DER GLOBALE KOHLEATLAS: UMWANDLUNG DER WELTWEITEN KOHLEKRAFTWERKE IN WÄRMESPEICHERKRAFTWERKE

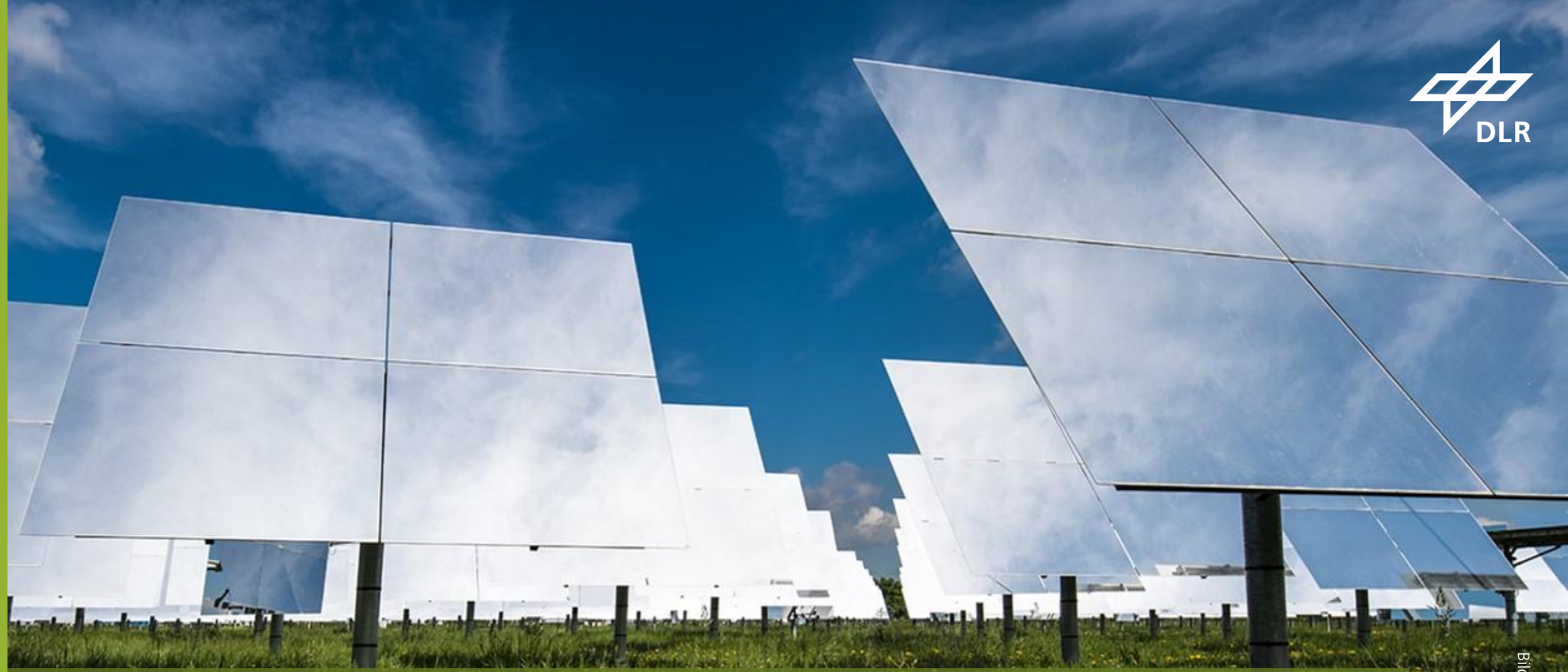
58. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, 07.10.2026

Stefano Giuliano, Javier Iñigo-Labairu, Yoga Rahmat, Karl-Kiên Cao, María Isabel Roldán Serrano, Judith Jäger, Ralph-Uwe Dietrich, Prof. Dr. Uwe Riedel, Prof. Dr. Robert-Pitz-Paal und Prof. Dr. André D. Thess

DLR

Gliederung

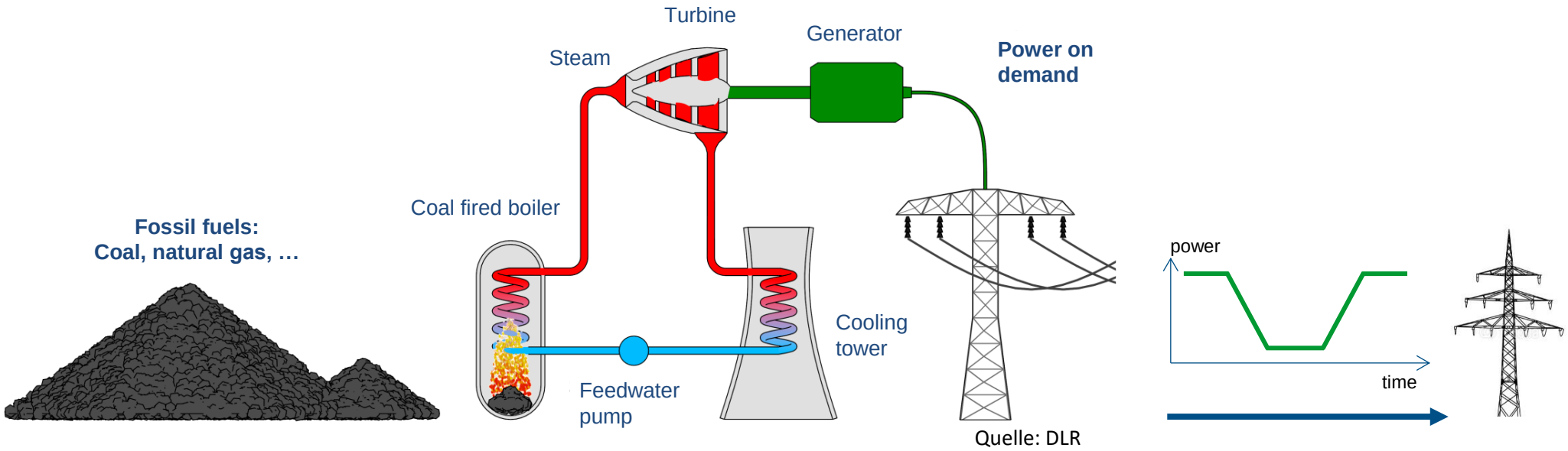
- Überblick
    - Was sind Wärmespeicherkraftwerke/ Was ist eine Carnot-Batterie?
    - Überblick Projekt „Der globale Kohleatlas“
- WSK-Konzepte
- Techno-ökonomische Analyse des Referenzkraftwerks Angamos in Chile
- Techno-ökonomische Analyse der weltweiten Kohlekraftwerke
- Zusammenfassung



ÜBERBLICK

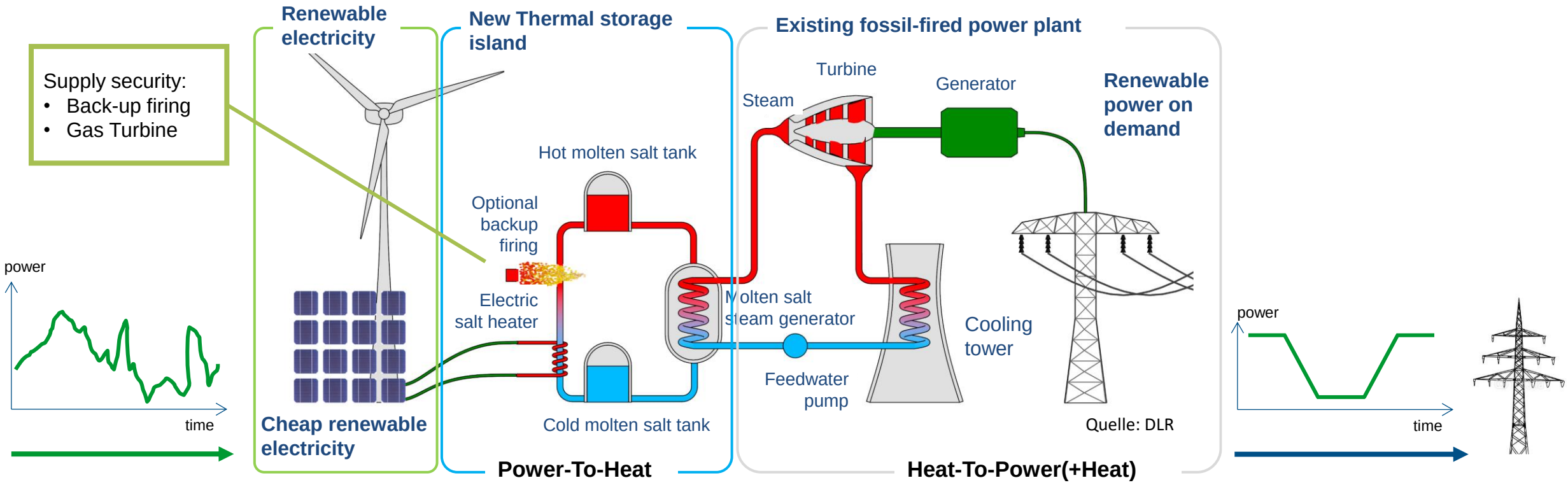
Bildquelle hier angeben

Was ist ein Wärmespeicherkraftwerk (WSK)/ Carnot Batterie?
Ausgangspunkt: Fossil befeuertes Kohlekraftwerk



Das ist ein WSK / Carnot Battery!

Dampfkraftwerk + Power-To-Heat + Speicher
→ Weiterentwicklung: Erneuerbares, grundlastfähiges Kraftwerk



Fluctuating renewable power generation from solar, wind etc.

