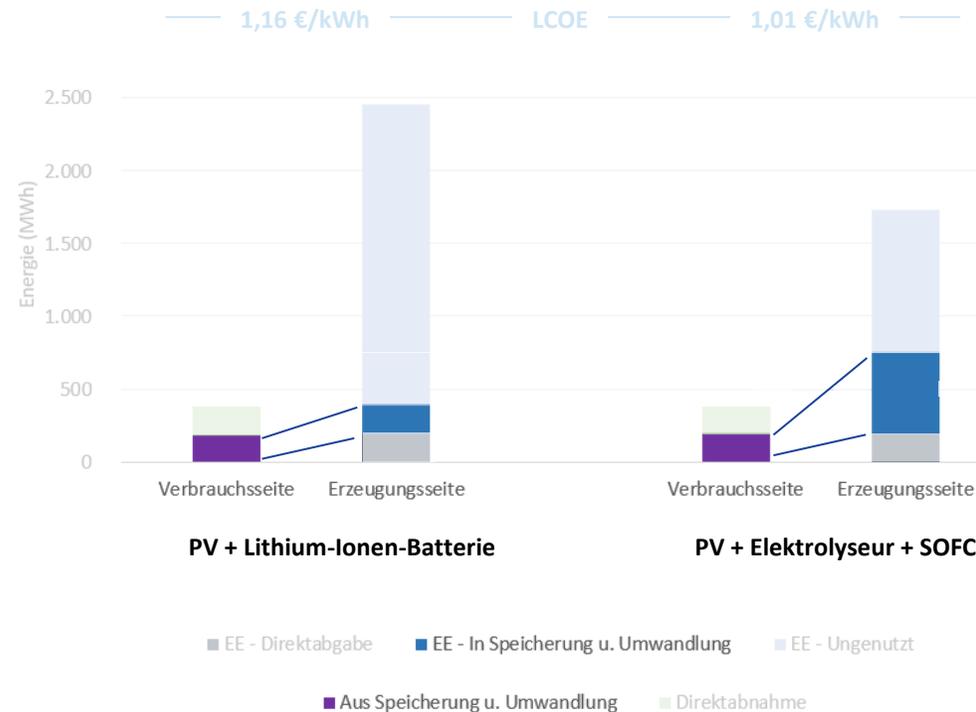
Die spezifischen EE-Erzeugungspotenziale einer geografischen Lage haben signifikanten Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit nachhaltiger Technologien

1 Direktnutzung von Energie stets vorteilhaft – jedoch nur bei zeitlicher Korrelation von Angebot und Nachfrage möglich

Notwendigkeit der Speicherung

2 Höhere Umwandlungsverluste von Wasserstoff und Brennstoffzellen gegenüber batterieelektrischen Systemen ersichtlich

„Well-to-Wheel“-Betrachtung



Vergleichende Energiemengen- und -flussbetrachtung für Verbrauchs- und Erzeugungsseite eines PV-basierten netzfernen dezentralen Energieversorgungssystems – exemplarische Darstellung von Use Case 9.2 für die stationäre Primärenergieversorgung (KWK) von Haushalten und Quartieren

Die spezifischen EE-Erzeugungspotenziale einer geografischen Lage haben signifikanten Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit nachhaltiger Technologien

