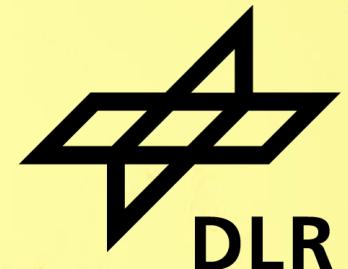


Konzepte zur Defossilisierung der Energieversorgung eines Standortes der chemischen Industrie

Stefano Giuliano

DLR Institut für Solarforschung

Rhein Ruhr Power e.V. - RRP Top Thema, 20 November 2025



Agenda

- Das DLR und das Institut für Solarforschung
- Motivation und Überblick über das Projekt StoREN
- Konzepte, Randbedingungen und Methodik
- Ergebnisse
- Schlussfolgerungen



Das DLR und das Institut für Solarforschung

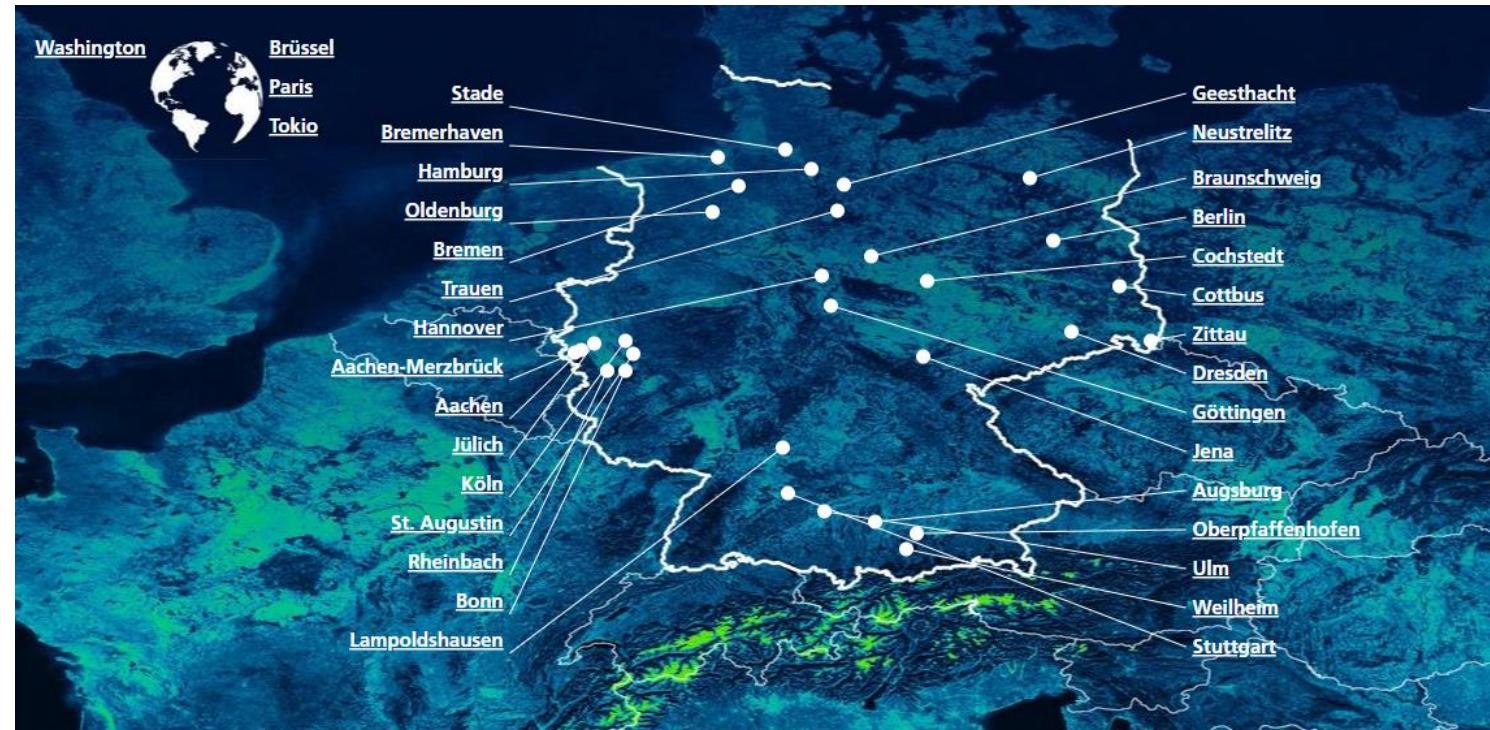
Überblick DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Forschungszentrum + Raumfahrtagentur + Projektträger