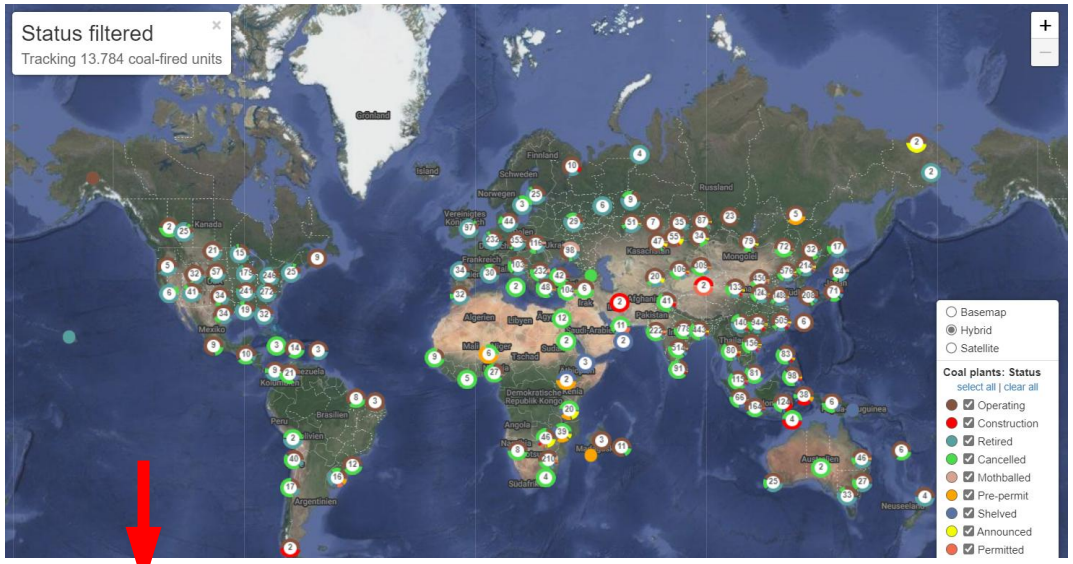
Fluctuating renewable power is stored in thermal energy storage

Renewable power on demand (depending on storage size)

Combined Heat & Power:
- Heat
- Process Heat

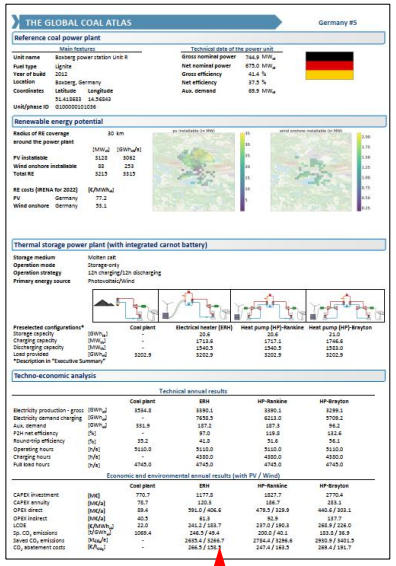
Das Projekt „Der globale Kohleatlas“
Methodik im Überblick

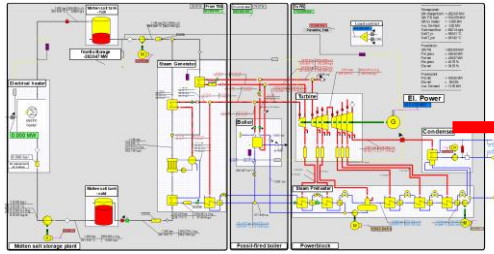
Coal-fired Power Plant Database



Source: https://globalenergymonitor.org/

Fact sheet





Ebsilon models for reference power plants

greenius
THE GREEN ENERGY SYSTEM ANALYSIS TOOL

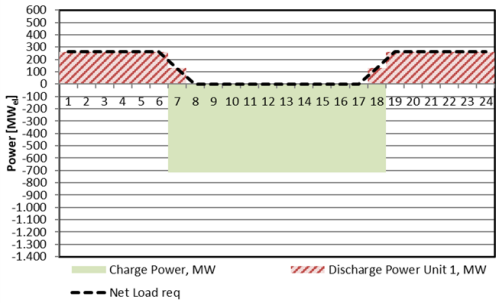
Greenius models for each coal-fired power plant

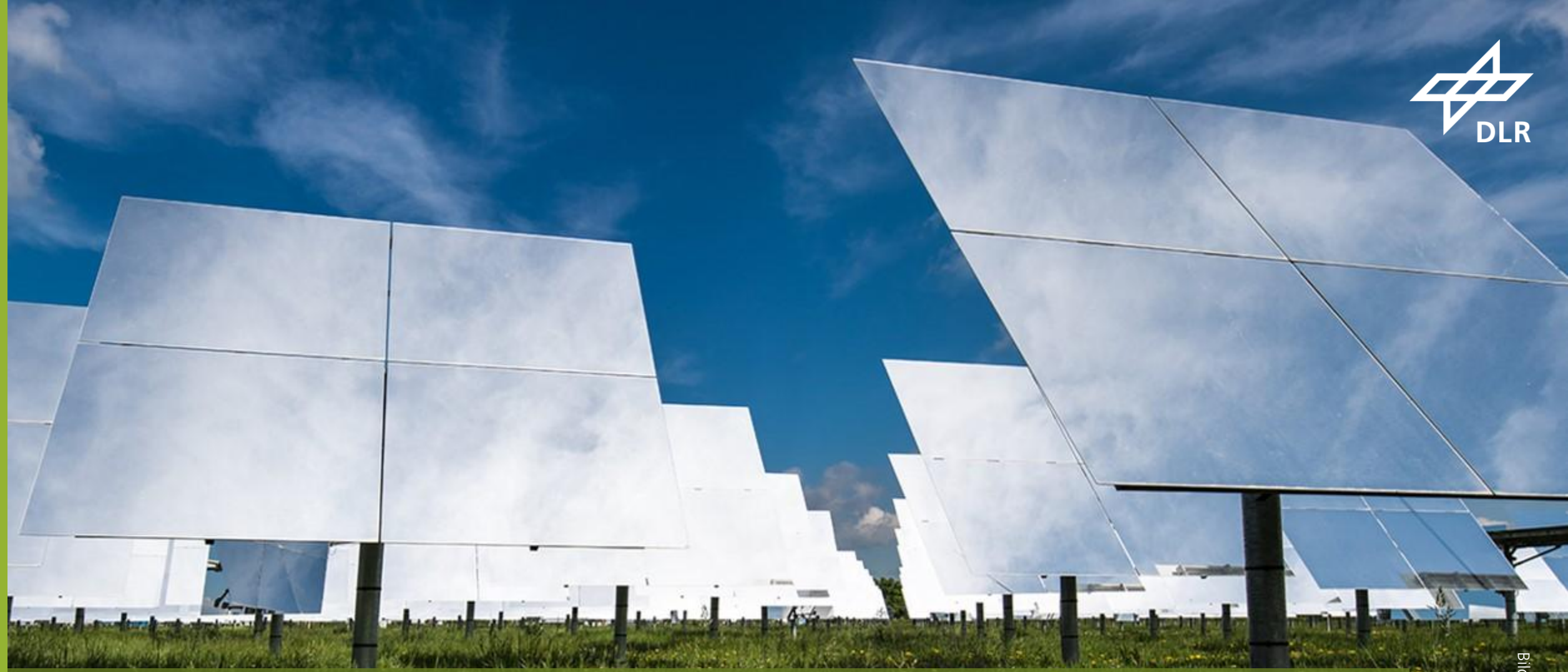
TEPET
Standardizing economic process evaluations

Economic and ecological analysis

Level 0 – weltweit:

- Betriebsweise mit Tagesprofil
- 12-h Beladen/ 12-h Entladen
- Wiederholung 365x im Jahr





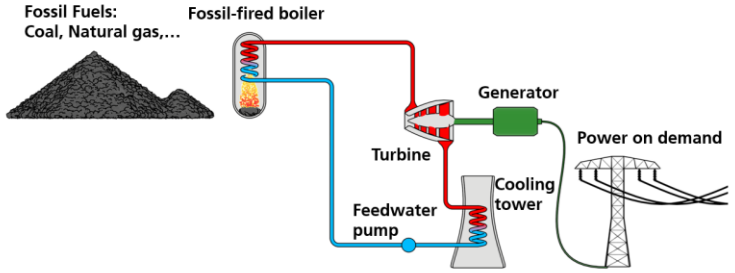
WSK-KONZEPTE

Bildquelle hier angeben

WSK-Konzepte

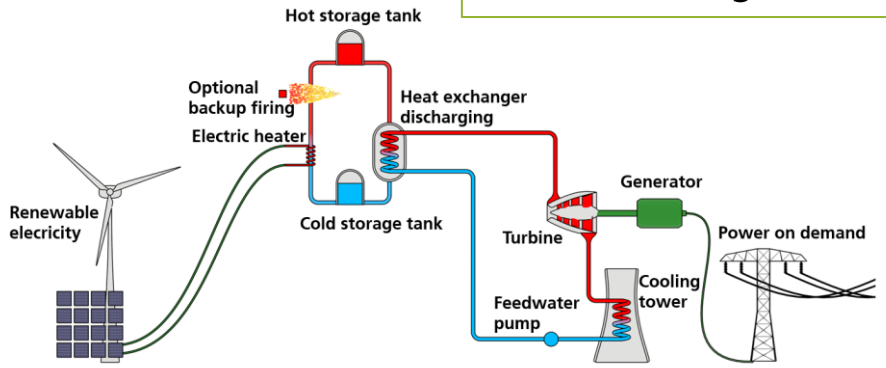
Bestandskraftwerk

Coal Plant

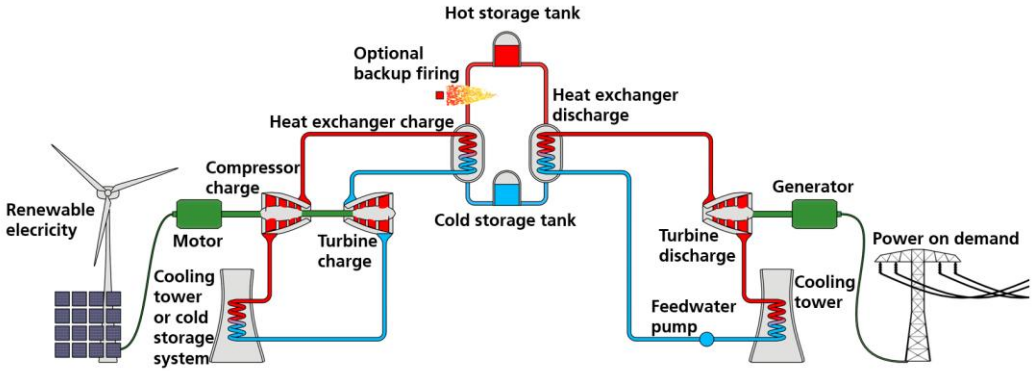


ERH [A], [B]

