LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND (LFS4)

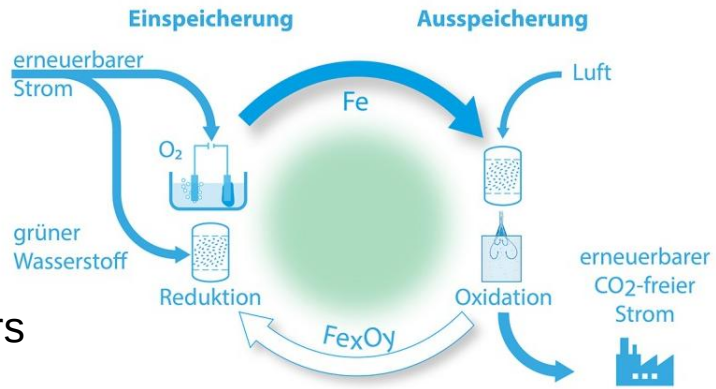
Vorstellung Vorabanalyse Eisen als Energiespeicher | 18.11.2025

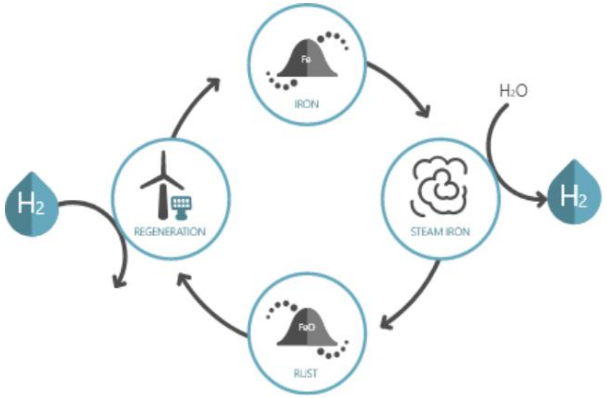
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Prozessübersicht: Dry Cycle & Wet Cycle

- Prozesse starten mit Reduktion von Eisenoxid (Fe_xO_y) mit grünem H_2 + O_2 zu Eisen (Fe)
- Oxidation
  - Dry Cycle: Oxidation von Fe mit O_2 (Verbrennung) zu Fe_xO_y
    - Umrüstung von Kohlekraftwerken zur Verbrennung von Fe möglich
    - Reaktionstemperatur abhängig von Partikelgröße (laufende Forschung)
  - Wet Cyle (Steam-Iron Process): Oxidation mit Wasserdampf
    - Verringerung der Reaktionstemperatur möglich bei Nutzung eines Katalysators
      - HyIron (Namibia): ~ 150 ˚C + Verwendung eines patentierten Katalysators
- Anzahl der Zyklen, über die Eisenoxid seine Redoxaktivität behält, wird noch erforscht, min. jedoch 20 Zyklen

Dry Cycle [1]

