

Wärmespeicherkraftwerke zur Dekarbonisierung von bestehenden Kohlekraftwerken: Techno-ökonomische Bewertung

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Solarforschung, Institut für Technische Thermodynamik

Jahrestreffen der DECHEMA Fachsektion Energie, Chemie und Klima, den 12.03.2024

J. Iñigo Labairu, Y. Rahmat, M. I. Roldán Serrano, S. Giuliano, R.-U. Dietrich



- Überblick
 - Motivation
 - Was ist ein Wärmespeicherkraftwerk (WSK)?
 - Das Projekt Kohleatlas
- Methodik
- Ergebnisse techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke mit E-Heizer
- Zusammenfassung und Ausblick

ÜBERBLICK

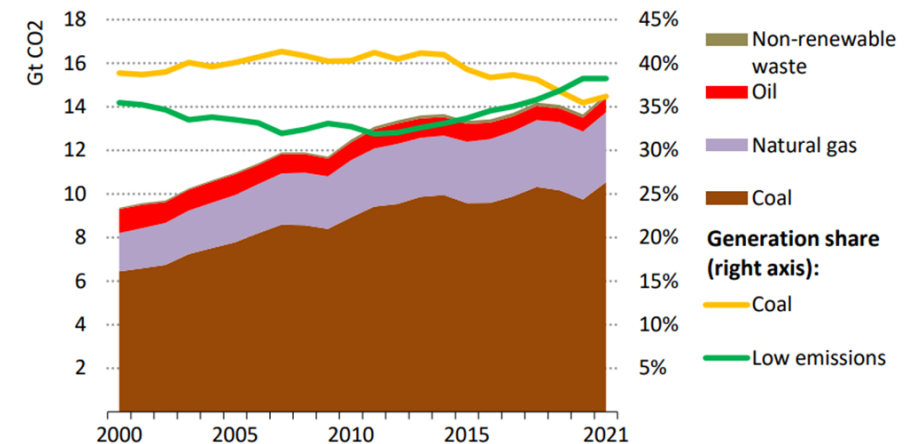
Motivation

- Das **Klimaabkommen von Paris** hat das globale Ziel, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf 1.5 Grad zu begrenzen.
- Auf der 28. Weltklimakonferenz (COP28, 2023) in Dubai hat sich die Weltgemeinschaft erstmals auf eine Abkehr von Öl, Gas und Kohle geeinigt.
- Die EU hat sich verpflichtet, die **Klimaneutralität** in der EU bis zum Jahr 2050 zu erreichen, **Deutschland** sogar **bis 2045**.
- Dafür ist vorgesehen, dass das **letzte Kohlekraftwerk in Deutschland** bis spätestens **im Jahr 2038 stillgelegt** werden soll.
- **Weltweit** sind noch **ca. 7000 Kohlekraftwerke** in Betrieb mit insg. **10.4 Gt_{CO2}/a** (IEA, 2022), die zum Teil auch stillgelegt werden sollen.
- Einige dieser Kraftwerke sind noch relativ neu und ein Teil der vorhandenen Kraftwerkskomponenten sowie der Standort könnte als **Wärmespeicherkraftwerk (WSK)** weiter genutzt werden.



Standorte der weltweiten Kohlekraftwerke

Quelle: <https://globalenergymonitor.org/>

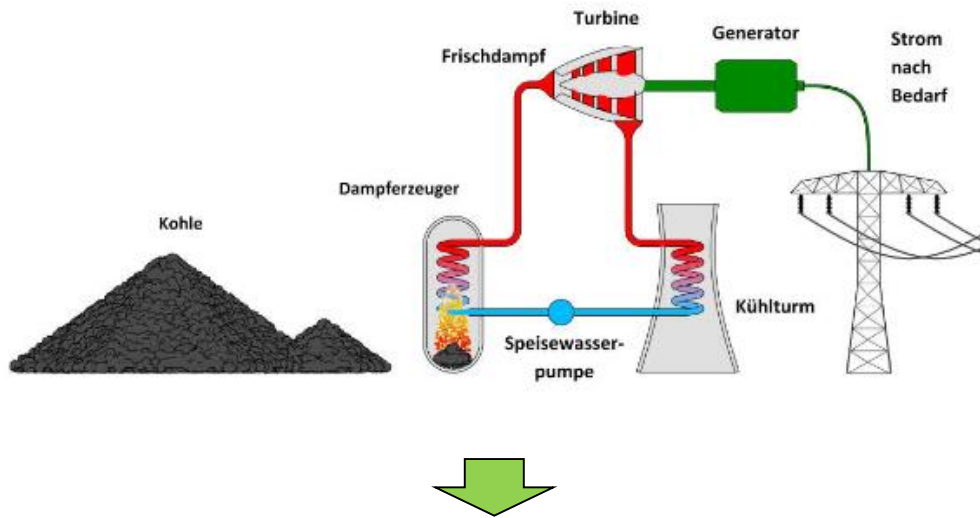


CO₂-Emissionen aus der Strom- und Wärmeerzeugung nach Brennstoff und Anteil nach Brennstoff, 2000–2021

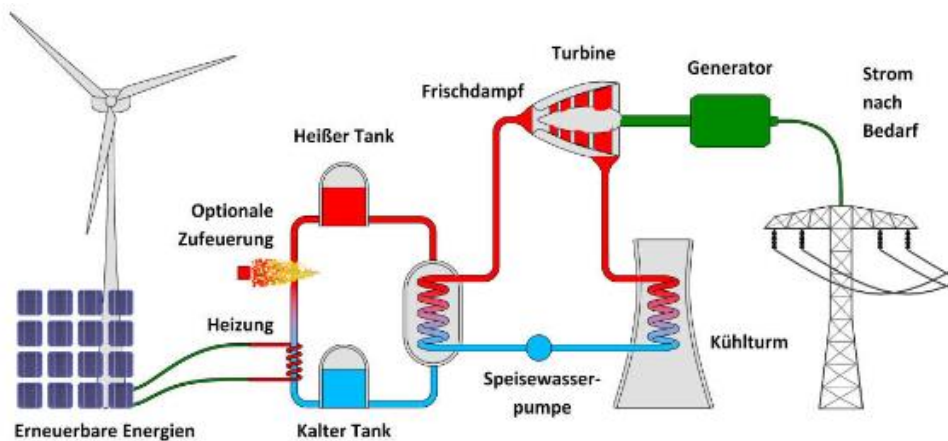
Quelle: IEA Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021

Was ist ein WSK?

