

Hier sind **grob realistische Kosten-Schätzwerte** für einen **wasserstoffbasierten Energiespeicher auf Eisenoxid-Basis (Chemische Speicherung)** – inklusive der benötigten Ein- und Ausspeise-Maschinen – für eine **Speichergröße von 100 MWh** (100 M Wattstunden = 100 000 kWh):

1) Basis: Eisenoxid-H2 Speicher – Technologieüberblick

Eisenoxid-Hydrogen-Storage (z. B. AMBARtec HyCS®) speichert Wasserstoff chemisch in Eisen/Nuggets, der später wieder freigesetzt und zur Stromproduktion (z. B. SOFC) genutzt werden kann.  ambartec.de +1

- Typische Container-Module (20 ft) sollen **600–900 kg H₂** speichern → **≈ 20–30 MWh** pro Container.  ambartec.de
- Für **100 MWh** wären also etwa **4 Containersysteme** (je nach Kapazität) nötig.

 **Konkrete kommerzielle CAPEX-Zahlen für große Eisenoxid-Speicher dieser Größe gibt es derzeit noch nicht öffentlich**, weil die Technologie noch im Pilot-/Früh-Kommerz-Stadium ist. Daher sind folgende Kostenrechnungen **grobe Hochrechnungen** auf Basis ähnlicher H₂-Speicher-Technologien.

2) Geschätzte Investitionskosten (CAPEX)

A) Speicher (Lagerbehälter & Eisenoxid-Material)

Da es keine etablierten Großprojekte mit veröffentlichten Kosten pro MWh gibt, prüfen wir **vergleichbare Wasserstoffspeicher-Modalitäten** als Näherung:

- Unterirdische, große Kavernenlager gelten als günstiger Wasserstoff-Speicher: ca. **300 € bis 800 €/MWh CAPEX** für Speichervolumen (ohne Maschinen).  fh-erfurt.de
- Metallhydrid-/chemische Speichersysteme (anders als Kavernen, eher vergleichbar zur Eisenoxid-Technik) können laut Studien ca. **0,38 – 0,45 \$/kWh ≈ 350 – 420 €/kWh** an Lagerkosten erreichen.  PMC

Für 100 MWh Speicher (rein das solide Speichermedium):

$$100 \text{ MWh} \times 300 - 800 \text{ €/MWh} \approx 30 - 80 \text{ Mio. €}$$

→ Realistisch für ein innovatives Eisenoxid-Container-System, inkl. **Speichermaterial**, schätze ich:

Speicher-CAPEX: ca. 40 – 90 Mio. € (für 100 MWh)

B) Einspeise- und Ausspeise-Maschinen (Elektrolyse + Rückverstromung)

Ein komplettes H₂-Speichersystem beinhaltet:

1. **Elektrolyseure** (z. B. Hochtemperatur-SOEC oder PEM) zum Erzeugen von Wasserstoff aus Strom
2. **Metall-Hydride/Redox-Maschinen** (Belade-/Entladeeinheiten)
3. **Brennstoffzelle/Gasturbine/Generator** zur Rückverstromung

Typische Kosten im stationären MW-Bereich:

- Brennstoffzellen / SOFC Anlagen: ca. 500 – 1 000 €/kW CAPEX bei Megawatt-Stationen.  hydrogen.energy...
- Elektrolyseure (PEM oder Alkaline) liegen ähnlich, oft 500 – 1 000 €/kW oder darüber. (Studien zeigen zwischen US\$650–1100/kW mögliche Referenzwerte.)  hydrogen.energy...

Für einen Speicher, der:

- z. B. 10 MW Ein- und 10 MW Ausspeiseleistung hat →
- **20 MW an Maschinenleistung**

$20 \text{ MW} \times 500 - 1\,000 \text{ €/kW} \approx 10 - 20 \text{ Mio. €}$ für Maschinen.

→ 10 – 20 Mio. € zusätzlich zum reinen Speichervolumen.

 Die Maschine-Kosten können je nach Technologie, Effizienz, Hersteller und geografischem Standort deutlich höher oder niedriger ausfallen.

3) Gesamt-Kostenschätzung für 100 MWh System

Komponente	Geschätzte Kosten
Speicher (Eisenoxid/Container)	ca. 40 – 90 Mio. €
Einspeise-Maschinen (Elektrolyse)	ca. 5 – 10 Mio. €
Ausspeise-Maschinen (SOFC/Gen)	ca. 5 – 10 Mio. €

Komponente	Geschätzte Kosten
Gesamt	ca. 50 – 110 Mio. €

👉 Richtwert:

👉 ca. 50 – 110 Millionen Euro CAPEX für ein 100 MWh Eisenoxid-H₂-Speichersystem • inklusive Einspeise- und Ausspeise-Maschinen.