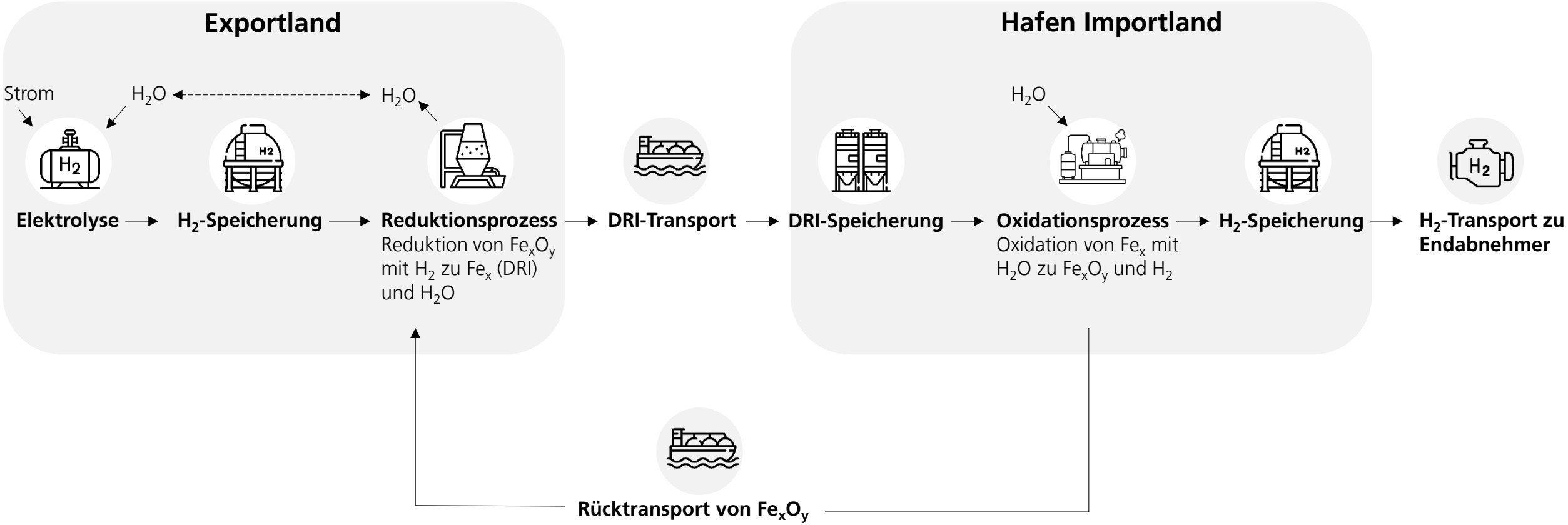




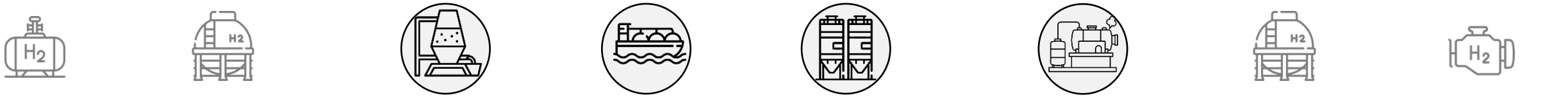
Wet Cycle [2]

[1] TU Darmstadt (2021): https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles_meldungen/archiv_2/2021/2021quartal1/news_archiv_de_296448.de.jsp
[2] Team Solid (2024): https://www.teamsolid.org/technology/
[3] Heiniger et al (2024): Safe seasonal energy and hydrogen storage in a 1:10 single-household-sized pilot reactor based on the steam-iron process
[4] DNV (2024): Securing Green Hydrogen for the German Power Sector – Technology readiness & techno-economic feasibility study for three hydrogen value chains