Kraftwerk auf Basis fossiler Brennstoffe



Wärmespeicherkraftwerk auf Basis erneuerbarer Energien



- **Wärmespeicherkraftwerke** (kurz **WSK**) sind thermische Kraftwerke, ausgestattet mit einem großen **thermischen Energiespeicher** der elektrisch beheizbar ist.
- Sie können mittels **Strom aus Erneuerbaren Quellen** geladen werden und so **Erneuerbare Energie „grundlastfähig“** bereitstellen.
- Sowohl **bestehende Kraftwerke** (z.B. befeuert mit Kohle, Gas, Biomasse) können umgenutzt werden (sogenanntes Repurposing) als auch **neue Anlagen** im Zusammenhang mit dem Zubau von Erneuerbaren Energien errichtet werden.
- Der Wirkungsgrad ist abhängig vom Kraftwerkswirkungsgrad und ist bei elektrischer Heizung ca. 40 %, und bei Nutzung von Hochtemperatur-Wärmepumpe bis ca. 60 %.
- Idealerweise kommen **WSK in Kombination mit Fern-/ Prozesswärme** zur Anwendung, so dass die vom Kreisprozess abgegebene Wärme auch genutzt werden kann und ein hoher Nutzungsgrad des Gesamtprozesses möglich ist.
- **Zufeuerung/ Hybridisierung** (bestehende Feuerung oder Biogas, Wasserstoff, Biomasse, usw.) erlaubt jederzeit garantierte Leistung.
- Die Anwender der Technologie sind große Kraftwerksbetreiber, kommunale Versorgungsunternehmen sowie Industrieprozesse mit Strom und Wärmebedarf in Deutschland, Europa und weltweit.

Das Projekt „Globaler Kohleatlas“

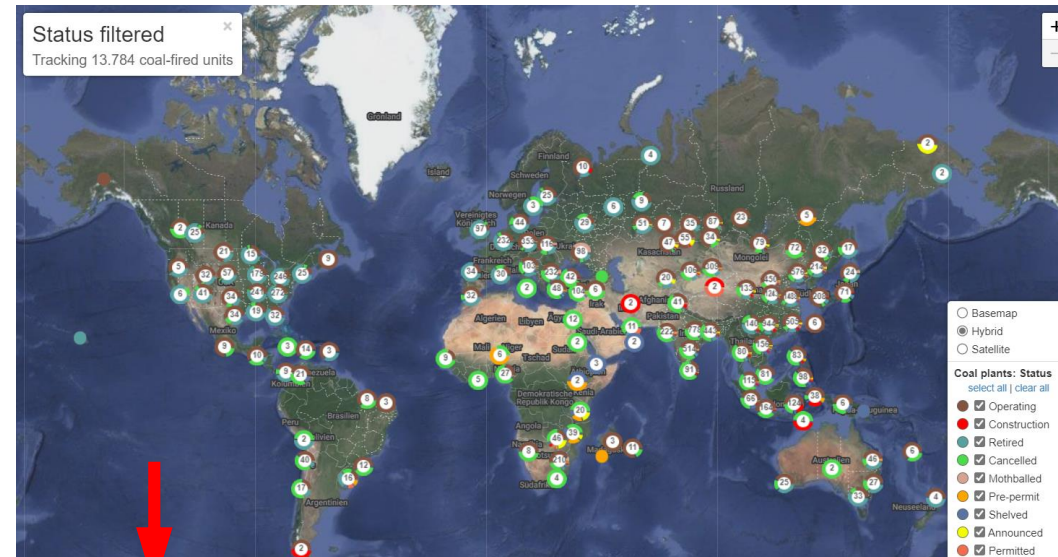


Überblick

- Projekt „Globaler Kohleatlas“ - Wärmespeicherkraftwerke für die Dekarbonisierung des globalen Kohlekraftwerksparks
- Potentialanalyse der weltweiten Kohlekraftwerke zur Abschätzung der LCOE, CO₂-Vermeidungspotentiale und -kosten bei der Umrüstung der Kohlekraftwerke zu CO₂-freien Wärmespeicherkraftwerken (WSK)
- DLR Projekt von 04/2020 bis 03/2025

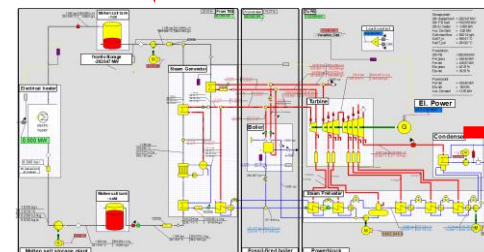
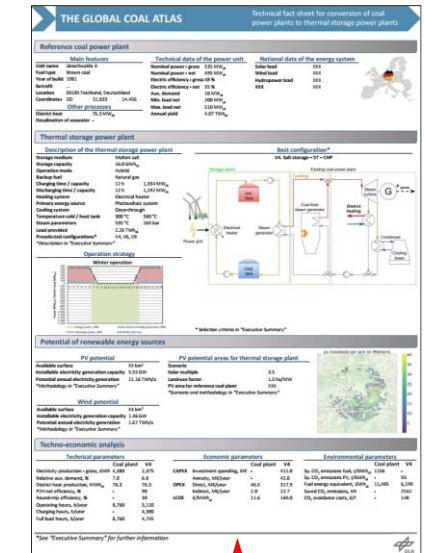
Arbeitspaket: Techno-ökonomische Analyse der weltweiten Kohlekraftwerke