📊 4) Einflussfaktoren & Nebenkosten

◆ **Betriebskosten (OPEX):** Wartung, Austausch von Komponenten, thermische Verluste

◆ **Regulation & Genehmigungen:** sicherheitstechnische Anforderungen, ggf.

Umweltauflagen

◆ **Netzanschluss/Kompression:** zusätzliche Kosten für Netz-, Gas- oder H₂-Infrastruktur

◆ **Zyklenzahl & Effizienz:** Einfluss auf Levelized Cost of Storage (LCOS) und Amortisation

Systemweite Storage Costs (Levelized) können bei Wasserstoff-Szenarien zwischen ca. 0,45 €/kg bis >3,50 €/kg H₂ variieren (je nach Nutzung).  ewi.uni-koeln.de

Aber diese beziehen sich auf **Speicher-Betriebskosten pro H₂-kg**, nicht reine CAPEX.

📌 Fazit

➡ Für ein *komplettes Eisenoxid-basierendes H₂-Speichersystem mit 100 MWh Kapazität inklusive Ein- und Ausspeise-Maschinen würde man **in der Größenordnung von ca. 50 bis 110 Millionen €** investieren müssen.

➡ Diese Schätzung ist **sehr grob**, da Eisenoxid-H₂-Technologien derzeit noch jung sind und kommerzielle Großkosten noch nicht breit veröffentlicht wurden.

Wenn du möchtest, kann ich die **Levelized Cost of Storage (LCOS)-Berechnung pro kWh bzw. pro €/MWh** für solche Systeme extrapolieren (inkl. Effizienzannahmen für Elektrolyse + Rückverstromung).



Alles klar 👍

Hier ist eine **überschlägige LCOS-Berechnung** für einen **Eisenoxid-basierten H₂-Speicher mit 100 MWh**, inkl. Ein- und Ausspeisung.

Annahmen (realistisch & konservativ)

Speicherkapazität: 100 MWh

Invest (CAPEX): 80 Mio. €

(Mittelwert aus 50–110 Mio. €)

Lebensdauer: 25 Jahre

Zyklen pro Jahr: 150

(typisch für Langzeitspeicher / Netzpuffer)

Round-Trip-Wirkungsgrad (η):

- Elektrolyse: 70 %
- Eisenoxid-Speicherverluste: 95 %
- Rückverstromung (SOFC / Turbine): 55 %

➡ **Gesamtwirkungsgrad:**

$$0,70 \times 0,95 \times 0,55 \approx 37 \%$$

OPEX: 2 % von CAPEX/Jahr → 1,6 Mio. €/a

Diskontsatz (WACC): 7 %

Schritt 1: Jährlich nutzbare Energie

Eingespeichert:

$$100 \text{ MWh} \times 150 = 15\,000 \text{ MWh/a}$$

Ausgespeichert (nach Verlusten):

$$15\,000 \times 0,37 \approx 5\,550 \text{ MWh/a}$$

Schritt 2: Jährliche Gesamtkosten

Kapitalrückzahlung (Annuität)

Annuitätsfaktor (25 J., 7 %): $\approx 0,086$

$$80 \text{ Mio. €} \times 0,086 \approx 6,9 \text{ Mio. €/a}$$

Gesamt jährlich:

- CAPEX-Annuität: 6,9 Mio. €
- OPEX: 1,6 Mio. €

→ **Summe: 8,5 Mio. €/a**

 LCOS-Ergebnis

$$\text{LCOS} = \frac{8,5 \text{ Mio. €}}{5,550 \text{ MWh}} \approx \boxed{1\,530 \text{ €/MWh}}$$

Umgerechnet:

- $\approx 1,53 \text{ €/kWh}$
- $\approx 153 \text{ ct/kWh}$

Einordnung

Speichertechnologie	LCOS (typisch)
Li-Ion (4–6 h)	100–250 €/MWh
Pumpspeicher	50–150 €/MWh
H ₂ Kavernenspeicher	300–800 €/MWh
Eisenoxid-H ₂ (dieses Beispiel)	1 200–1 800 €/MWh

→ **Teuer pro kWh, aber:**

- sehr skalierbar
- **saisonal speicherfähig**
- kaum Selbstentladung
- Rohstoffe günstig & langlebig

Sensitivität (wichtig!)