Prozesskette Wet Cycle mit Import von DRI



Prozesskette Wet Cycle mit Import von DRI



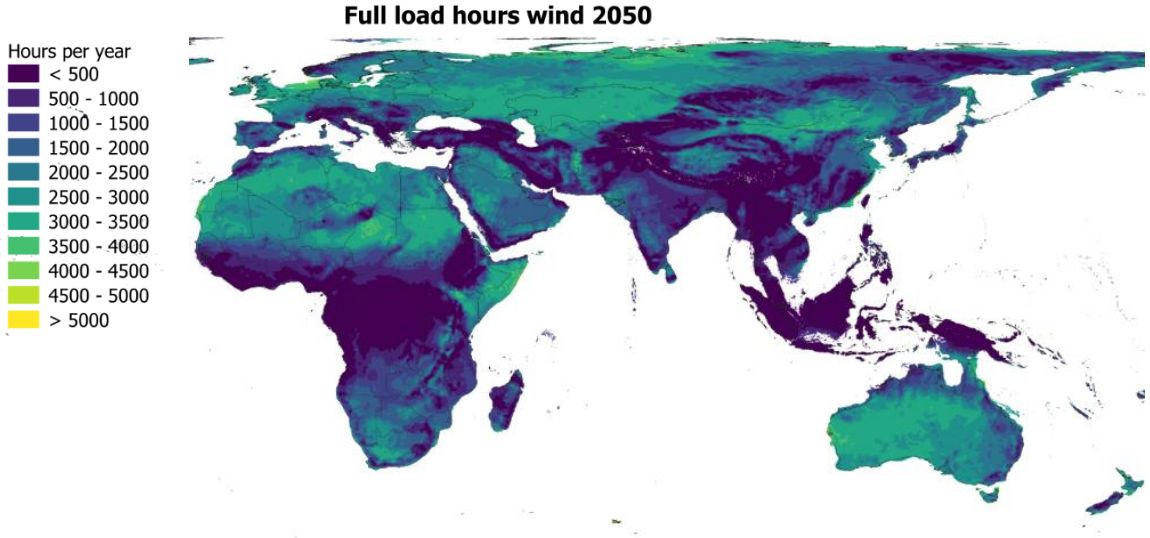
Elektrolyse → H_2-Speicherung → **Reduktionsprozess** → **DRI-Transport** → **DRI-Speicherung** → **Oxidationsprozess** → H_2-Speicherung → H_2-Transport zu Endabnehmer

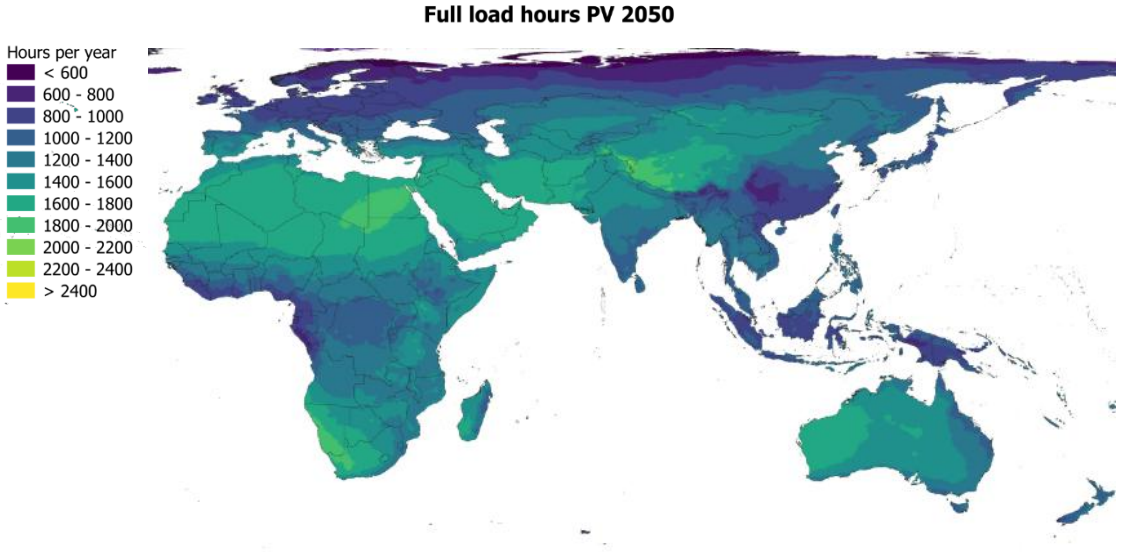
Wirkungsgrade DNV [4]	**59,1%**	**98,0%**	**100,0%**	**93,7%**
Annahmen Fraunhofer ISI	**80,0%**	**98,0%**	**100,0%**	**93,7%**

[4] DNV (2024): Securing Green Hydrogen for the German Power Sector – Technology readiness & techno-economic feasibility study for three hydrogen value chains