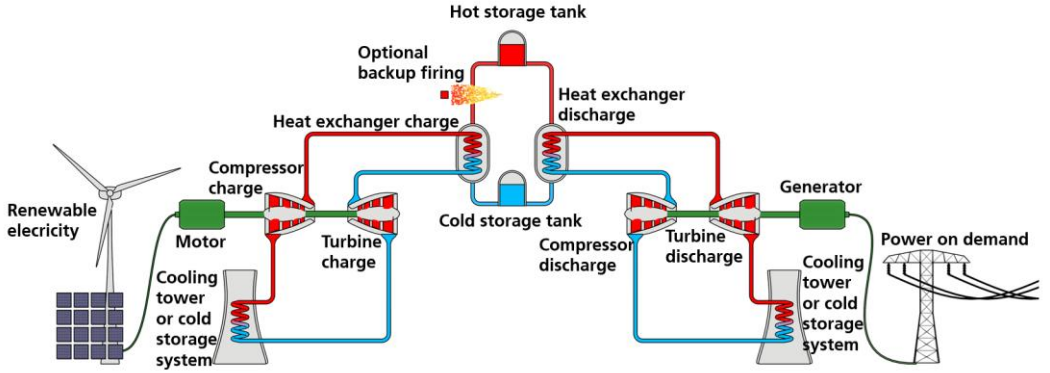
[A] E-Heizer + Bestandskraftwerk
[B] E-Heizer + Neu Rankine-Kraftwerk (grüne Wiese)



HP-Rankine [C]

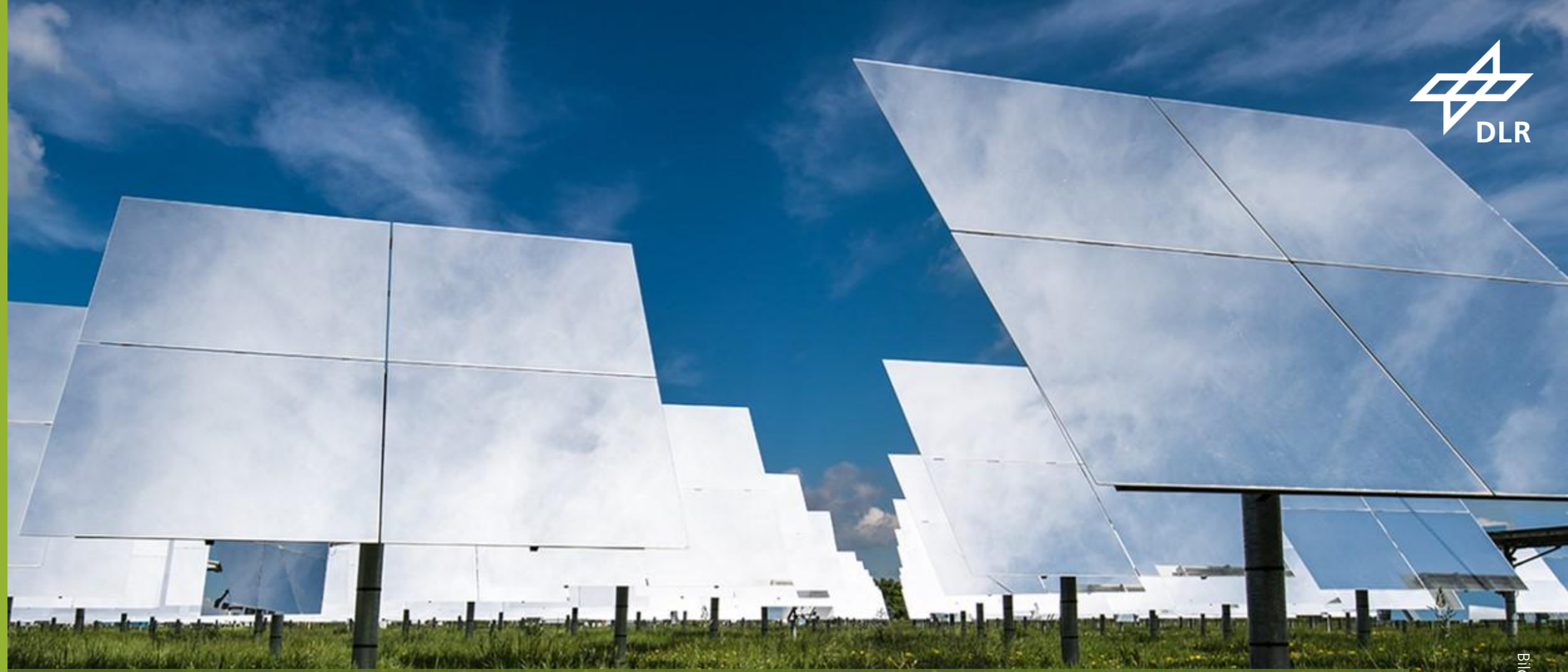


HP-Brayton [D]



[C] HT-WP + Bestandskraftwerk

[D] HT-WP + Neu Brayton-Kraftwerk



TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE DES REFERENZKRAFTWERKS ANGAMOS IN CHILE

Bildquelle hier angeben

Stefano Giuliano, Prof. Dr. André D. Thess et. al., 07.10.2026

Referenzkraftwerk Angamos in Chile



GIZ Chile Studie: M. Geyer, F. Trieb, and S. Giuliano. “Repurposing of existing coal-fired power plants into thermal storage plants for renewable power in chile, executive summary, pn: 69.3020.0-001.00 Decarbonization of the Chilean energy sector.” 2020

- Umrüstung Block U1 vom Kohlekraftwerk Angamos mit Wärmespeichersystem auf Basis von Flüssigsalztechnologie und Power-To-Heat .
- Stilllegung oder Retrofit/ Ersatz des Kessels

- Daten:
  - Sandort: Mejillones, Antofagasta Region, Chile
  - Inbetriebnahme: 2011
  - Eigentümer: AES Andes SA
  - Brennstoff: Coal
  - Leistung PB Power : ~270-MW_e
  - Frsichdampftemperatur : 565°C

Referenzkraftwerk Angamos in Chile
Beispiel für Konzept ERH [A]

All you need is …. this:



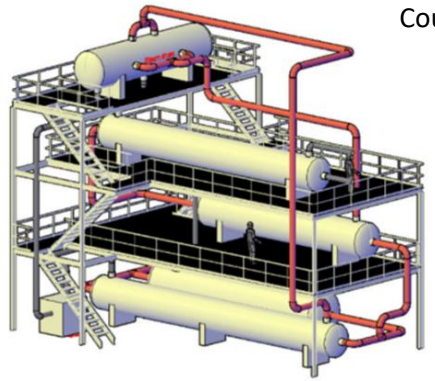
Courtesy: Volcanic S.A.

**Electric heaters for charging molten salts -
fired by PV/wind power**



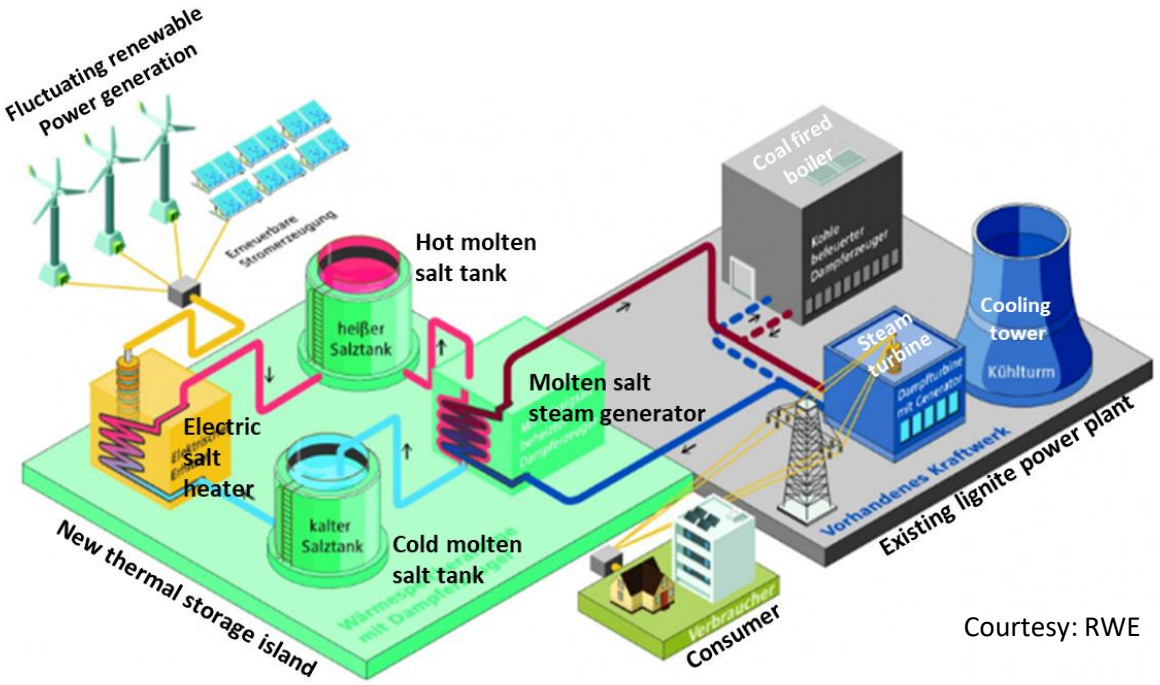
Courtesy: Abengoa S.A.

**Molten salt tanks
– hot and cold**



Courtesy: Aalborg CSP

**Molten salt
steam generators
for discharging**

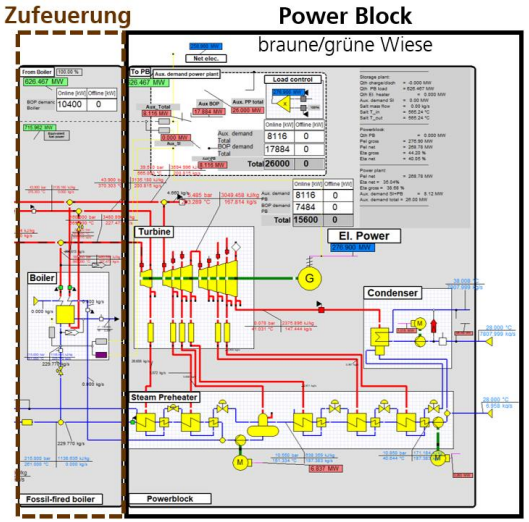


Courtesy: RWE

W. Arnold, S. Giuliano, G. Koll, et.al., Public final report – StoreToPower Project - Phase 1 "Stromspeicherung in Hochtemperatur-Wärmespeicherkraftwerken" (2022).