Coal-fired Power Plant Database



Quelle: <https://globaleenergymonitor.org/>

Fact sheet



Epsilon models for reference power plants



Greenius models for each coal-fired power plant

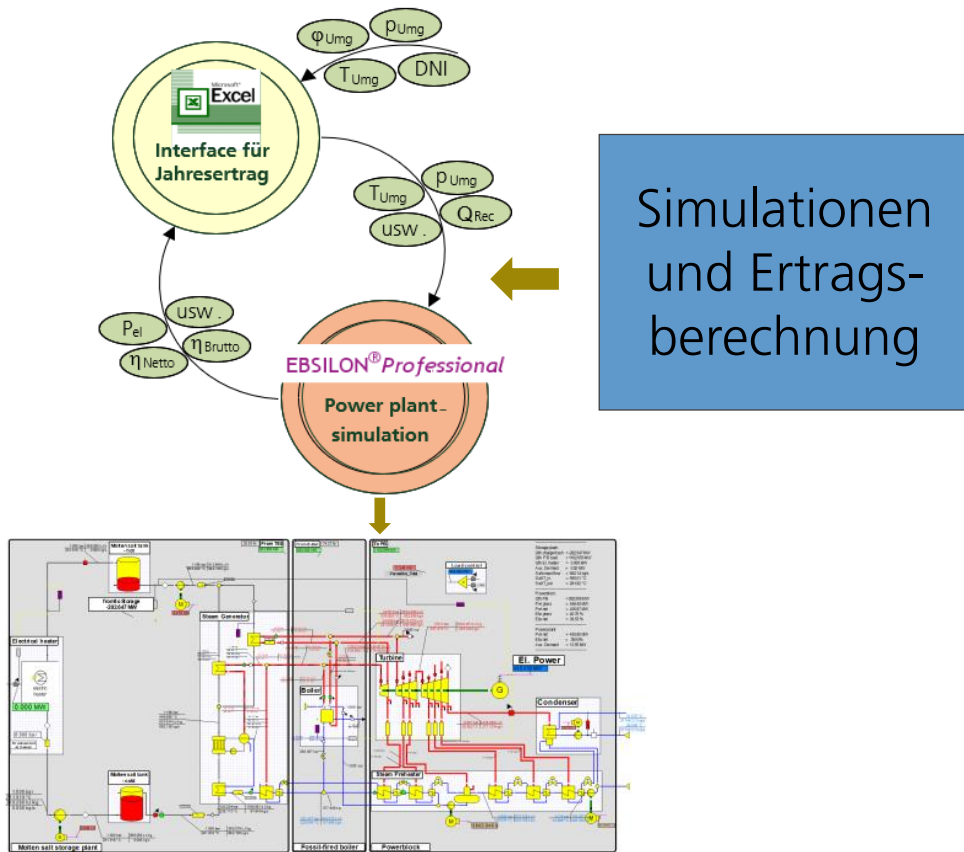


Economic and ecological analysis

METHODIK

Methodik

Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke

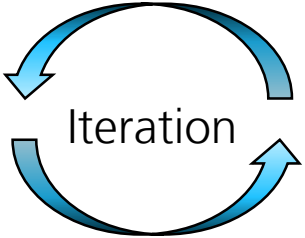


Simulationen und Ertragsberechnung

Austausch der Simulationsparameter

←
TEPET-
EBSILON Excel
→

Auslesen der Simulationsergebnisse



Techno-ökonomische & ökologische Analyse



Berechnung von CAPEX, OPEX, LCOE
CO₂-Vermeidungskosten,
Sensitivitätsanalysen,
Lernkurven, Skaleneffekte, ...

- Detaillierte Prozess- und Energieertrags-Simulationsmodelle in Ebsilon erstellt
- Design- und Ertragsoptimierung

The background of the slide is a photograph of a solar tower power plant. Numerous large, rectangular mirrors (heliostats) are mounted on tall, dark metal poles. The mirrors are arranged in rows and reflect the sky, creating a shimmering effect. The ground is covered in green grass with small yellow wildflowers. The sky is a clear, bright blue with a few wispy white clouds.

TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE DER REFERENZKRAFTWERKE

Fossil befeuerte Bestandskraftwerke

Angamos (Unit 1)



Source: <https://www.powermag.com/plant-of-the-year-aes-geners-angamos-power-plant-earns-powers-highest-honor/>

- Standort: Mejillones, Antofagasta Region, Chile
- Inbetriebnahme: 2011
- Eigentümer: AES Andes SA
- Brennstoff: Kohle
- PB Leistungsklasse: 300 MW
- Frischdampftemperatur: 565°C
- Ohne KWK

Jänschwalde (Unit B)



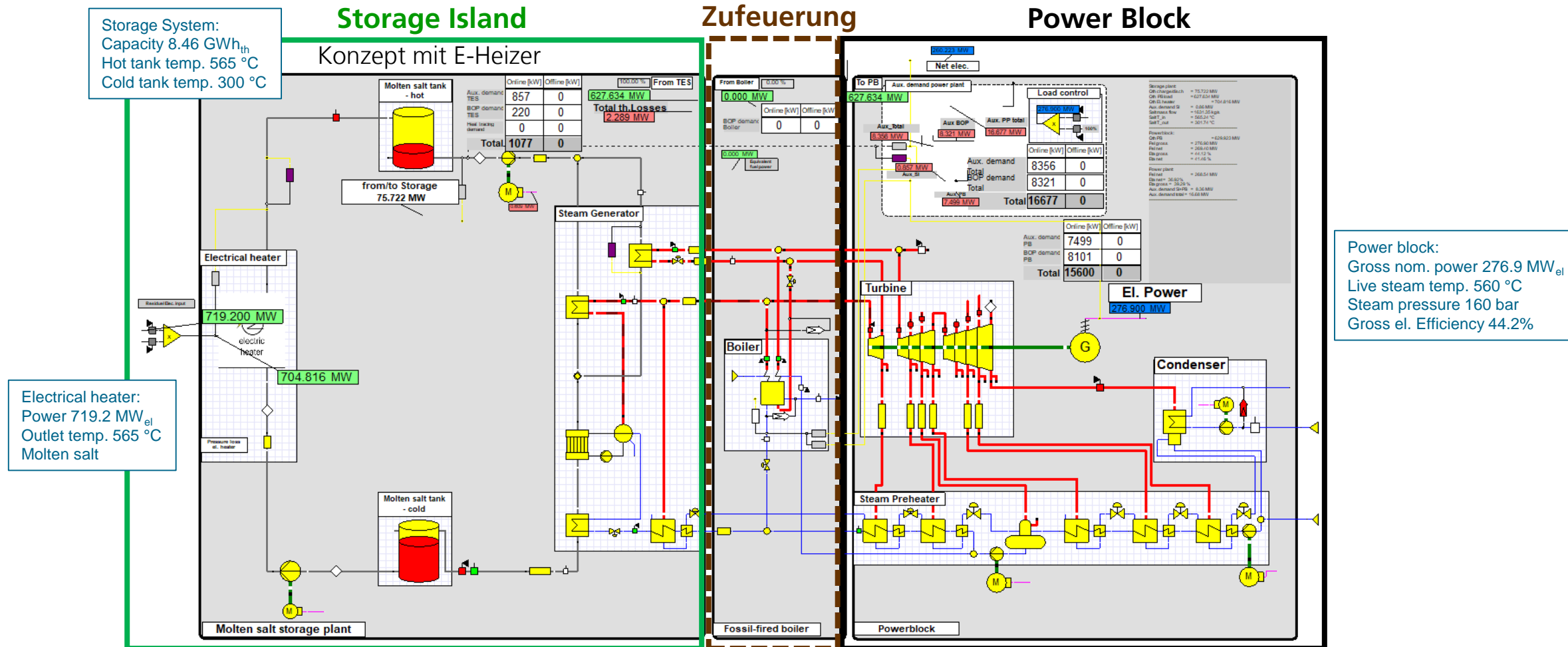
Source: <https://www.leag.de/de/geschaeftsfelder/kraftwerke/kraftwerk-jaenschwalde/>