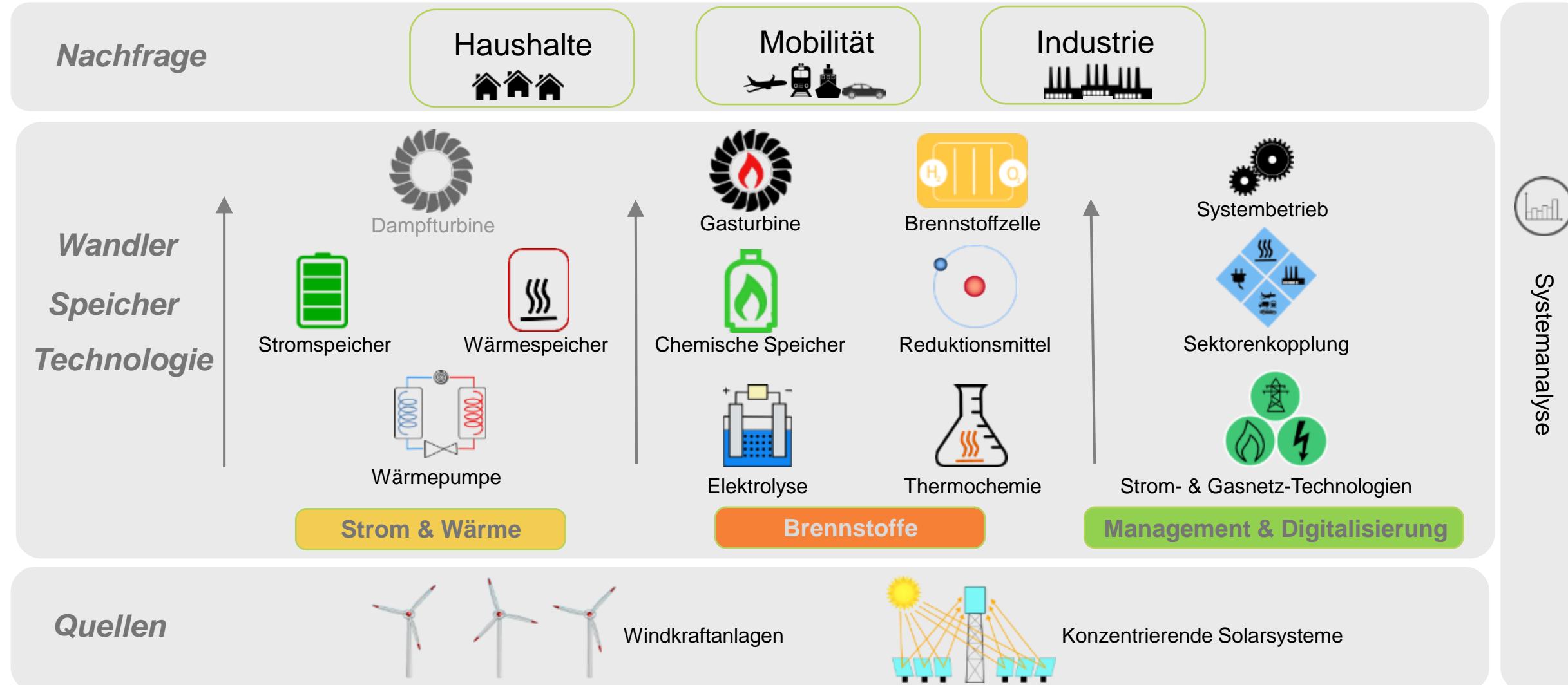
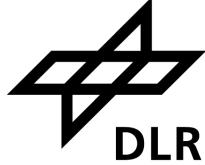


Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how **seiner 55 Institute und Einrichtungen**, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere **10.000 Mitarbeitenden** haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und **entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft**. So tragen wir dazu bei, den Wissens- und **Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken**. Unsere **Forschungsgebiete an über 30 Standorten** in Deutschland und weltweit sind:

- **Luftfahrt**
- **Raumfahrt**
- **Energie**
- **Verkehr**
- **Sicherheit**
- **Digitalisierung**