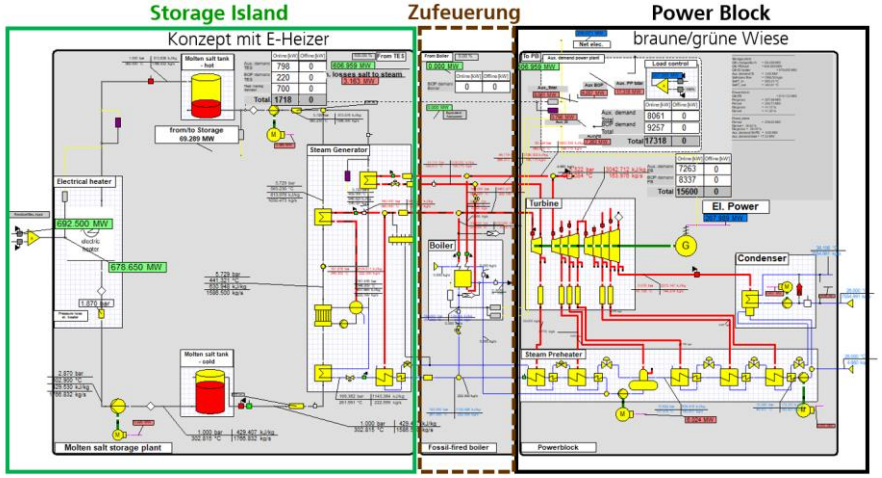
Techno-ökonomische Analyse des Referenzkraftwerks
Überblick der Ebsilon Modelle

Bestandskraftwerk Angamos, Chile (~270 MW_{el})



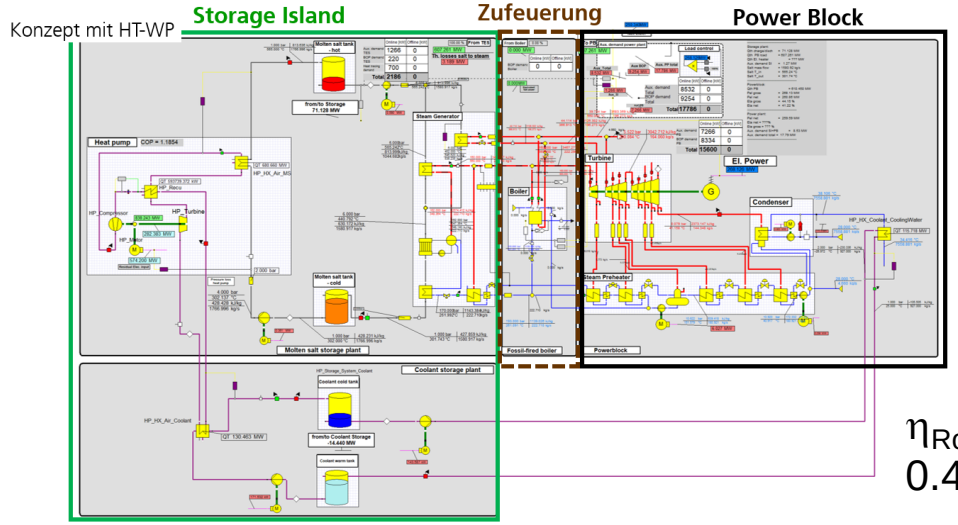
[A] E-Heizer + Bestandskraftwerk

[B] E-Heizer + Neubau Rankine-Kraftwerk (grüne Wiese)



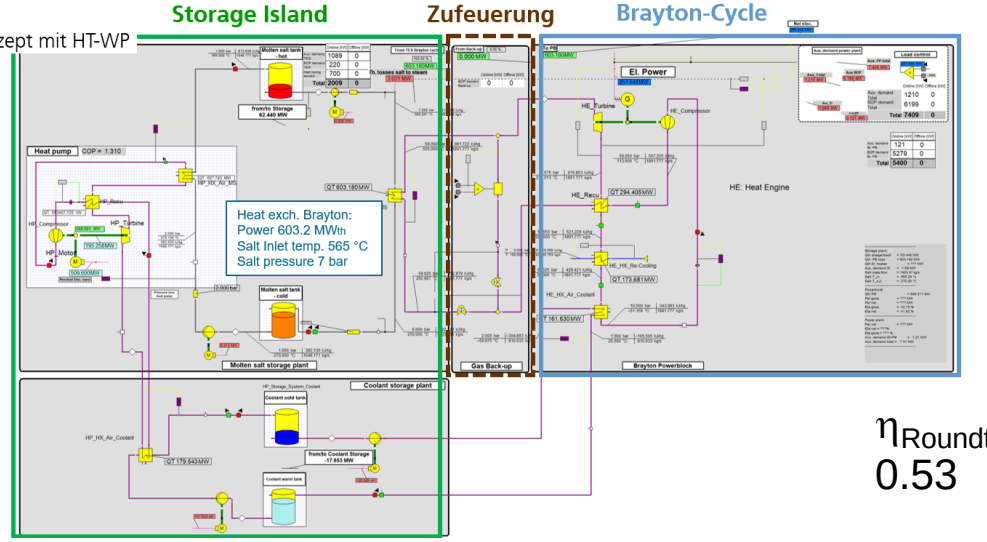
$\eta_{Roundtrip}$: 0.39

[C] HT-WP + Bestandskraftwerk



$\eta_{Roundtrip}$: 0.47

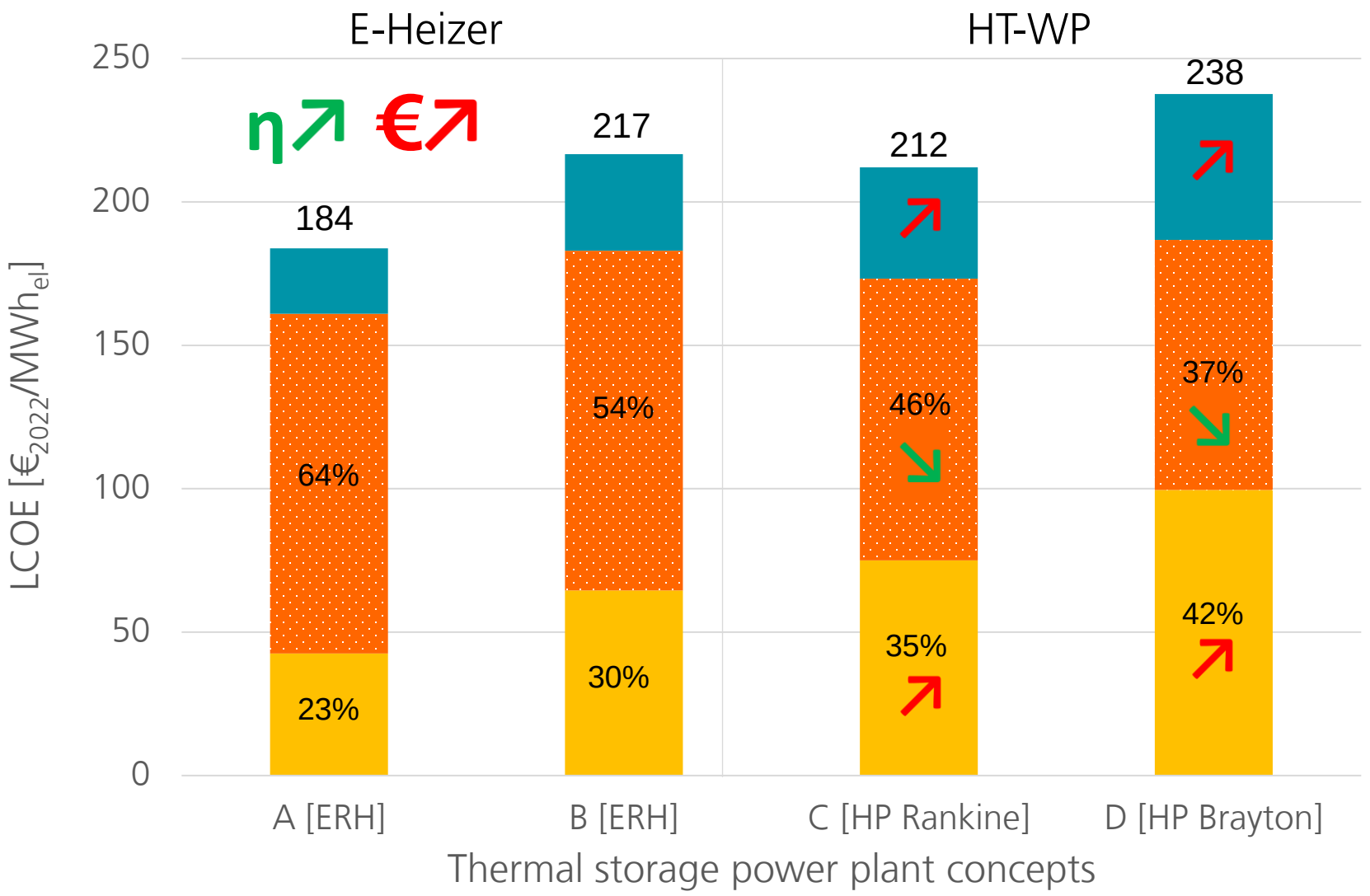
[D] HT-WP + Neubau Brayton-Kraftwerk



$\eta_{Roundtrip}$: 0.53

Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke (Level 0)

LCOE mit IRENA Input-Daten[1]



LCOE PV Global
IRENA[1]
International Renewable Energy Agency
46.5 €2022/MWhel

Nur Strom, keine Wärme

Nur Arbitrage!

Kein Mehrerlös durch Regelenergie, usw.