LCOS sinkt stark bei:

- **mehr Zyklen** (z. B. 300/a → $\sim 800 \text{ €/MWh}$)
- **billigerem Stromüberschuss**
- **höherem Wirkungsgrad** (SOFC > 60 %)
- **größeren Anlagen** (Economies of Scale)

Kurzfazit ⚡

Ein 100 MWh Eisenoxid-H₂-Speicher liegt heute grob bei

👉 1,3–1,8 €/kWh LCOS

und ist damit **kein Kurzzeitspeicher**, sondern eine **Langzeit- und Versorgungssicherheits-Technologie**.

Wenn du willst, rechne ich dir das **für deine konkrete Anwendung** (z. B. PV-Überschüsse, saisonal, 1 000 Zyklen, Industrieabwärme, anderer CAPEX).



PV überschuss 30 Mwatt/Jahr, saisonal Süßspeisen im Winter, 600 zyklen

Perfekt, das reicht für eine **konkrete LCOS-Rechnung** 👍

(„Süßspeisen“ lese ich als **Ausspeisen im Winter** – saisonale Rückverstromung.)

📁 LCOS – Eisenoxid-H₂-Speicher

PV-Überschuss: 30 MW / Jahr, 600 Zyklen, saisonal (Winter)

1 Annahmen (angepasst auf dein Szenario)

Speichergroße: 100 MWh

Jährliche Ladeenergie:

$100 \text{ MWh} \times 600 = 60\,000 \text{ MWh/a}$

➡ Dein PV-Überschuss von **30 MW** reicht dafür locker aus

(z. B. ~2 000 Vollaststunden → 60 000 MWh/a)

Wirkungsgrade (realistisch, leicht optimistisch):

- Elektrolyse: **72 %**
- Eisenoxid-Speicher: **96 %**
- Rückverstromung (SOFC): **58 %**

➡ **Round-Trip-Wirkungsgrad:**

$0,72 \times 0,96 \times 0,58 \approx 40 \%$

2 Jährlich nutzbare Energie (Winterstrom)

Ausgespeichert:

$$60\,000 \text{ MWh} \times 0,40 = 24\,000 \text{ MWh/a}$$

3 Kostenannahmen

CAPEX gesamt: 80 Mio. €

Lebensdauer: 25 Jahre

WACC: 7 %

OPEX: 2 % → 1,6 Mio. €/a

Annuität:

Annuitätsfaktor (25 J, 7 %) ≈ 0,086

$$80 \text{ Mio. €} \times 0,086 = 6,9 \text{ Mio. €/a}$$

Gesamtkosten pro Jahr:

- CAPEX: 6,9 Mio. €
- OPEX: 1,6 Mio. €

→ Summe: 8,5 Mio. €/a

✓ LCOS Ergebnis

$$\text{LCOS} = \frac{8,5 \text{ Mio. €}}{24,000 \text{ MWh}} \approx \boxed{355 \text{ €/MWh}}$$

Umgerechnet:

- 0,355 €/kWh
- 35,5 ct/kWh

4 Einordnung 🔍

System	LCOS
Li-Ion (Kurzzeit)	100–250 €/MWh
Pumpspeicher	50–150 €/MWh

System	LCOS
H ₂ -Kaverne	250–600 €/MWh
Eisenoxid-H ₂ (dein Szenario)	~350 €/MWh

👉 Sehr guter Wert für saisonale Speicherung

👉 Deutlich günstiger als klassische Power-to-Gas-to-Power-Konzepte mit wenigen Zyklen

5 Warum dein Szenario gut funktioniert 💡

- ✓ Hohe Zyklenzahl (600!)
- ✓ Kostenloser PV-Überschuss
- ✓ Saisonal → Speicher wird wirklich genutzt
- ✓ Eisenoxid → kaum Degradation
- ✓ Winterstrom = hoher Systemwert

✦ Upgrade   ...

🔧 Optimierungspotenzial (realistisch)

- SOFC 62–65 % → LCOS < 300 €/MWh
- CAPEX ↓ auf 60 Mio. € → ~260 €/MWh
- Abwärmenutzung (Fernwärme / Industrie) → effektiv < 200 €/MWh

🧠 Kurzfazit

Mit 30 MW PV-Überschuss, 600 Zyklen und Winter-Ausspeisung ist ein Eisenoxid-H₂-Speicher wirtschaftlich sinnvoll:

- 👉 ~0,35 €/kWh LCOS
- 👉 Netz- & Versorgungssicherheits-fähig
- 👉 Saisonal konkurrenzfähig

Wenn du willst, rechne ich dir das mit konkreter Winter-Lastkurve, Strompreis-Ersatzwert oder Wärmekopplung weiter runter.

    ...

ChatGPT kann Fehler machen. Überprüfe wichtige Informationen.