DLR Energieforschung: regelbare nachhaltige Energie



Institut für Solarforschung - Strategische Ausrichtung

Forschungsfelder



Strom



Konzentrierende Solarsysteme

- Technologien für 3. Generation
- Nachweis im Gesamtsystem
- Autonomer Betrieb

Wärme



Chemische Energieträger



Energiesystem



Versorgung der Industrie

- **Referenzkonzepte für die Wärmeversorgung von Industrieanlagen**
- **Detaillierte Auslegungs- und Betriebsoptimierung**
- Kollektorkonzepte mit besseren Flächennutzung

Defossilisierung der Chemieindustrie

- **Auf Nachhaltigkeit optimierte Prozessführung**
- Mess-, Steuerung- und Regelung hybrider Erzeugungsanlagen

Ressourcen und Bedarfe

- Nowcasting Systeme für die Prognose der dezentralen Netzeinspeisung
- Methoden und Sensorik zur multi-kriteriellen Technikbewertung für Gebäude und Quartiere

Abteilung Nachhaltige Systemverfahrenstechnik

Transformationspfade für CO₂-freie Industriestandorte



Komplexe Energieversorgungslösungen für industrielle Kunden

Kontakt:
dlr.de/sf/nsv

Dr.-Ing. Jana Stengler
Abteilungsleiterin Nachhaltige Systemverfahrenstechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Solarforschung
Im Langenbroich 13, 52428 Jülich

Wir bringen angewandte Forschung in die Umsetzung – zur resilienten Versorgung industrieller Produktionsanlagen mit nachhaltiger Prozesswärme und erneuerbarem Strom.

- **Defossilisierung von Produkten & Prozessschritten**
Elektrifizierung und Entwicklung neuer Produktionsverfahren,
techno-ökonomische Machbarkeitsstudien
- **Konzeption & Betrieb von Versuchsanlagen**
Scale-up aus dem Labor- in den Großanlagenmaßstab
- **Prozessintegration durch digitale Zwillinge**
Thermodynamische Auslegung, dynamische
Anlagenmodelle, vorhersagegestützte
Betriebskonzepte



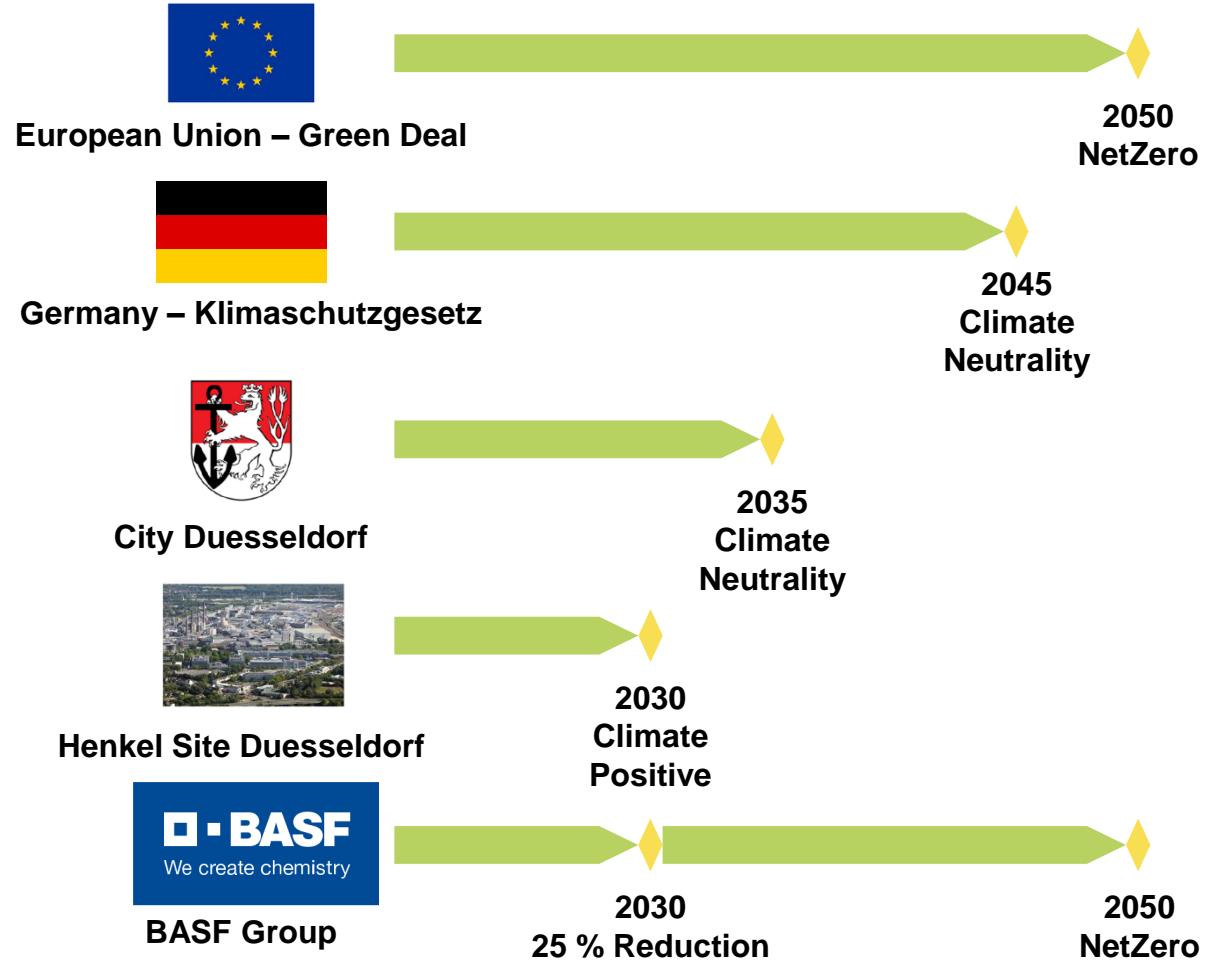
Motivation und Überblick über das Projekt StoREN