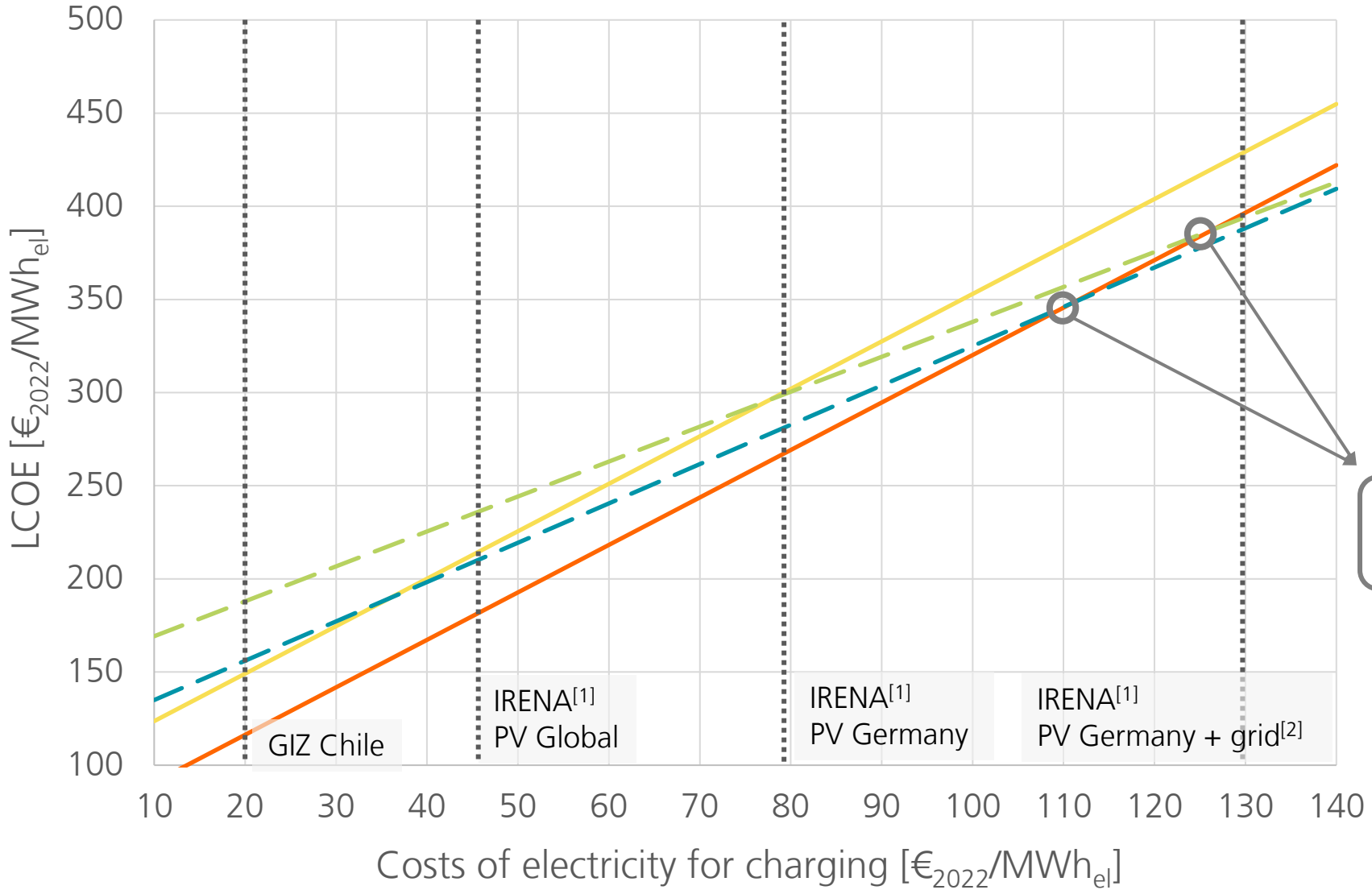
CAPEX mit Basisjahr 2022 (wegen Inflation relativ teuer im Vergleich zum Basisjahr 2019)

- CEPCI Index
  607.5 (2019) → 816 (2022)
- €/$-Wechselkurs
  0.89 (2019) → 0.95 (2022)

[1] IRENA (2023) *Renewable power generation costs in 2022*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke (Level 0)

Sensitivitätsanalyse mit variierten Eingangsstromkosten



A
B
C
D

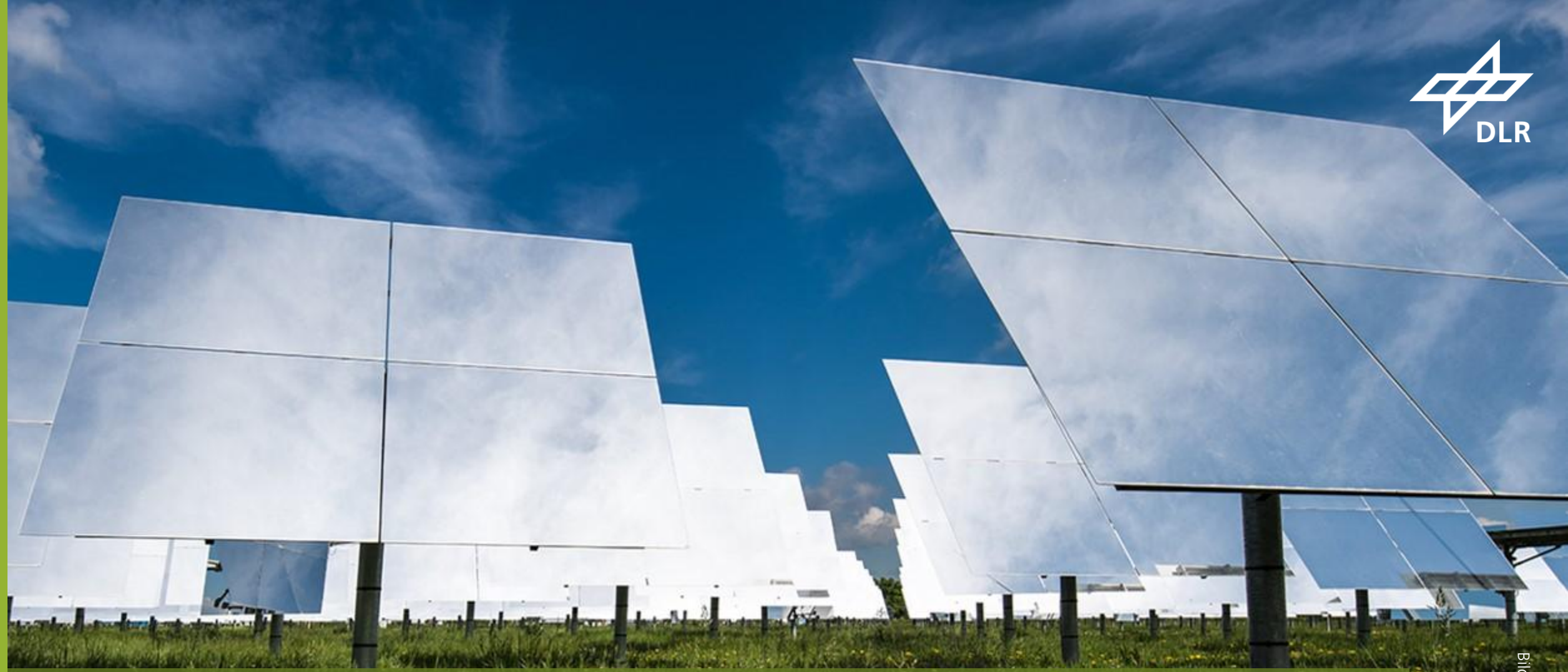
E-Heizer

HT-WP

HT-WP Konzepte werden bei höheren Stromkosten bevorzugt

> 110 €2022/MWhel → Case C
> 125 €2022/MWhel → Case D

[1] IRENA (2023) *Renewable power generation costs in 2022*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
[2] Netztransparenz.de



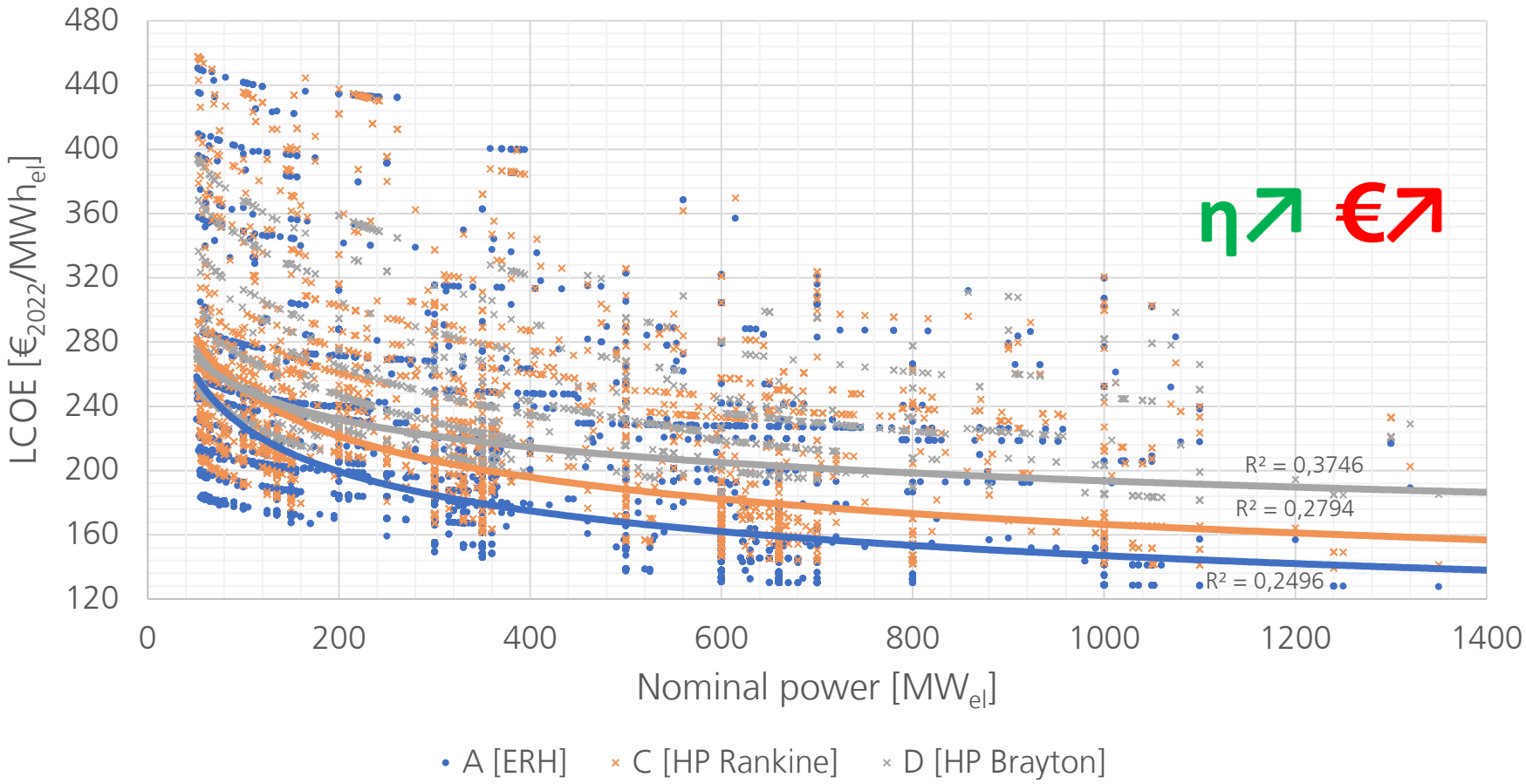
TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE DER WELTWEITEN KOHLEKRAFTWERKE