- Standort: Peitz, Brandenburg, Deutschland
- Inbetriebnahme: 1985
- Eigentümer: Lausitz Energie Kraftwerke AG
- Brennstoff: Kohle, (Bioenergie)
- PB Leistungsklasse: 500 MW
- Frischdampftemperatur: 535°C
- Mit KWK, Fernwärme

WSK-Konzepte

E-Heizer gekoppelt mit Power Block ohne KWK

Epsilon-Simulationsmodell vom Referenzkraftwerk 300 MW_{el} in Angamos
Entladen @DP, 100% Leistungserzeugung, Storage Only (SO)

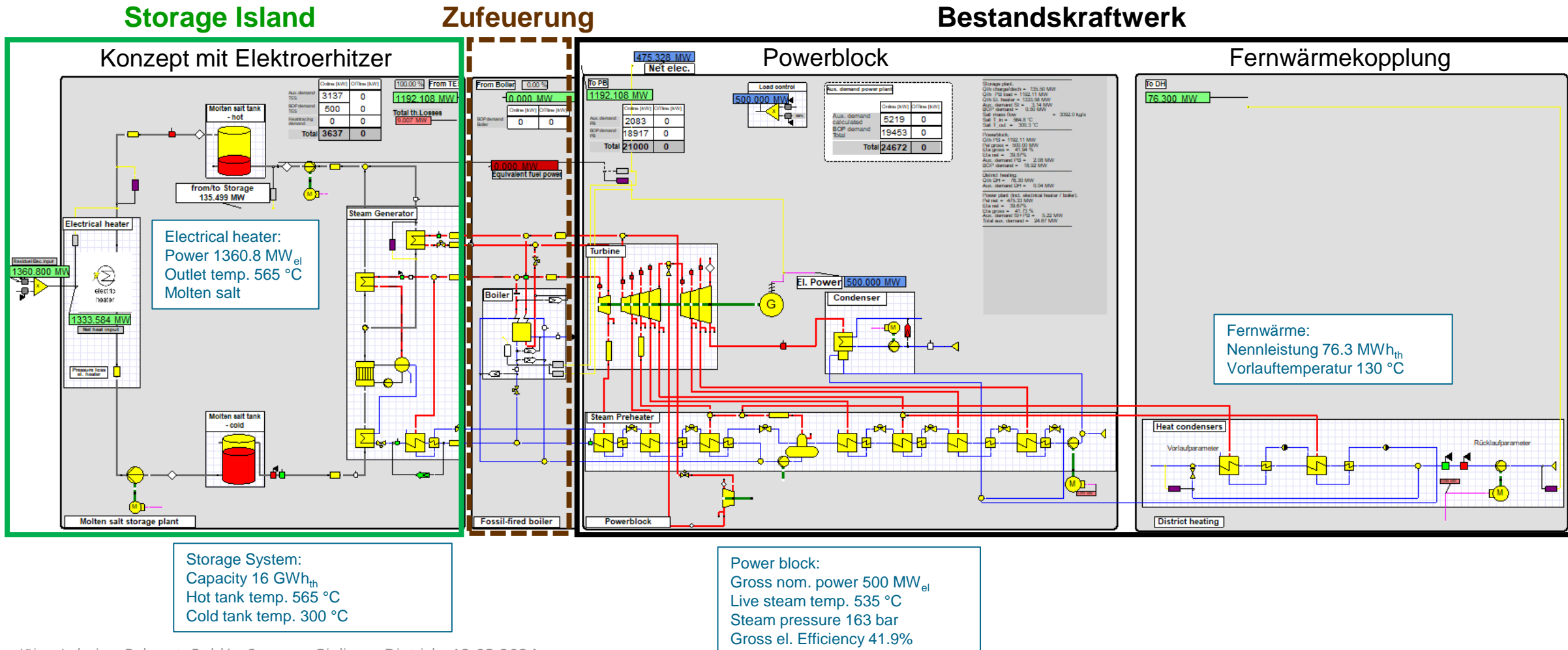


WSK-Konzepte

E-Heizer gekoppelt mit Power Block und KWK-Fernwärme

Epsilon-Simulationsmodell vom Referenzkraftwerk 500 MW_{el} in Jänschwalde

Entladen @DP, 100% Leistungs- und Fernwärmeerzeugung (Winterbetrieb), Storage Only (SO)