1 Direktnutzung von Energie stets vorteilhaft – jedoch nur bei zeitlicher Korrelation von Angebot und Nachfrage möglich

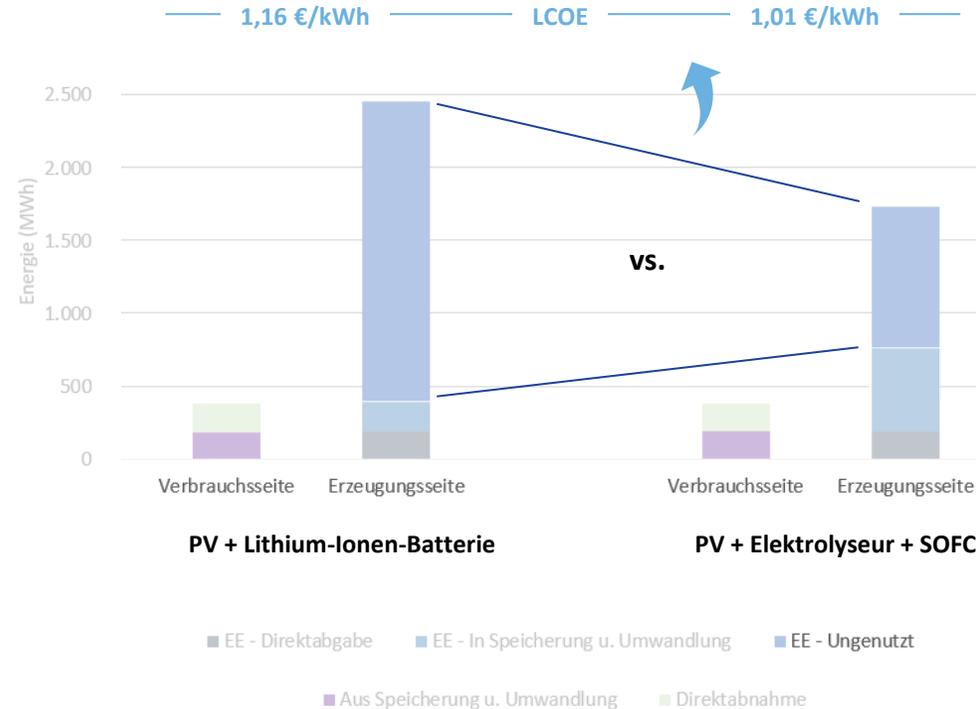
Notwendigkeit der Speicherung

2 Höhere Umwandlungsverluste von Wasserstoff und Brennstoffzellen gegenüber batterieelektrischen Systemen ersichtlich

„Well-to-Wheel“-Betrachtung

3 Speicherung von Energie zur vollständigen Bedarfsdeckung führt bei hohen saisonalen Schwankungen zu teuren Ineffizienzen

Gesamtvorteilhaftigkeit kann sich folglich ändern – Wasserstoffspeicherung führt zu geringerer PV-Überdimensionierung



Vergleichende Energiemengen- und -flussbetrachtung für Verbrauchs- und Erzeugungssseite eines PV-basierten netzfernen dezentralen Energieversorgungssystems – exemplarische Darstellung von Use Case 9.2 für die stationäre Primärenergieversorgung (KWK) von Haushalten und Quartieren

Die spezifischen EE-Erzeugungspotenziale einer geografischen Lage haben signifikanten Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit nachhaltiger Technologien