Bildquelle hier angeben

Stefano Giuliano, Prof. Dr. André D. Thess et. al., 07.10.2026

Techno-ökonomische Analyse der weltweiten Kohlekraftwerke (Level 0)

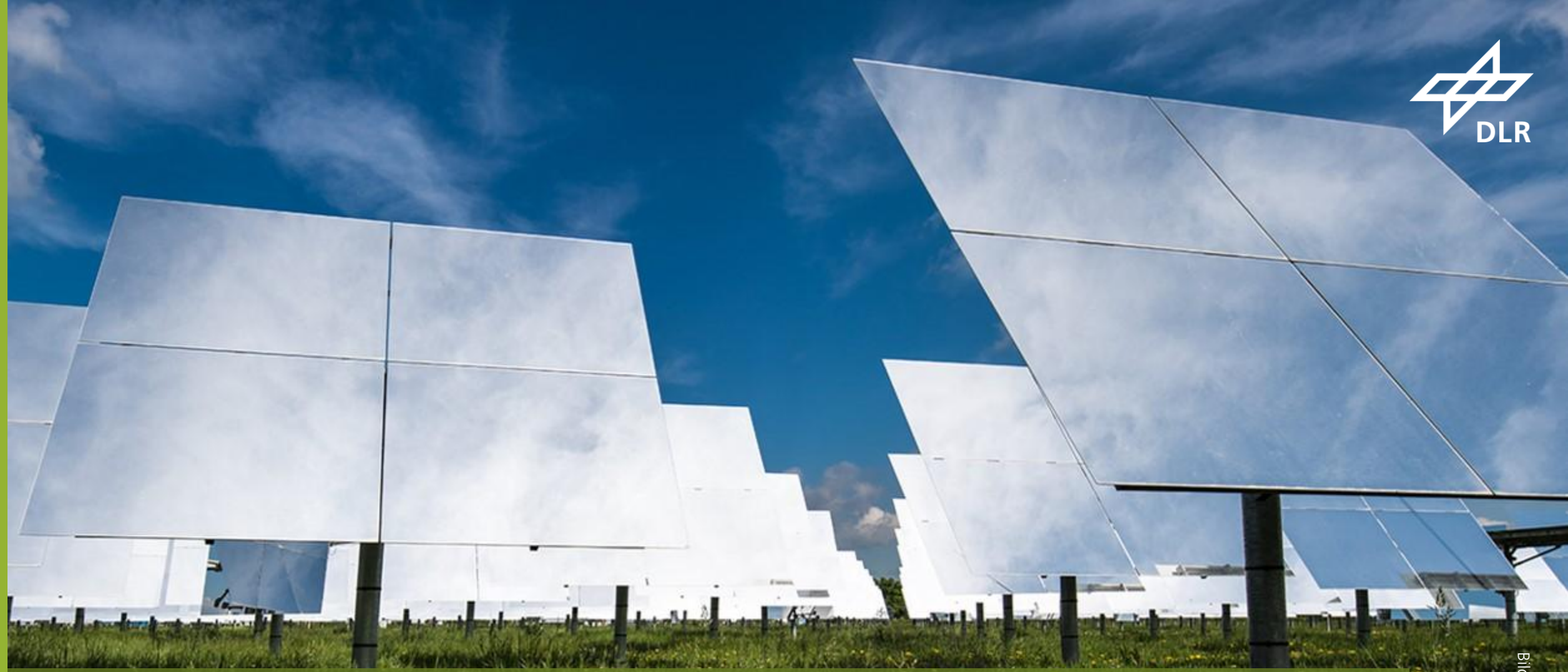
Ökonomische Ergebnisse von 6570 Kohlekraftwerken



LCOE PV
IRENA[1]
International Renewable Energy Agency
Country-specific
(otherwise, global avg.)

- LCOE-Spanne: **120-460 €$_{2022}$/MWh$_{el}$**

[1] IRENA (2023) *Renewable power generation costs in 2022*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

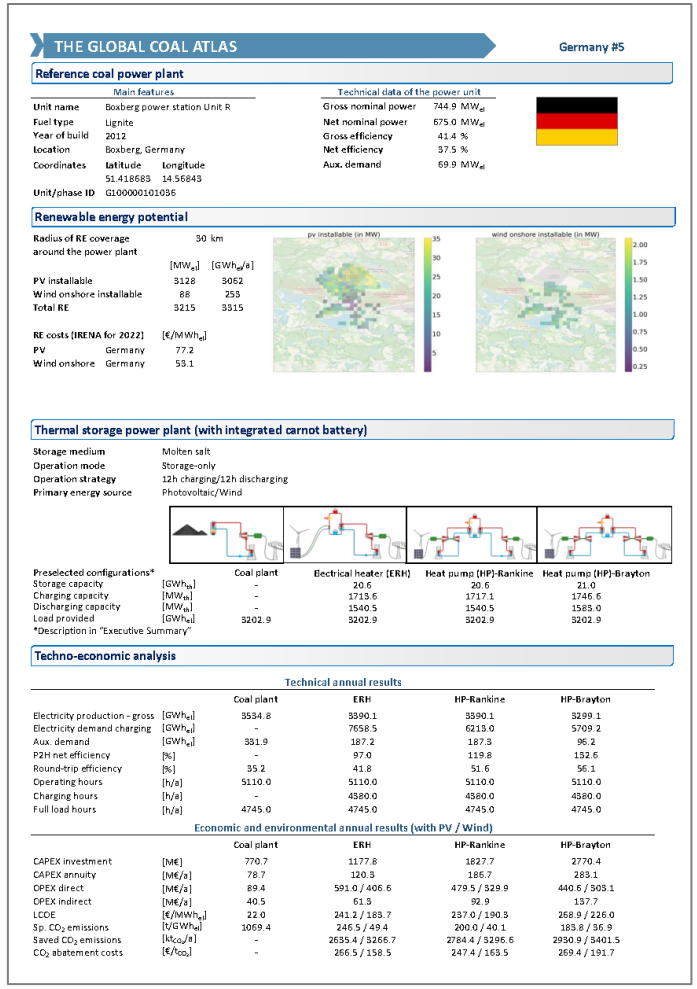


ZUSAMMENFASSUNG

Bildquelle hier angeben

Zusammenfassung „der globale Kohleatlas“

- Kohleausstieg hat hohen Transformationsaufwand für Stilllegung bestehender Kohlekraftwerke: Ihr Ersatz durch erneuerbare Energien erfordert hohe Neuinvestitionen in neue Kraftwerke und Speicher .
- Das Projekt „Der globale Kohleatlas“ hat die Umwandlung bestehender Kohlekraftwerke in Wärmespeicherkraftwerke (WSK)/ Carnot Batterien als alternative Dekarbonisierungsstrategie untersucht.
- Untersuchung verschiedener Umrüstungsoptionen: mit Elektroheizer, Hochtemperatur-Wärmepumpe sowie Rankine- und Brayton-Kreisläufen.
- Referenzkraftwerk Angamos (Chile): 140–220 €/t CO_2-Vermeidungskosten.
- Globaler Kohleatlas mit rund 7.000 Kraftwerks-Steckbriefen erstellt, der technische, wirtschaftliche und CO_2-relevante Kennzahlen zur Bewertung einer weltweiten Umrüstung bereitstellt.
- Studie liefert erste globale techno-ökonomische Bewertung zur Umwandlung bestehender Kohlekraftwerke in regelbare, CO_2-freie Wärmespeicherkraftwerke.
  → Entscheidungsgrundlage für Industrie und Politik für einen alternativen Weg zu einer wirtschaftlich effizienten Dekarbonisierung der bestehenden Kohlekraftwerksflotte.



THE GLOBAL COAL ATLAS — Germany #5

Reference coal power plant

Main features

Unit name	Boxberg power station Unit R
Fuel type	Lignite
Year of build	2012
Location	Boxberg, Germany
Coordinates	latitude 51.418683, longitude 14.56843
Unit/phase ID	G100000101036

Technical data of the power unit

Gross nominal power	744.9 MW_{el}
Net nominal power	675.0 MW_{el}
Gross efficiency	41.4 %
Net efficiency	37.5 %
Aux. demand	69.9 MW_{el}

Renewable energy potential

Radius of RE coverage around the power plant: 30 km

	[MW_{el}]	[GWh_{el}/a]
PV installable	3128	3062
Wind onshore installable	88	253
Total RE	3215	3315

RE costs [IRENA for 2022]		[€/MWh_{el}]
PV	Germany	77.2
Wind onshore	Germany	53.1

pv installable (in MW) — wind onshore installable (in MW)

Thermal storage power plant (with integrated carnot battery)

Storage medium	Molten salt
Operation mode	Storage-only
Operation strategy	12h charging/12h discharging
Primary energy source	Photovoltaic/Wind

Preselected configurations*		Coal plant	Electrical heater (ERH)	Heat pump (HP)-Rankine	Heat pump (HP)-Brayton
Storage capacity	[GWh_{th}]	-	20.6	20.6	21.0
Charging capacity	[MW_{th}]	-	1713.6	1717.1	1746.6
Discharging capacity	[MW_{th}]	-	1540.5	1540.5	1583.0
Load provided	[GWh_{el}]	3202.9	3202.9	3202.9	3202.9

*Description in "Executive Summary"

Techno-economic analysis

Technical annual results

		Coal plant	ERH	HP-Rankine	HP-Brayton
Electricity production - gross	[GWh_{el}]	3554.8	3390.1	3390.1	3299.1
Electricity demand charging	[GWh_{el}]	-	7658.5	6213.0	5709.2
Aux. demand	[GWh_{el}]	351.9	187.2	187.3	96.2
P2H net efficiency	[%]	-	97.0	119.8	152.6
Round-trip efficiency	[%]	35.2	41.8	51.6	56.1
Operating hours	[h/a]	5110.0	5110.0	5110.0	5110.0
Charging hours	[h/a]	-	4380.0	4380.0	4380.0
Full load hours	[h/a]	4745.0	4745.0	4745.0	4745.0

Economic and environmental annual results (with PV / Wind)

		Coal plant	ERH	HP-Rankine	HP-Brayton
CAPEX investment	[M€]	770.7	1177.8	1827.7	2770.4
CAPEX annuity	[M€/a]	78.7	120.3	186.7	283.1
OPEX direct	[M€/a]	89.4	591.0 / 406.6	479.5 / 329.9	440.6 / 303.1
OPEX indirect	[M€/a]	40.5	61.3	92.9	137.7
LCOE	[€/MWh_{el}]	22.0	241.2 / 183.7	237.0 / 190.3	268.9 / 226.0
Sp. CO_2 emissions	[t/GWh_{el}]	1059.4	246.5 / 49.4	200.0 / 40.1	183.8 / 36.9
Saved CO_2 emissions	[kt_{CO_2}/a]	-	2635.4 / 5266.7	2784.4 / 5296.6	2930.9 / 5401.5
CO_2 abatement costs	[€/t_{CO_2}]	-	266.5 / 158.5	247.4 / 163.5	269.4 / 191.7