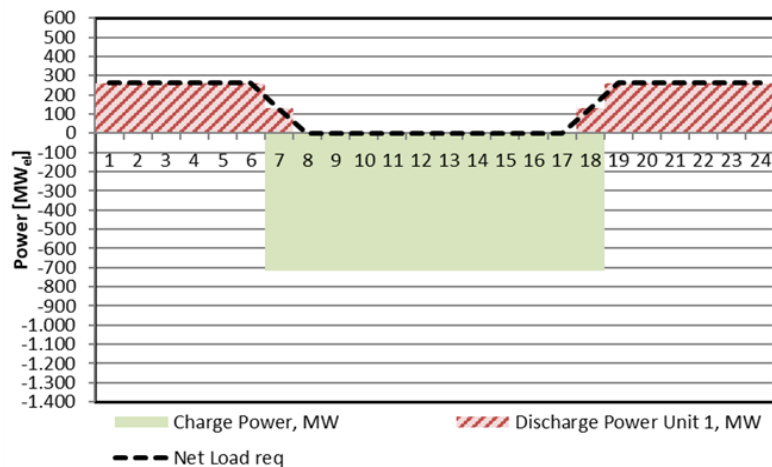
Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke

Betriebsweise

Festgelegte Betriebsweise basiert auf einem Tagesprofil:

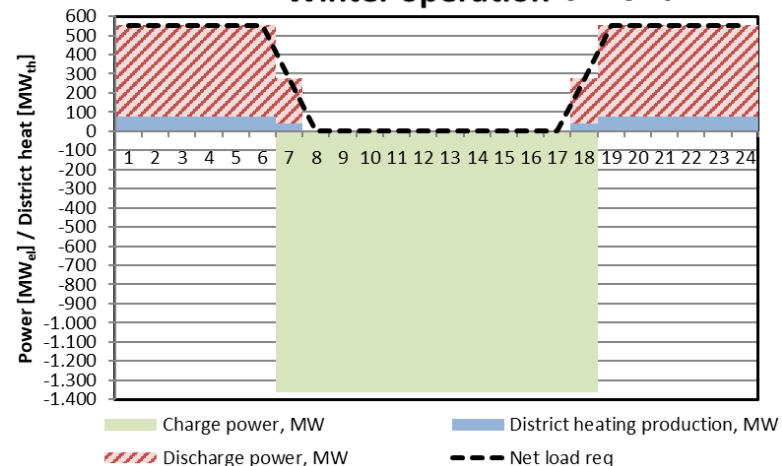
- Wiederholung des gleichen Tagesprofils während des ganzen Jahres
- 12-h Beladen
- 12-h Entladen
- An- und Abfahren mit 50% Leistungserzeugung

Angamos



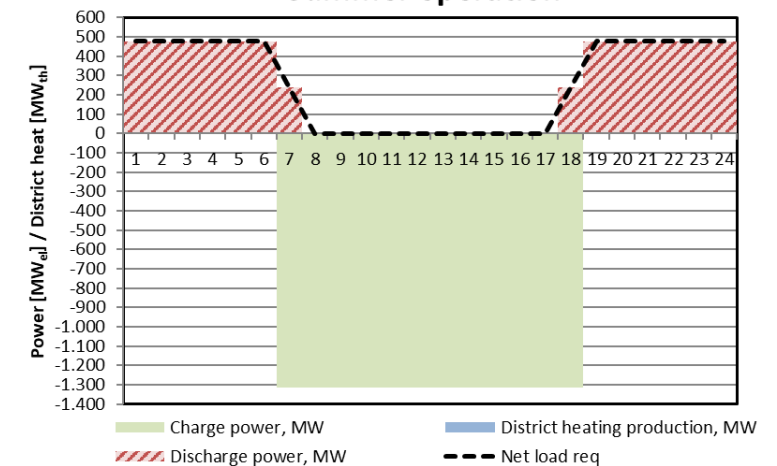
Jänschwalde

Winter operation 6 month



Jänschwalde

Summer operation 6 month

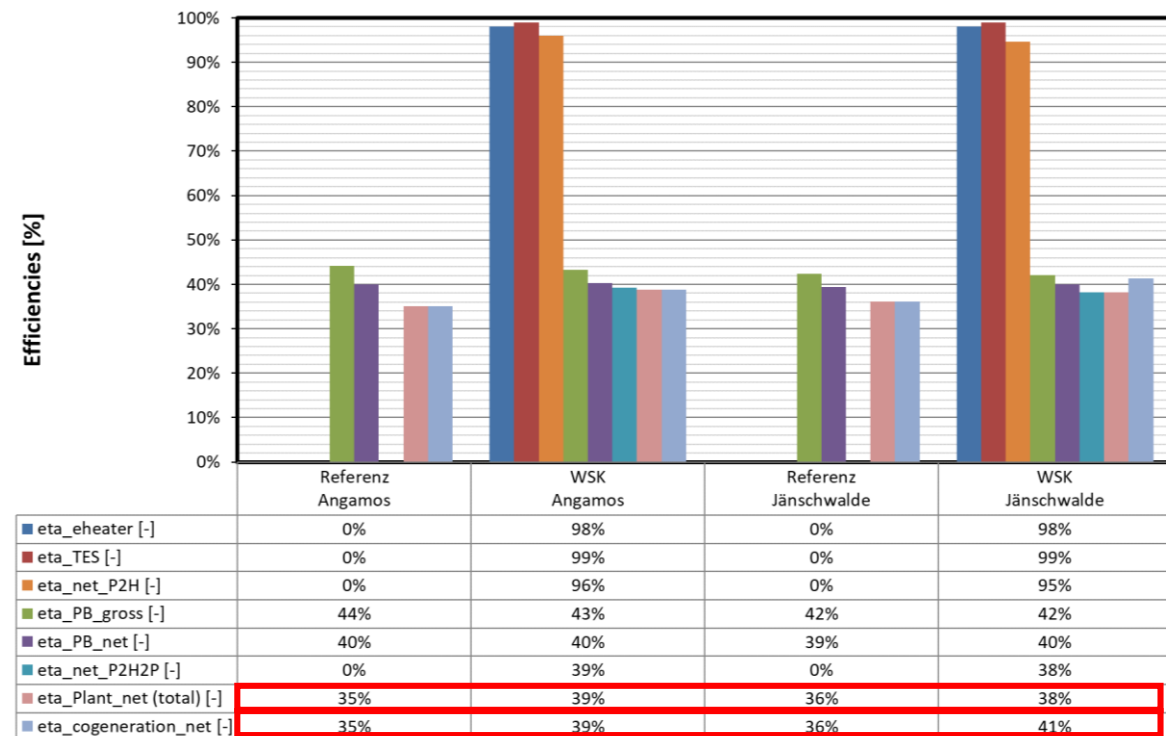
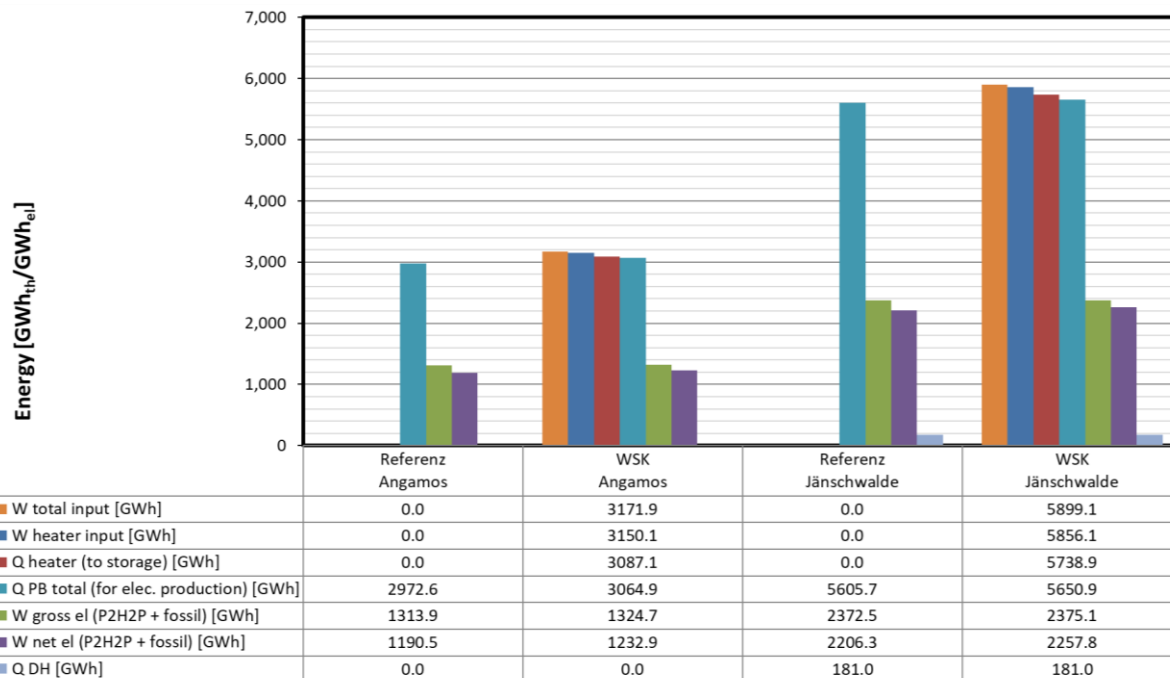


Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke

Jahreserträge und Nutzungsgrad

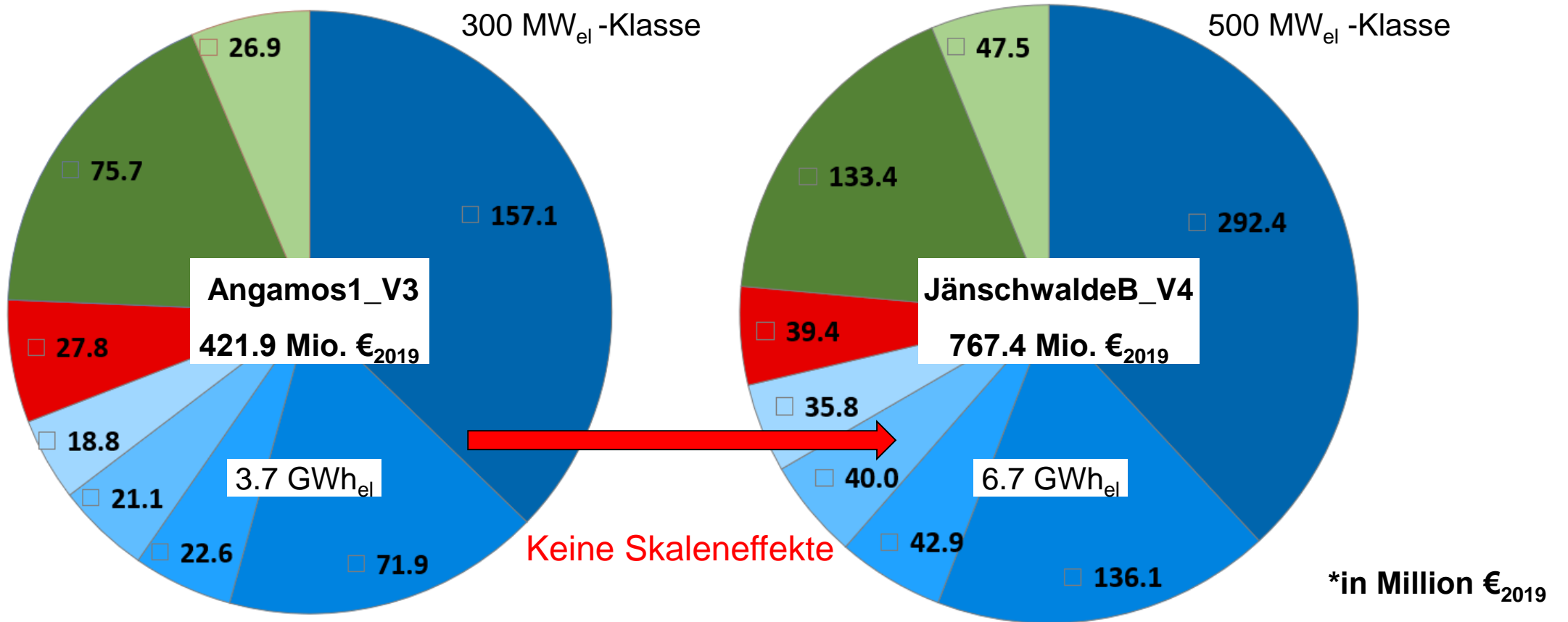


- Jahresertrag: 1233 GWh_{el} bei 300MW_{el}-Leistungsklasse und 2258 GWh_{el} bei 500MW_{el}-Leistungsklasse.
- Der Jahresnutzungsgrad Strom-zu-Strom ohne Fernwärmeerzeugung liegt bei etwa 39% und mit Winter-Betrieb bei 37,6%.
- Der Gesamtnutzungsgrad der bestehenden fossilen Referenzkraftwerke (~35%) ist geringer, da der Kohlekessel noch enthalten ist.



Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke

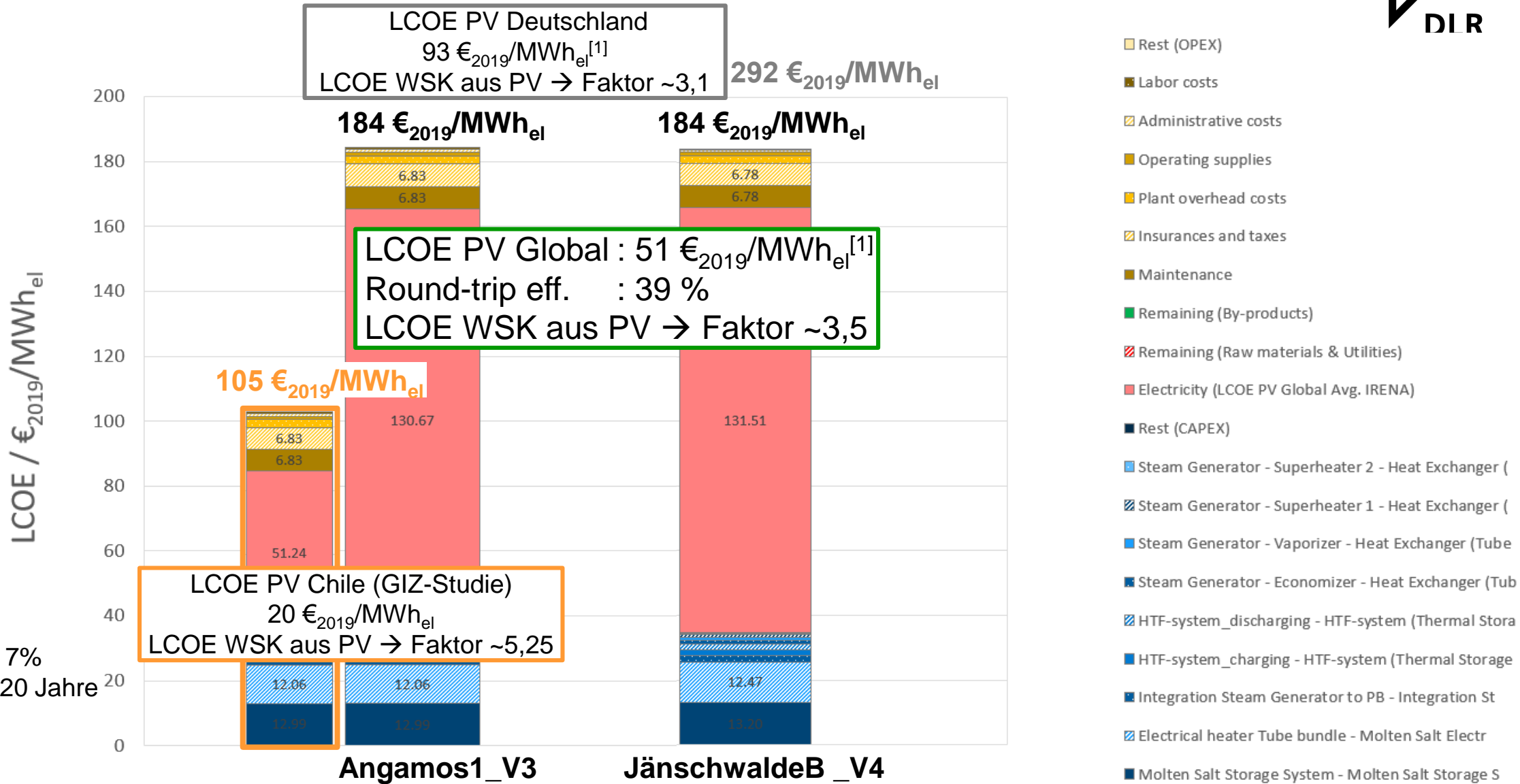
Investitionskosten



- Molten Salt Storage System (Insulated storage tank with immersion heater, SS 316)
- Molten Salt Electrical Heater (Shell & Tube, Stainless Steel)
- Integration Steam Generator to PB (Thermal Storage Power Plant (Molten Salt))
- HTF-system_charging (Thermal Storage Power Plant (Molten Salt))
- HTF-system_discharging (Thermal Storage Power Plant (Molten Salt))
- Steam Generator (Tube & Shell, -200<T<600°C, p<30 Mpa, A<1000 m² active, Inconel / Incoloy)
- Other Direct Capital Costs (Installation, Piping, Electrical systems, Instrumentation, Service facilities, etc.)
- Indirect Capital Costs (Engineering & supervision, Construction, Legal expenses, Contractor's fee, Contingency)

Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke

LCOE

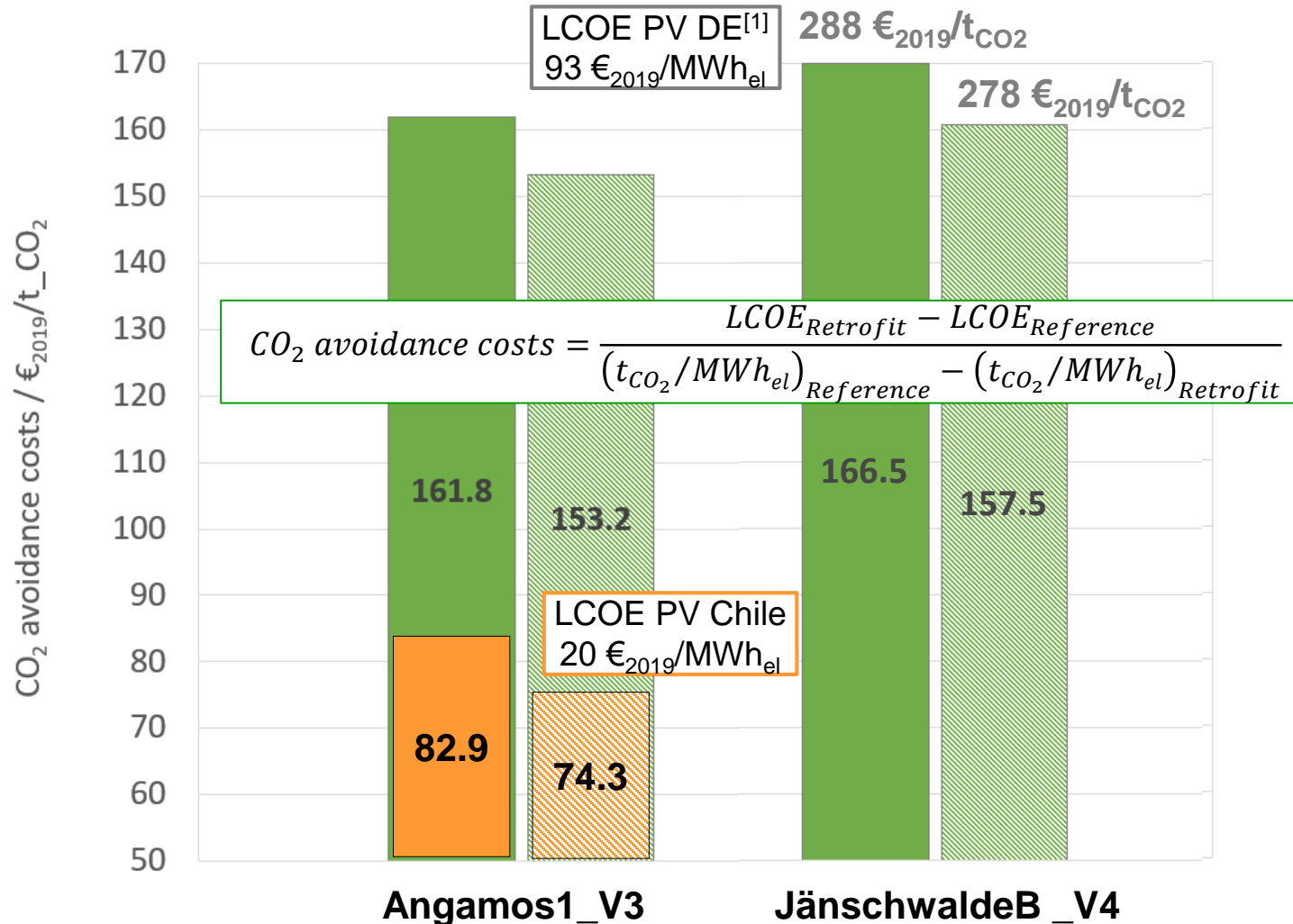
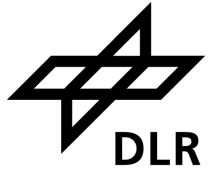


Annahmen:

- Zinssatz 7%
- Laufzeit 20 Jahre

Techno-ökonomische Analyse der Referenzkraftwerke

Senkung der CO₂-Emissionen und CO₂-Vermeidungskosten



- Im SO-Betrieb liegt die **CO₂-Senkung** bei **etwa 92%** mit Berücksichtigung der CO₂-Emissionen der PV-Anlage.

- Power Plant fully depreciated; LCOE PV 51 €/MWh
- ▨ Power Plant with financing; LCOE PV 51 €/MWh
- Power Plant fully depreciated; LCOE PV 20 €/MWh
- ▨ Power Plant with financing; LCOE PV 20 €/MWh

Annahmen:

- Zinssatz 7%
- Laufzeit 20 Jahre
- CAPEX Referenzanlage 800 €/kW_{el}

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

- Weltweit sind noch ca. 7000 Kohlekraftwerke in Betrieb, die in naher Zukunft stillgelegt werden sollen.
- Einige dieser Kraftwerke sind noch relativ neu und ein Teil der vorhandenen Kraftwerkskomponenten sowie der Standort könnte als Wärmespeicherkraftwerk (WSK) weiter genutzt werden.
- In einem zum WSK umgebauten Kohlekraftwerk wird der Hochtemperatur-Wärmespeicher mit erneuerbarer Energie (PV, Wind) aus der näheren Umgebung des Kraftwerksstandortes geladen (Power-To-Heat) und bei Bedarf Speichers im umgewandelten Kohlekraftwerk verstromt und über den bestehenden Netzanschluss ins Netz gespeist (Heat-To-Power).
- Optional kann eine Zufeuerung mit CO₂-neutralen chemischen Energieträgern (Wasserstoff, Bioenergie, usw.) erfolgen (z.B. für Dunkelflauten).
- Durch den Speicher wird eine zeitliche Entkopplung von Erneuerbarer Stromerzeugung und somit eine Anpassung an den Strombedarf möglich und so Erneuerbare Energie „grundlastfähig“ bereitgestellt (Versorgungssicherheit).
- Die techno-ökonomische Analyse von zwei Referenzkraftwerken zeigt interessante Stromgestehungs- und CO₂-Vermeidungskosten, die weitestgehend standortabhängig sind (Preis Beladestrom).
- Im Projekt „Globaler Kohleatlas“ werden bis zum Projektabschluss Anfang 2025 eine Potentialanalyse aller weltweiten Kohlekraftwerke zur Abschätzung der LCOE, CO₂-Vermeidungspotentiale und -kosten bei der Umrüstung der Kohlekraftwerke zu CO₂-freien WSK veröffentlicht.

VIELEN DANK!

Wärmespeicherkraftwerke zur Dekarbonisierung von bestehenden Kohlekraftwerken: Techno-ökonomische Bewertung

Jahrestreffen der DECHEMA Fachsektion Energie, Chemie und Klima, den 12.03.2024
J. Iñigo Labairu, Y. Rahmat, M. Roldán Serrano, S. Giuliano, R.-U. Dietrich

Thema: **Jahrestreffen der DECHEMA Fachsektion Energie, Chemie und Klima**

Wärmespeicherkraftwerke zur Dekarbonisierung von bestehenden Kohlekraftwerken: Techno-ökonomische Bewertung

Datum: 12.03.2024

Autor: Javier Inigo Labairu, Yoga Rahmat, Maria Isabel Roldán Serrano, Stefano Giuliano, Ralph-Uwe Dietrich

Institut: SF, TT

Bildcredits: Alle Bilder „DLR (CC BY-NC-ND 3.0)“