1 Direktnutzung von Energie stets vorteilhaft – jedoch nur bei zeitlicher Korrelation von Angebot und Nachfrage möglich

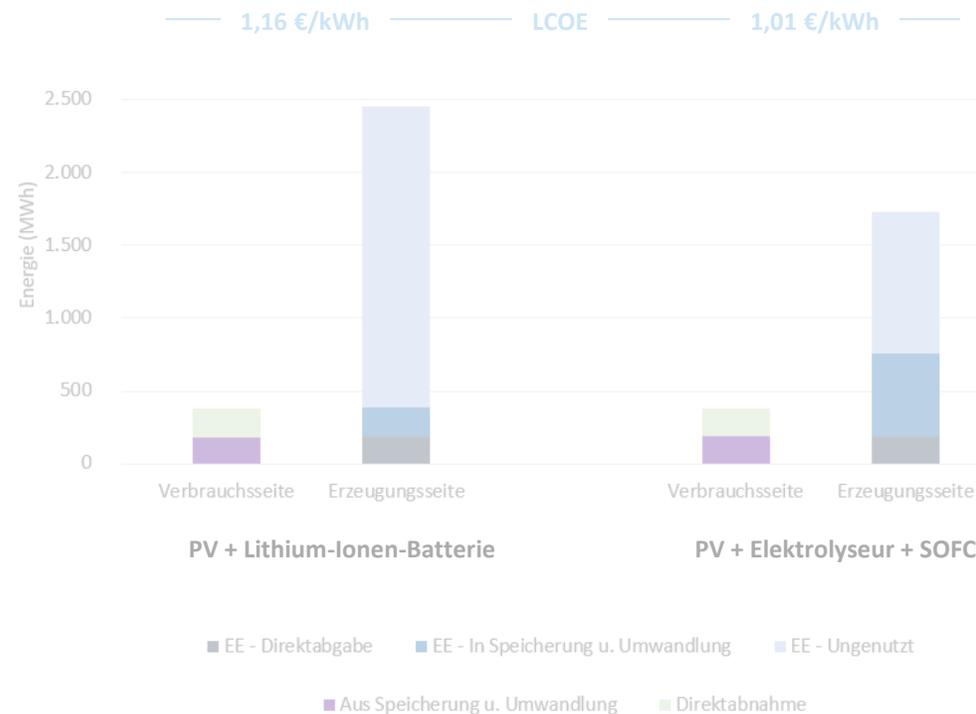
Notwendigkeit der Speicherung

2 Höhere Umwandlungsverluste von Wasserstoff und Brennstoffzellen gegenüber batterieelektrischen Systemen ersichtlich

„Well-to-Wheel“-Betrachtung

3 Speicherung von Energie zur vollständigen Bedarfsdeckung führt bei hohen saisonalen Schwankungen zu teuren Ineffizienzen

Gesamtvorteilhaftigkeit kann sich folglich ändern – Wasserstoffspeicherung führt zu geringerer PV-Überdimensionierung



Vergleichende Energiemengen- und -flussbetrachtung für Verbrauchs- und Erzeugungssseite eines PV-basierten netzfernen dezentralen Energieversorgungssystems – exemplarische Darstellung von Use Case 9.2 für die stationäre Primärenergieversorgung (KWK) von Haushalten und Quartieren



Hohe Potenziale in wind- und sonnenenertragsreichen Regionen mit geringen saisonalen Schwankungen



Hybridisierung von Technologien und Kopplung von Verbrauchern zu Systemverbänden zur Erhöhung der Gesamteffizienz

Schnittstelle Digitalisierung

Jedoch:

Einzelfallbetrachtungen notwendig (lokale EE-Potenziale, Bedarfsprofile, adäquate technische Derivate, etc.)

Anpassbare modellbasierte Optimierungen und Analysen als vielversprechende Grundlage

Hauptliefergegenstand der Analysen und Untersuchungen

Die spezifischen EE-Erzeugungspotenziale einer geografischen Lage haben signifikanten Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit nachhaltiger Technologien

- 1 Direktnutzung von Energie stets vorteilhaft – jedoch nur bei zeitlicher Korrelation von Angebot und Nachfrage möglich