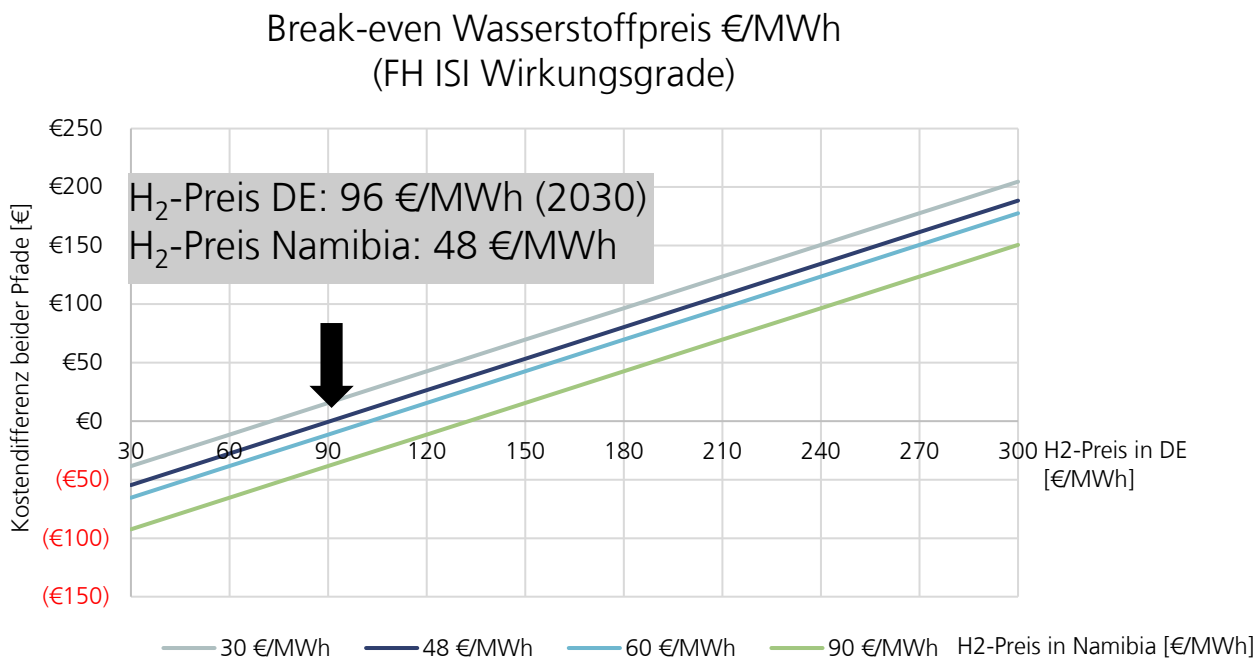
Geringe Flexibilität von Reduktions- & Oxidations-Anlagen führt zu zusätzlichem Bedarf an H2-Speichern

- DRI-Schachtofen ist kontinuierlicher Prozess (vergleichbar zum Hochofen)
  - Trotz hoher Wind-& PV-Potenziale in Namibia H2-Speicher bei DRI-Anlage nötig, um kontinuierlichen Prozess sicherzustellen
- Auch Oxidation ist kontinuierlicher Prozess, somit auch H2-Speicherbedarf nach Oxidation (DRI-Rückumwandlung)





Break-even Analyse: H_2-Preis in Namibia für Wet Cycle vs. heimische H_2-Erzeugung, Speicherung & Transport – 2030 FH ISI Wirkungsgrade