Motivation

Chemiesstandort Düsseldorf-Holthausen mit Kraftwerk



NetZero Roadmaps Stakeholders



StoREN – Projekt Übersicht



- Gesamtziel: **Entwicklung und Demonstration einer CO2-freien Strom- und Wärmeerzeugung im Industriepark Holthausen** durch Elektrifizierung (Power-to-Heat und thermische Speicherung) und den Einsatz CO2-freier Brennstoffe.
- Schwerpunkt ist der **Umbau des bestehenden Industriekraftwerks** in Holthausen zu einem **CO2-freien Wärmekraftwerk**.
- Um die Projektrisiken zu minimieren, wurden **2 Phasen** definiert:
 - Phase 1: **Nachweis der technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit** → abgeschlossen
 - Phase 2: Demonstration → in Vorbereitung, Finanzierung erforderlich
- Phase 1: **verschiedene Konzepte** zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen **entwickelt und analysiert**, die auf der Grundlage von **thermischen Speicherkraftwerken und anderen innovativen Technologien** definiert wurden.
- Schwerpunkt lag dabei auf der Sicherstellung der **kurzfristigen Umsetzbarkeit** und **Finanzierbarkeit** trotz des innovativen Einsatzes von Technologie.
- **Hauptziele für die Energieversorgung** sind **CO2-Neutralität, Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit** und eine gute Planungssicherheit für die Zukunft (**Resilienz**).