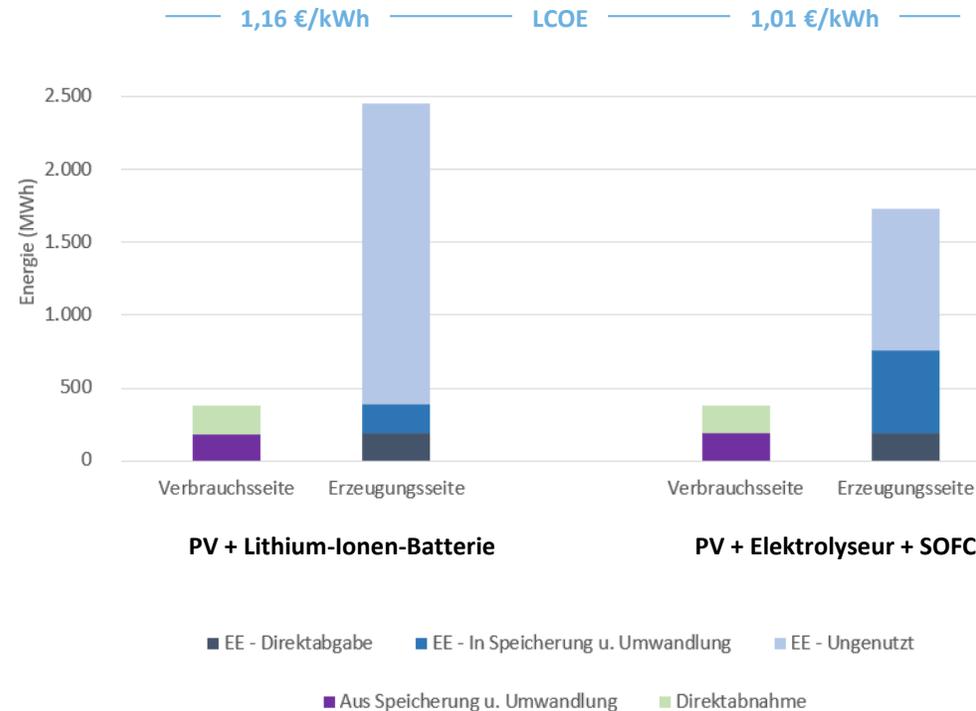
Notwendigkeit der Speicherung

- 2 Höhere Umwandlungsverluste von Wasserstoff und Brennstoffzellen gegenüber batterieelektrischen Systemen ersichtlich

„Well-to-Wheel“-Betrachtung

- 3 Speicherung von Energie zur vollständigen Bedarfsdeckung führt bei hohen saisonalen Schwankungen zu teuren Ineffizienzen

Charakteristisch für volatile EE wie Wind und PV



Vergleichende Energiemengen- und -flussbetrachtung für Verbrauchs- und Erzeugungssseite eines PV-basierten netzfernen dezentralen Energieversorgungssystems – exemplarische Darstellung von Use Case 9.2 für die stationäre Primärenergieversorgung (KWK) von Haushalten und Quartieren



Hohe Potenziale in wind- und sonnenenertragsreichen Regionen mit geringen saisonalen Schwankungen



Hybridisierung von Technologien und Kopplung von Verbrauchern zu Systemverbänden zur Erhöhung der Gesamteffizienz

Schnittstelle Digitalisierung

Jedoch:

Einzelfallbetrachtungen notwendig (lokale EE-Potenziale, Bedarfsprofile, adäquate technische Derivate, etc.)

Anpassbare modellbasierte Optimierungen und Analysen als vielversprechende Grundlage

Hauptliefergegenstand der Analysen und Untersuchungen

Über die Techno-Ökonomie hinaus ist die Eignung und Vorteilhaftigkeit von Technologien ganzheitlich und im Kontext weiterer Faktoren zu bewerten

1 Technologiespezifische Kriterien

- Ansprech- und Lastverhalten
- Lebensdauer und Standfestigkeit
- Investitions- vs. Betriebskosten
- Resistenz ggü. Umweltbedingungen
- Verfügbarkeit am Markt
- ...

2 Anwendungsspezifische Kriterien

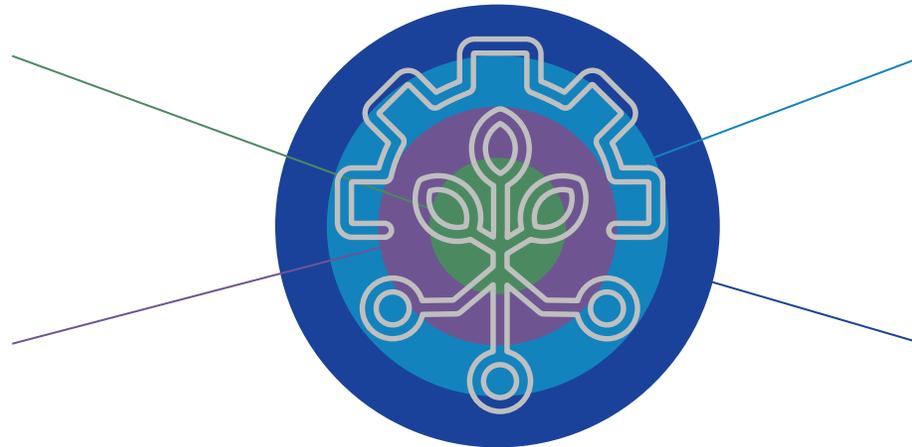
- Strom- und Wärmebedarf
- Lastgang und EE-Erzeugungspotenziale
- Standort- und Umweltbedingungen
- Lage und Platzangebot
- Entfernung zu Versorgungszentren
- Potenzielle Restriktionen (Emissionen, etc.)
- ...

3 Ökosystemseitige Kriterien

- Verfügbarkeit von Brennstoffen
- Restriktionen durch Normen und Standards
- Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal
- Fördermittel und Subventionen (kurzfristig)
- Funktionsfähigkeit von Lieferketten
- ...