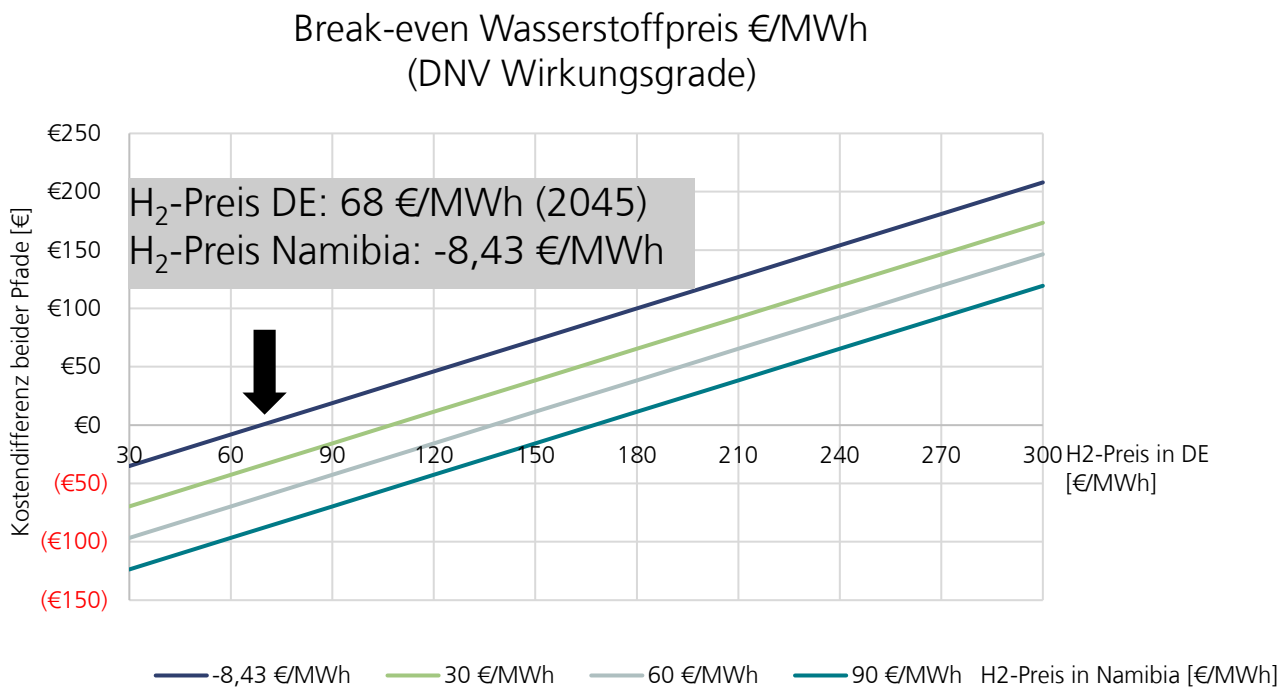
- Kostenvergleichsrechnung zweier Prozessketten für 2030:
  - Pfad 1: Inländische Wasserstofferzeugung, Speicherung und Transport zum Endabnehmer über Wasserstoffkernnetz
  - Pfad 2: DRI-Produktion in Namibia, Transport nach Deutschland, DRI-Rückumwandlung mit FH-ISI Annahmen
- Bei gegebenem Wasserstoffpreis von 96€/MWh (2030) in Deutschland muss Wasserstoff in Namibia 48€/MWh kosten, um Kostengleichheit beider Prozessketten sicherzustellen

FH ISI Annahmen Wirkungsgrade	
Reduktionsprozess	80%
DRI-Transport	98%
DRI-Speicherung	100%
Oxidationsprozess	93,7%

Kostenparameter DRI-Route (€/kWh)	
Reduktion	0,026
DRI-Transport	0,017
DRI-Speicherung	0,013

Kostenparameter heimische H2-Speicherung in Salzkavernenspeichern & Transport (€/kWh)	
H2-Speicherung	0,022
H2-Transport	0,03

Break-even Analyse: H_2-Preis in Namibia für Wet Cycle vs. heimische H_2-Erzeugung, Speicherung & Transport – 2030 DNV Wirkungsgrade



- Kostenvergleichsrechnung zweier Prozessketten für 2030:
  - Pfad 1: Inländische Wasserstofferzeugung, Speicherung und Transport zum Endabnehmer über Wasserstoffkernnetz
  - Pfad 2: DRI-Produktion in Namibia, Transport nach Deutschland, DRI-Rückumwandlung mit DNV-Annahmen
- Bei gegebenem Wasserstoffpreis von 96€/MWh (2030) in Deutschland muss Wasserstoff in Namibia -8,43 €/MWh kosten, um Kostengleichheit beider Prozessketten sicherzustellen