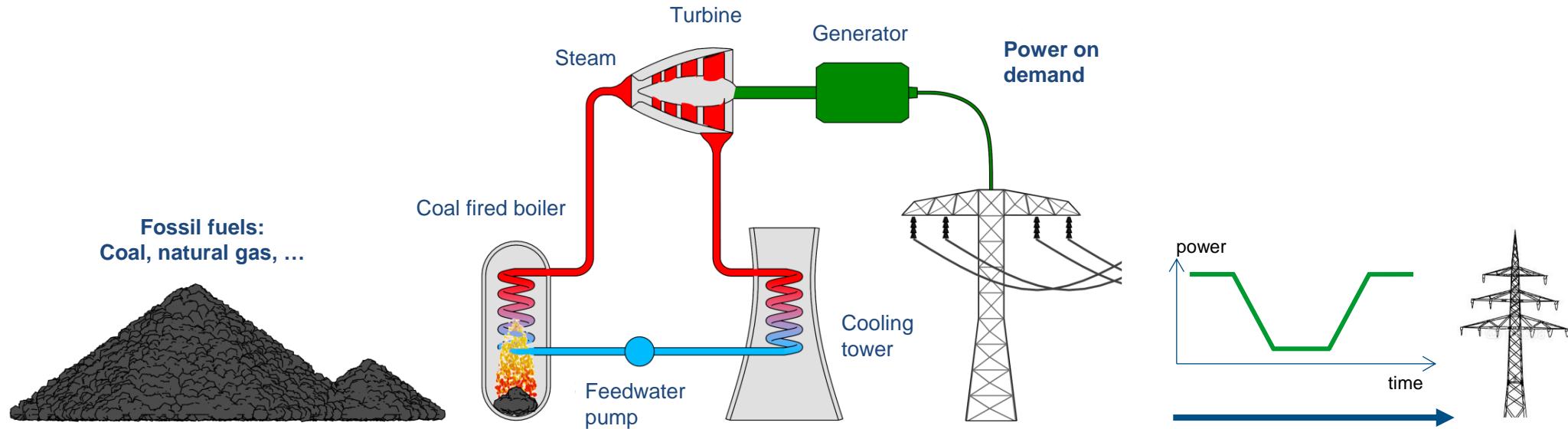
Vorhaben	StoREN – Phase 1 Dekarbonisierung der <u>Strom-</u> und <u>Wärmeerzeugung</u> mit Erneuerbaren im Industriepark Holthausen mit Wärmespeicherkraftwerken und anderen innovativen Technologien
Laufzeit	01.01.2023 bis 31.12.2023
Autoren des Berichts:	Arnulf Reitze ¹ , Stefano Giuliano ² , Gerrit Koll ² , Christiane Glasmacher-Remberg ¹ Eike Mahnke ¹ , Michel Pepers ¹ , Judith Jäger ² , Martin Bolten ² , Michael Dragovic ³ , Frank Thom ³ , Manja Ostermann ³ , Philipp Pötzsch ³ , Daniel Meierhöfer ³ , Michael Roling ³
Förderung	¹ BASF, ² DLR, ³ Henkel EFO 0187A, EFO 0187B Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

Projekt Bericht:
<https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A189935302X/StoREN-Phase-1-Dekarbonisierung-der-Strom-und-W%CC%44rmeerzeugung>



Was ist ein Wärmespeicherkraftwerk (WSK)/ Carnot Batterie?

Ausgangspunkt: Fossil befeuertes Kraftwerk

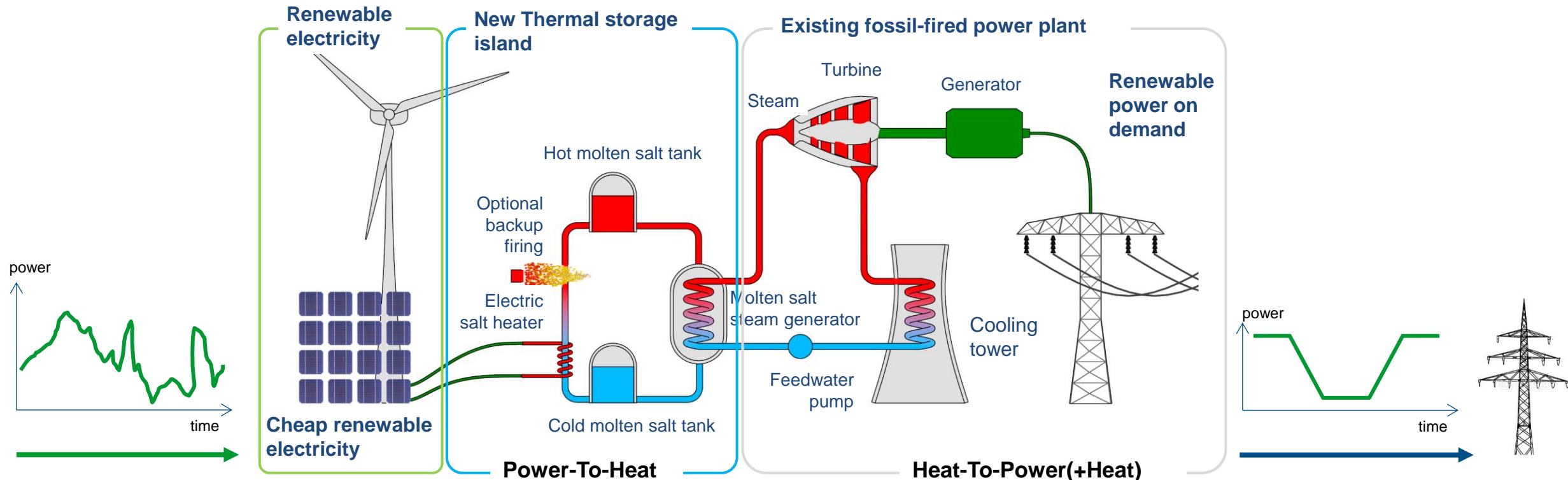


- Wege zur Dekarbonisierung:
 - Elektrifizierung mit grünem Strom
 - Brennstoffwechsel auf grüne Brennstoffe
 - Solarthermie
 - Kombinationen → Hybrid

Das ist ein WSK / Carnot Battery!