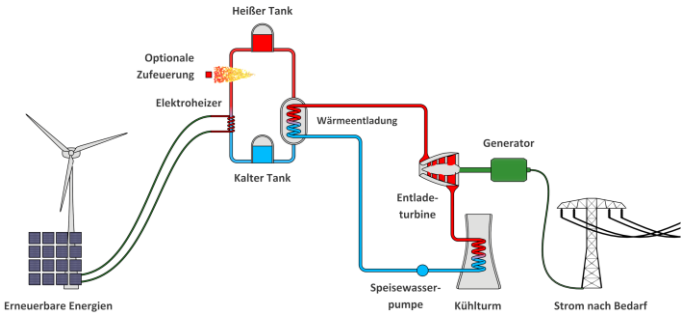
Alle Steckbriefe abrufbar unter:
Iñigo Labairu, J., Rahmat, Y. P., et. al. (2026). The Global Coal Atlas: Techno-Economic Analysis of Converting the World's Coal-Fired Power Plants into Thermal Storage Power Plants [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.19067649

Zusammenfassung Wärmespeicherkraftwerke / Carnot Batterien

- Vorteile von WSK:
  - Erneuerbarer Strom → Power-To-Heat-To-Power in Kombination mit Back-Up Feuerung → Versorgungsicherheit
  - Netzdienlichkeit - Regelenergie (Trägheit, Kurzschlussleistung und Netzreserven)
  - Nutzung bestehender Kraftwerksinfrastruktur und Netzanschlüsse
  - Neue Speicherkomponenten basieren auf bereits etablierten Technologien aus solarthermischen Kraftwerken
  - Auskopplung von (Prozess-)Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus möglich → hoher Nutzungsgrad
  - Anwender sind Kraftwerksbetreiber, kommunale Versorgungsunternehmen sowie Industrieprozesse mit Strom- und Wärmebedarf
  - Geringe Rohstoff- und Umweltbelastung, heimische Industrie
- Ausbauziele der Energiewende nur erreichbar unter paralleler Nutzung aller technischen Optionen, nicht entweder-oder, sondern im Zusammenspiel: Batterien für kleinere und WSK für größere Speicherbedarfe – und auch integriert in (H_2-)Gaskraftwerke.
- WSK international auf dem Vormarsch → z.B. in China aktuell ca. 10 Projekte mit verschiedenen Technologieoptionen für Retrofit von Kohlekraftwerken
- WSK ermöglichen die kurzfristige, großtechnische Integration erneuerbarer Energien unter Nutzung bestehender Infrastruktur – für eine CO_2-freie Strom- und Wärmeerzeugung.



Quelle: DLR



Quelle: DLR

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT!

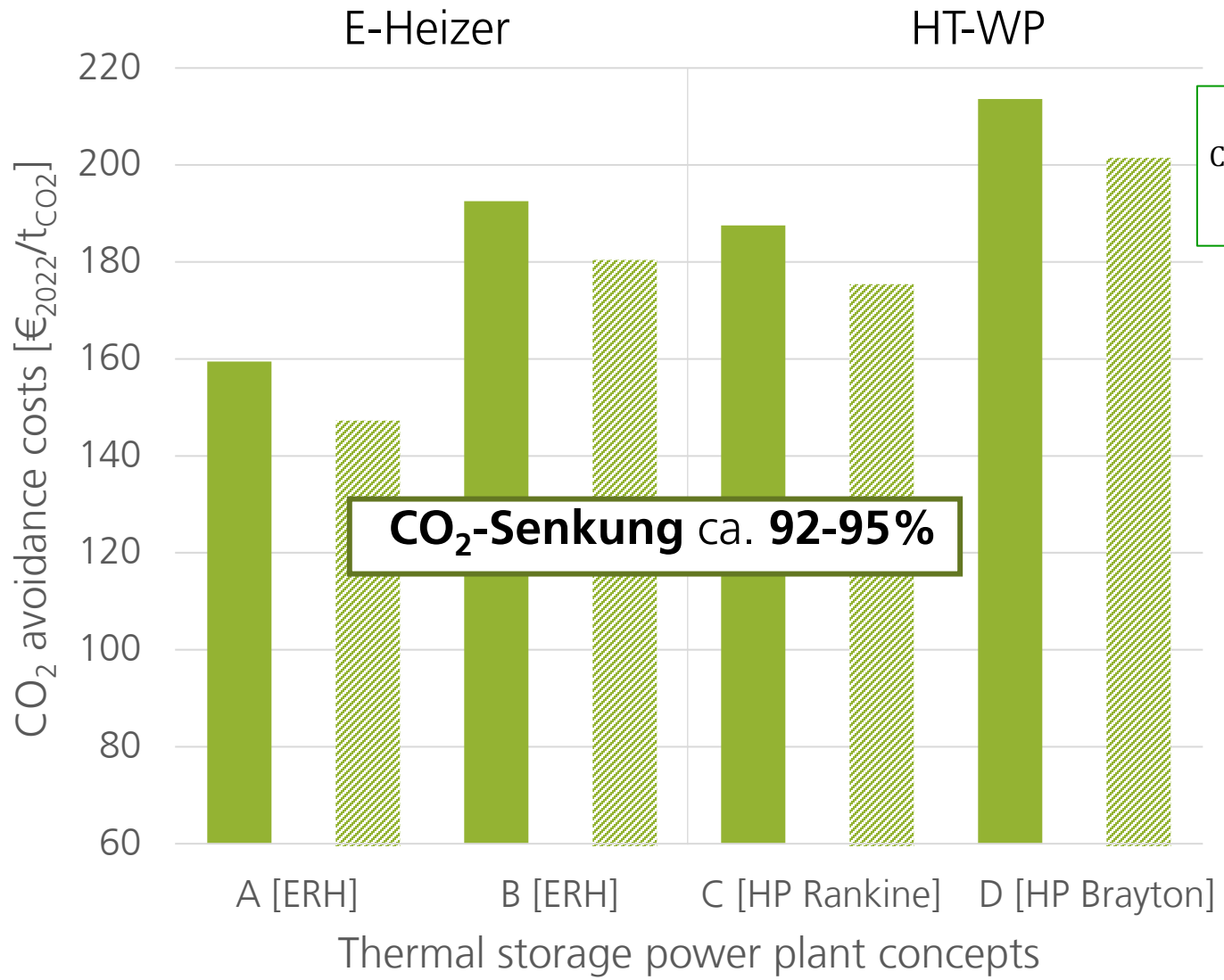
Der globale Kohleatlas:
Umwandlung der weltweiten Kohlekraftwerke in Wärmespeicherkraftwerke

Kontakt: DLR – Institut für Solarforschung, stefano.giuliano@dlr.de

Back-Up

Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke Angamos (Level 0)

CO_2-Vermeidungskosten mit IRENA Input-Daten[1]



$$\text{CO}_2\text{ avoidance costs}^{[1]} = \frac{\text{LCOE}_{\text{Retrofit}} - \text{LCOE}_{\text{Reference}}}{\left(\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{MWh}\right)_{\text{Reference}} - \left(\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{MWh}\right)_{\text{Retrofit}}}$$

$LCOE_{Ref., Coal}$: 37.2 €/MWh_{el} with financing
25.1 €/MWh_{el} fully depreciated

Annahmen:

- Zinssatz 7%
- Laufzeit 20 Jahre
- CAPEX Referenzanlage 1019 $€_{2022}/kW_{el}$

With financing

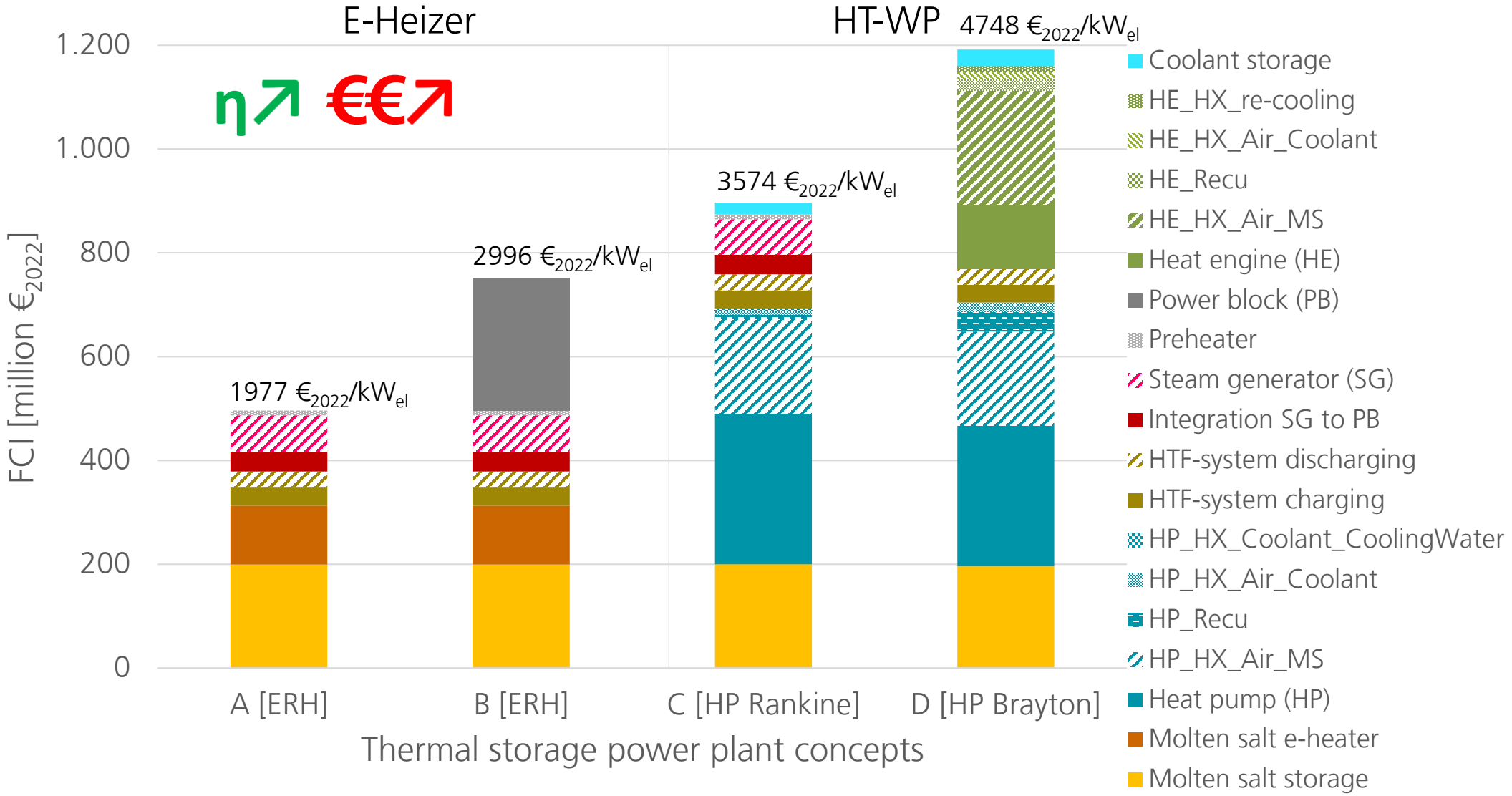
Fully depreciated

LCOE PV Global
IRENA[1]
International Renewable Energy Agency
46.5 $€_{2022}/MWh_{el}$