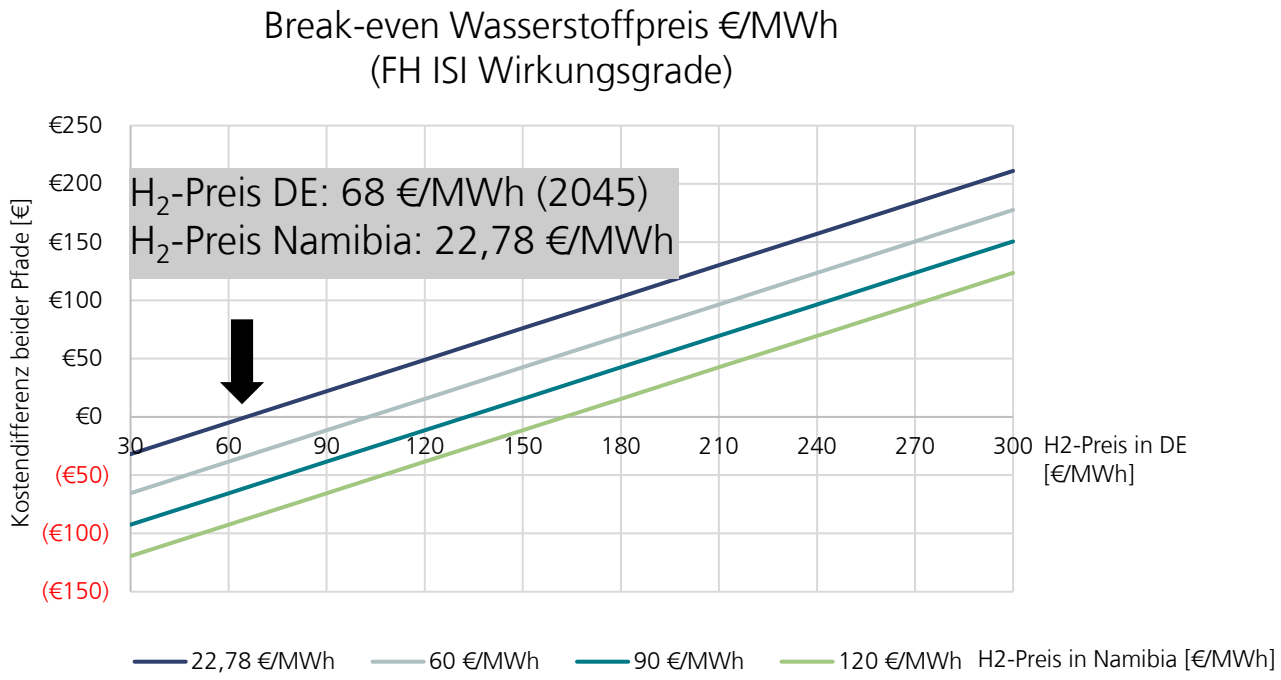
DNV Annahmen Wirkungsgrade [4]	
Reduktionsprozess	59,1%
DRI-Transport	98%
DRI-Speicherung	100%
Oxidationsprozess	93,7%

Kostenparameter DRI-Route (€/kWh)	
Reduktion	0,026
DRI-Transport	0,017
DRI-Speicherung	0,013

Kostenparameter heimische H2-Speicherung in Salzkavernenspeichern & Transport (€/kWh)	
H2-Speicherung	0,022
H2-Transport	0,03

[4] DNV (2024): Securing Green Hydrogen for the German Power Sector – Technology readiness & techno-economic feasibility study for three hydrogen value chains

Break-even Analyse: H_2-Preis in Namibia für Wet Cycle vs. heimische H_2-Erzeugung, Speicherung & Transport – 2045 FH ISI Wirkungsgrade