4 Makroskopische Kriterien

- Geopolitische Faktoren (Unabhängigkeit)
- Sozio-ökonomische Aspekte
- Internationale Märkte und Wettbewerb
- Politischer Rahmen und Roadmaps
- ...



Die **erfolgreiche Implementierung** nachhaltiger dezentraler Energieversorgungssysteme bedarf der **Berücksichtigung zahlreicher Faktoren**, wodurch sich eine **komplexe multivariate Problemstellung** ergibt. Die **techno-ökonomische Modellierung** unter Einbeziehung weiterer **makroskopischer Einflüsse** schafft eine ganzheitliche **Informationsgrundlage** und folglich die Basis für **strategische Entscheidungen**. Auch **Staat und Politik** sind im Sinne der **Regulatorik** und auch im Hinblick auf die **Rahmenbedingungen in internationalen Zielmärkten** gefordert, um den Einsatz und **Markthochlauf nachhaltiger Wasserstoff- und Brennstoffzellensysteme** und folglich einen essentiellen Beitrag zum **Umweltschutz** sowie zur **Daseinsvorsorge** zu ermöglichen und leisten.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Dr David Hart

Partner at E4tech (an ERM Group company)

Mail: david.hart@e4tech.com

Tel : +41 21 561 28 17

Avenue de la Gare 10, 1003 Lausanne,

Switzerland

www.e4tech.com

Xavier Cordobes

Principal Consultant at E4tech (an ERM Group company)

Mail: xavier.cordobes@e4tech.com

Tel: +44 20 3206 5754

2nd Floor Exchequer Court, 33 St Mary Axe, London, EC3A 8AA,

United Kingdom

www.e4tech.com

Anhang

Annahmen und Inputparameter der Modelluntersuchungen

Allgemeine Annahmen der techno-ökonomischen Modellierung

Einsatzkategorie	Parameter	Wert
Allgemein	Systemgröße	100 Kilowatt
	Lieferdistanz	300 Kilometer
	Preis Wasserstoff	Grüner Wasserstoff: 4,5 Euro pro Kilogramm
	Lieferkosten Wasserstoff	0,55 Euro pro Kilogramm pro 100 Kilometer
	Preis Diesel	1,90 Euro pro Liter
	Lieferkosten Diesel	0,04 Euro pro Liter pro 100 Kilometer
	Erdgaspreis	0,03 Euro pro kWh für Industrie & Gewerbe; 0,06 Euro pro kWh für Haushalte
	Ungedekte Lastdauer	0 Stunden
Semistationäre Energieversorgung	Brennstoffzellentyp	SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
	Unabhäng. Versorgungsdauer	72 Stunden
	Auslastungsgrad	70 Prozent
Netzersatz-/ Backup-Energieversorgung	Brennstoffzellentyp	LT PEM FC (Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
	Unabhäng. Versorgungsdauer	10-24 Stunden (anwendungsfallabhängig)
	Unterbrechungsdauer	3 Stunden
	Anzahl Unterbrechungen	eine pro Monat
Primärenergieversorgung	Brennstoffzellentyp	SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
	Unabhäng. Versorgungsdauer	basierend auf Lastprofil (bei lokaler Stromproduktion); 168-672 Stunden (bei Brennstofflieferung, anwendungsfallabhängig)
	Auslastungsgrad	100 Prozent

Annahmen zu Lebensdauer und Investitionskosten der Stacks (generische Technologiedaten)

	Lebensdauer [Stunden]		CAPEX [Euro]	
	2021	2026	2021	2026
Diesel Genset	n/a	n/a	n/a	n/a
Dieser Genset Hybrid (+ integrierte Lithiumionenbatterie)	n/a	n/a	n/a	n/a
PV	n/a	n/a	n/a	n/a
Onshore Wind	n/a	n/a	n/a	n/a
Lithiumionenbatteriesystem	n/a	n/a	n/a	n/a
LT PEM FC (Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	40.000 – 80.000	50.000 – 100.000	150 – 410 (KWK & Backup)	92 – 210 (KWK & Backup)
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	40.000 – 90.000	50.000 – 110.000	420 – 440	410 – 420
AFC (Alkaline Fuel Cell)	5.000 – 10.000	5.000 – 10.000	667 – 1.000	667 – 1.000
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	approx. 5.000	approx. 5.000	> 833	> 1.000
AEL (Alkaline Electrolysis)	60.000 – 75.000	75.000 – 90.000	172 – 188	144 – 162
PEMEL (Proton Exchange Membrane Electrolysis)	50.000 – 80.000	75.000 – 90.000	220 – 260	200 – 220
SOEL (Solid Oxide Electrolysis)	< 20.000	30.000 – 60.000	500 – 580	440 – 500
AEMEL (Anion Exchange Membrane Electrolysis)	< 5.000	> 5.000	1.167 – 1.333	167 – 333