[1] IRENA (2023) *Renewable power generation costs in 2022*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

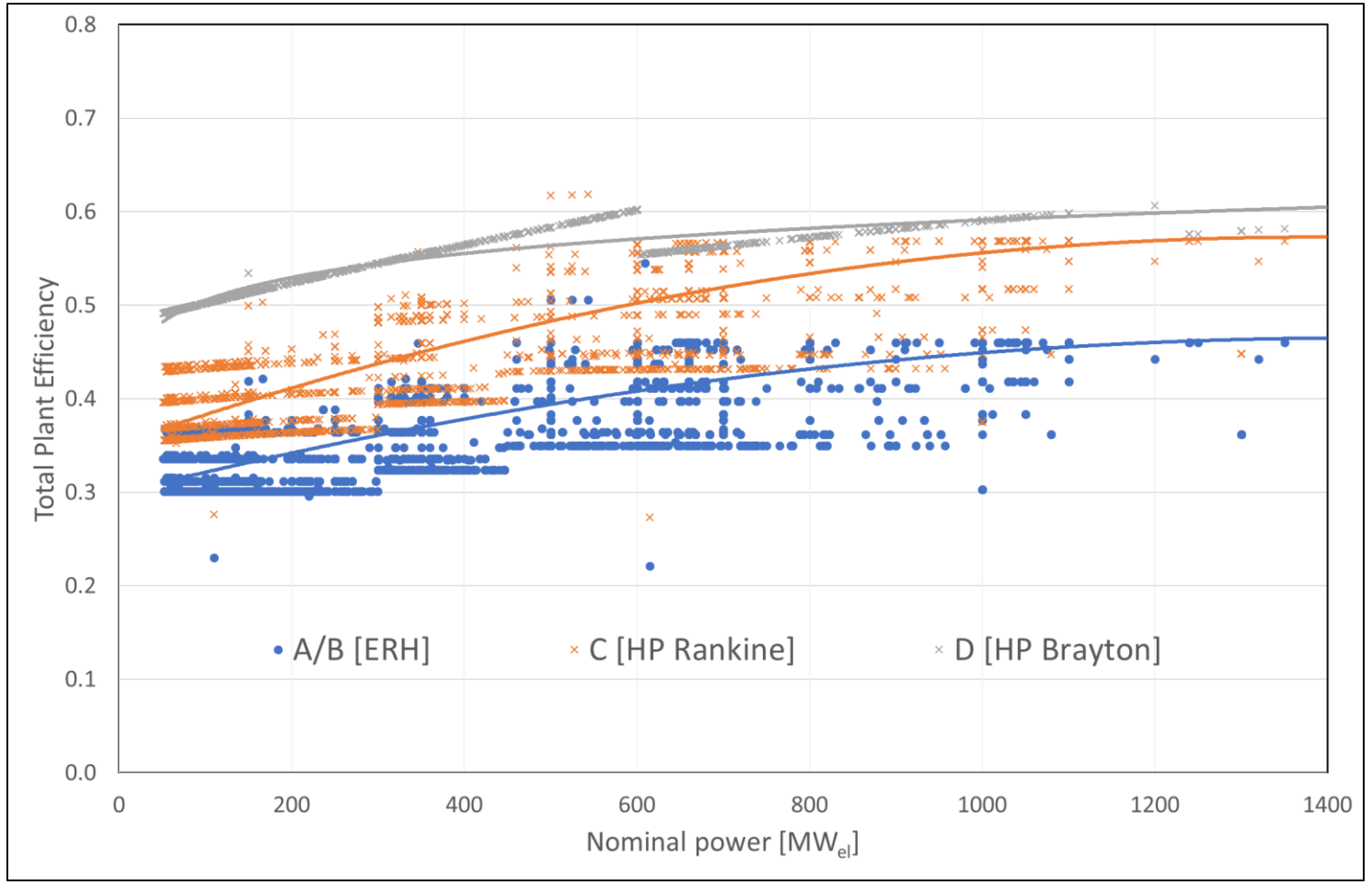
Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke Angamos (Level 0)

Investitionskosten der Konzepte mit 251 MW_{el} (Netto)



Techno-ökonomische Analyse der weltweiten Kohlekraftwerke (Level 0)
Wirkungsgradergebnisse von 6570 Kohlekraftwerken

- Die technischen Ergebnisse wurden in greenius für jedes Kraftwerk und jedes Konzept berechnet.

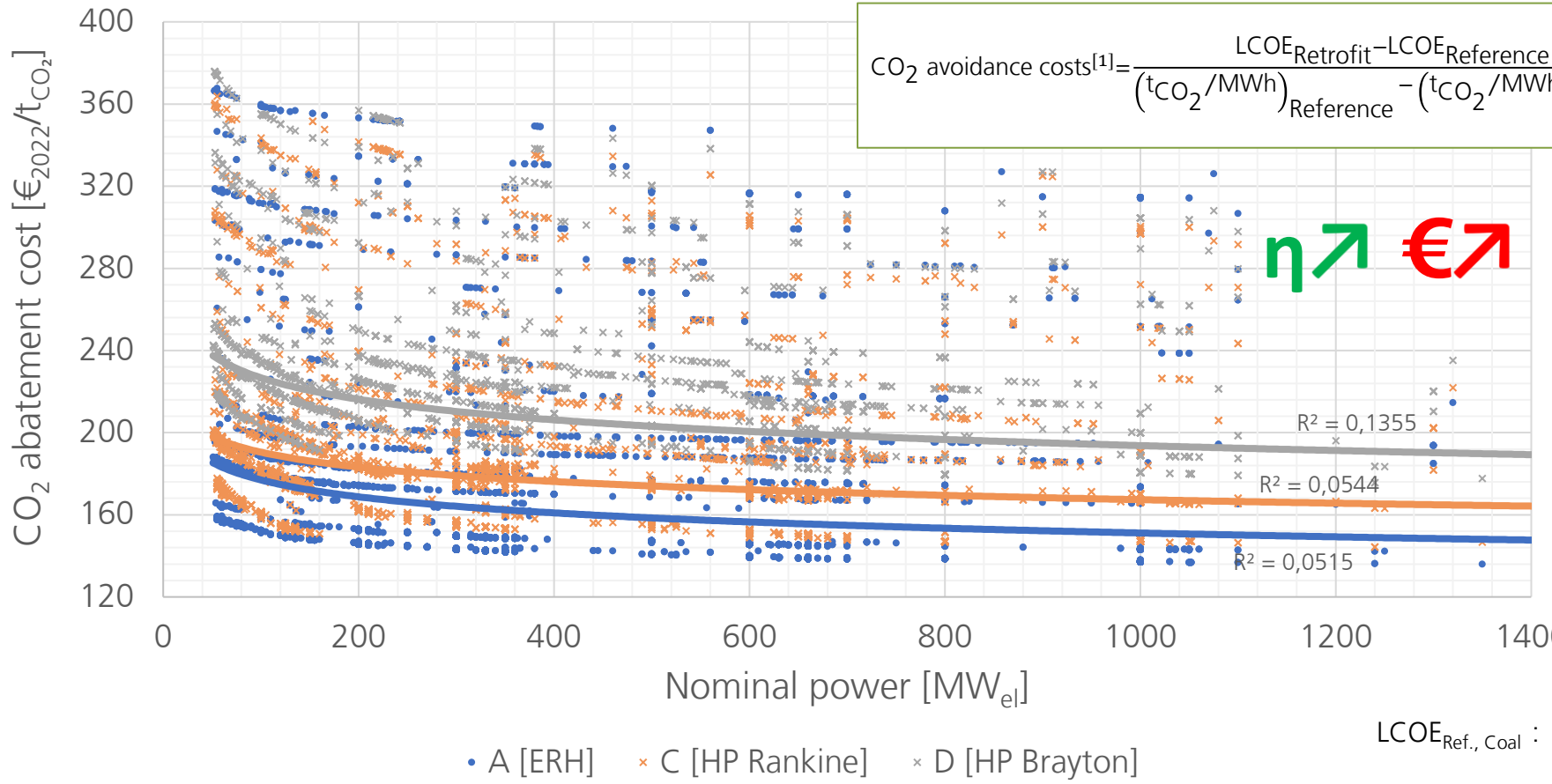


- Die Effizienz des Rankine-PB hängt vom Verbrennungs-Typ, der Leistung und dem Baujahr ab.
- Im Fall des Brayton-PB handelt es sich um einen neuen Zyklus, der hier nur von der Kapazität abhängt.

Techno-ökonomische Analyse der weltweiten Kohlekraftwerke (Level 0)

Ökonomische Ergebnisse von 6570 Kohlekraftwerken

$$CO_2 \text{ avoidance costs}^{[1]} = \frac{LCOE_{Retrofit} - LCOE_{Reference}}{\left(t_{CO_2}/MWh\right)_{Reference} - \left(t_{CO_2}/MWh\right)_{Retrofit}}$$



CO_2-Emissions PV
ecoinvent[2]

LCOE PV
IRENA[1]
International Renewable Energy Agency
Country-specific
(otherwise, global avg.)

$LCOE_{Ref., Coal}$: 25.1 €/MWh_{el} fully depreciated

- CO_2-Vermeidungskostens-Spanne: **130-380 €$_{2022}$/t_{CO_2}**

[1] IRENA (2023) *Renewable power generation costs in 2022*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
[2] Wernet et al. (2016): https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8.