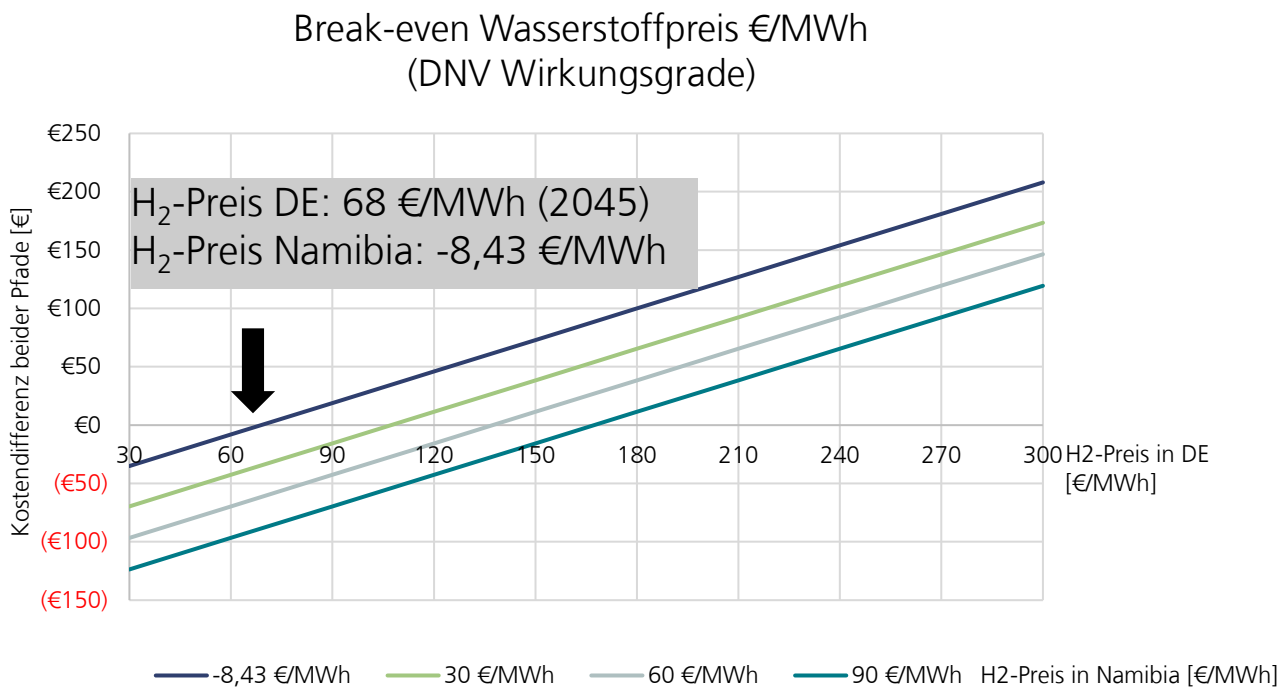
- Kostenvergleichsrechnung zweier Prozessketten für 2045:
  - Pfad 1: Inländische Wasserstofferzeugung, Speicherung und Transport zum Endabnehmer über Wasserstoffkernnetz
  - Pfad 2: DRI-Produktion in Namibia, Transport nach Deutschland, DRI-Rückumwandlung mit FH ISI-Annahmen
- Bei gegebenem Wasserstoffpreis von 68€/MWh (2030) in Deutschland muss Wasserstoff in Namibia 22,78 €/MWh kosten, um Kostengleichheit beider Prozessketten sicherzustellen

FH ISI Annahmen Wirkungsgrade	
Reduktionsprozess	80%
DRI-Transport	98%
DRI-Speicherung	100%
Oxidationsprozess	93,7%

Kostenparameter DRI-Route (€/kWh)	
Reduktion	0,026
DRI-Transport	0,017
DRI-Speicherung	0,013

Kostenparameter heimische H2-Speicherung in Salzkavernenspeichern & Transport (€/kWh)	
H2-Speicherung	0,022
H2-Transport	0,03