Annahmen zu Lebensdauer und Investitionskosten auf Systemebene

	Lebensdauer [Jahre]	CAPEX [Euro]	
	2021/2026	2021	2026
Diesel Genset	15.000 – 50.000 Stunden	190 – 690	190 – 690
Diesel Genset Hybrid (+ integrierte Lithiumionenbatterie)	a) 45.000 – 150.000 Stunden b) 18.750 – 75.000 Stunden (Lebensdauer der Batterie: 6.000 – 8.000 Ladezyklen)	300 – 830 (110 – 140 Euro/kW für zusätzlichen Akkusatz)	Leichte Abnahme
PV	25 – 40	1.121 – 1.167	800 – 1.080
Onshore Wind	20 – 25	1.120 – 1.167	830 – 1.000
Lithiumionenbatteriesystem	15 – 20	755 – 1.620	500 – 1.375
LT PEM FC (Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	15 – 20	1.400 – 1.900 (KWK) 210 – 530 (Backup)	1.200 – 1.600 (KWK) 190 – 410 (Backup)
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	15 – 20	1.200 – 1.300	1.100 – 1.200
AFC (Alkaline Fuel Cell)	15 – 20	2.000 – 3.000	2.000 – 3.000
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	15 – 20	> 3.000	> 2.500
AEL (Alkaline Electrolysis)	15 – 20	480 – 540	400 – 460
PEMEL (Proton Exchange Membrane Electrolysis)	15 – 20	640 – 720	580 – 640
SOEL (Solid Oxide Electrolysis)	15 – 20	1.500 – 1.660	1.360 – 1.500
AEMEL (Anion Exchange Membrane Electrolysis)	15 – 20	3.500 – 4.000	500 – 1.000

Annahmen zu Investitionskosten von Kompression und Speicherung

	Kompression	Speicherung	
	[Euro pro Kilogramm H ₂ pro Jahr]	[Euro pro Kilogramm H ₂ bzw. Euro pro Liter Diesel]	
	2021/2026	2021	2026
Diesel Genset	n/a	0,90 Euro pro Liter Diesel (7.500 Liter) 10 Euro pro Liter Diesel (100 Liter)	0,90 Euro pro Liter Diesel (7.500 Liter) 10 Euro pro Liter Diesel (100 Liter)
Diesel Genset Hybrid (+ integrierte Lithiumionenbatterie)	n/a	0,90 Euro pro Liter Diesel (7.500 Liter) 10 Euro pro Liter Diesel (100 Liter)	0,90 Euro pro Liter Diesel (7.500 Liter) 10 Euro pro Liter Diesel (100 Liter)
PV	n/a	n/a	n/a
Onshore Wind	n/a	n/a	n/a
Lithiumionenbatteriesystem	n/a	n/a	n/a
LT PEM FC (Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	n/a	n/a	n/a
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	n/a	n/a	n/a
AFC (Alkaline Fuel Cell)	n/a	n/a	n/a
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	n/a	n/a	n/a
AEL (Alkaline Electrolysis)	0,8 – 1,3	450 – 515 Euro pro kg H ₂	350 Euro pro kg H ₂
PEMEL (Proton Exchange Membrane Electrolysis)	0,8 – 1,3	450 – 515 Euro pro kg H ₂	350 Euro pro kg H ₂
SOEL (Solid Oxide Electrolysis)	0,8 – 1,3	450 – 515 Euro pro kg H ₂	350 Euro pro kg H ₂
AEMEL (Anion Exchange Membrane Electrolysis)	0,8 – 1,3	450 – 515 Euro pro kg H ₂	350 Euro pro kg H ₂