Break-even Analyse: H_2-Preis in Namibia für Wet Cycle vs. heimische H_2-Erzeugung, Speicherung & Transport – 2045 DNV Wirkungsgrade



- Kostenvergleichsrechnung zweier Prozessketten für 2045:
  - Pfad 1: Inländische Wasserstofferzeugung, Speicherung und Transport zum Endabnehmer über Wasserstoffkernnetz
  - Pfad 2: DRI-Produktion in Namibia, Transport nach Deutschland, DRI-Rückumwandlung mit DNV-Annahmen
- Bei gegebenem Wasserstoffpreis von 68€/MWh (2030) in Deutschland muss Wasserstoff in Namibia 22,78 €/MWh kosten, um Kostengleichheit beider Prozessketten sicherzustellen

DNV Annahmen Wirkungsgrade [4]	
Reduktionsprozess	59,1%
DRI-Transport	98%
DRI-Speicherung	100%
Oxidationsprozess	93,7%

Kostenparameter DRI-Route (€/kWh)	
Reduktion	0,026
DRI-Transport	0,017
DRI-Speicherung	0,013

Kostenparameter heimische H2-Speicherung in Salzkavernenspeichern & Transport (€/kWh)	
H2-Speicherung	0,022
H2-Transport	0,03

[4] DNV (2024): Securing Green Hydrogen for the German Power Sector – Technology readiness & techno-economic feasibility study for three hydrogen value chains

Erforderlichen Eisenmengen zur Substitution von 80 TWh-H_2-Speicherbedarf

H_2-Speicherbedarf in 2045 (O45-Strom): 80 TWh

Option 1: 80 TWh über DRI-Importe gedeckt

- Benötigte **Eisenmenge: 38,88 Mt** vs. 37,23 Mt Rohstahlerzeugung in DE (2024)
- Annahme: Schiffskapazität 64.000 t & Schiffsweg 26 Tage (Namibia-Deutschland): **~43 benötigte Frachter**

Option 2: 80 TWh über Ammoniak-Importe gedeckt

- Benötigte **Ammoniakmenge: 15,38 Mt**
- Annahme: Schiffskapazität 51.800 t NH_3 & Schiffsweg 26 Tage (Namibia-Deutschland): **~21 benötigte Frachter**

[4] DNV (2024): Securing Green Hydrogen for the German Power Sector – Technology readiness & techno-economic feasibility study for three hydrogen value chains
[5] WV Stahl (2025): https://www.wvstahl.de/pressemitteilungen/rohstahlproduktion-in-deutschland-auch-2024-endet-auf-rezessionsniveau/

Schlussfolgerung

- Dry-Cycle weist höhere Effizienz als Wet-Cycle auf, allerdings geringere Datenlage
- Wet-Cycle aufgrund vieler Wertschöpfungsschritte ineffizienter und teurer im Vergleich zur inländischen H_2-Erzeugung, Speicherung und Transport
  - H_2-Speicher kann durch Wet-Cycle nicht ersetzt werden: Bedarf von H_2-Speichern an DRI-Anlage und Oxidations-Anlage, um kontinuierlichen Prozess sicherzustellen
  - Niedriger H_2-Preis in Exportland erforderlich (bspw. 48€/MWh in Namibia bei 96€/MWh H2-Preis in DE (2030) – „Positives Beispiel“ mit FH ISI Wirkungsgraden)
  - Erhebliche Mengen von DRI nötig, um H_2-Speicherkapazitäten auszugleichen
- Geringe Flexibilität von DRI-Anlagen und Oxidationsanlagen erschwert Wirtschaftlichkeit beider Zyklen
- Fazit: Aktuell ist nicht ersichtlich, wie diese Technologie die Energiewende bis 2045 günstiger gestalten könnte. Deshalb empfehlen wir aktuell keine Berücksichtigung in der nächsten Szenariorunde