GuD oder Dampfkraftwerk + Power-To-Heat + Speicher

→ Weiterentwicklung: Erneuerbares, grundlastfähiges Kraftwerk



Fluctuating renewable power generation from solar, wind etc.



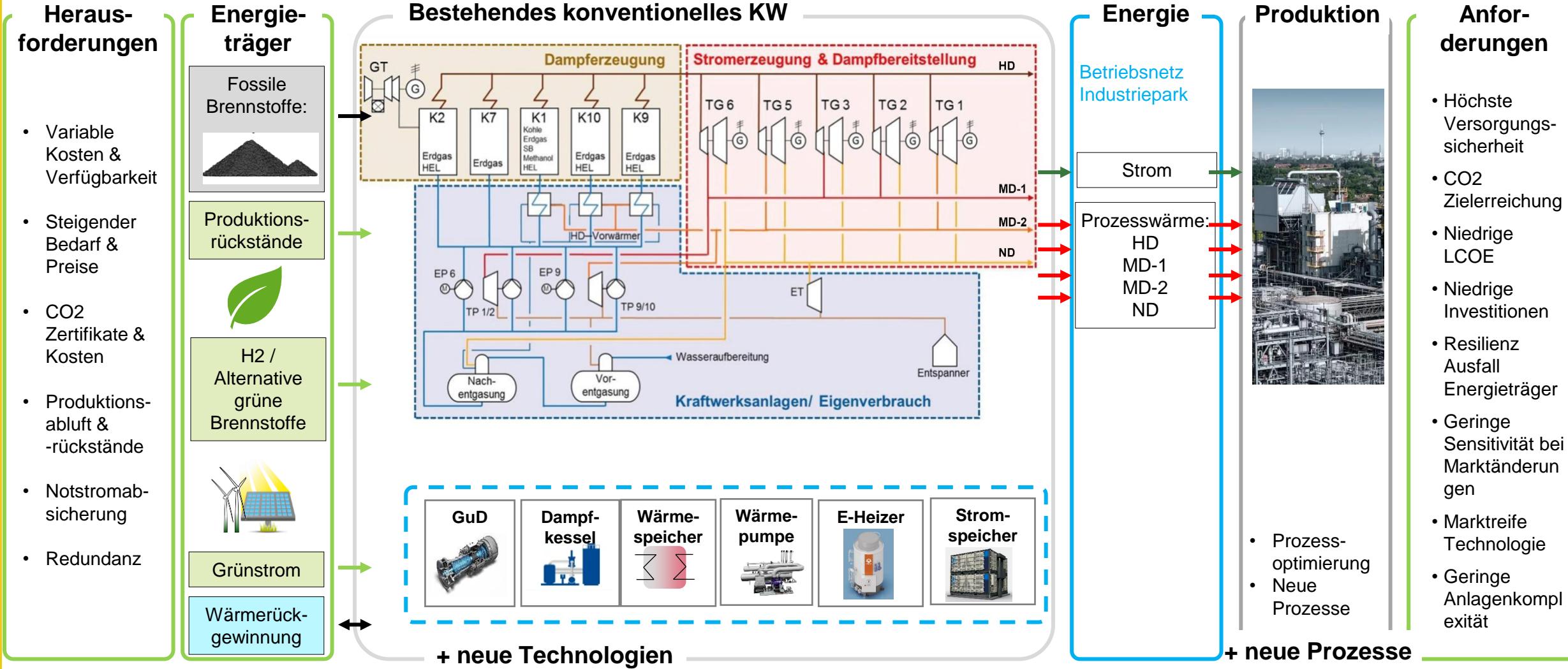
Fluctuating renewable power is stored in thermal energy storage



Renewable power on demand (depending on storage size)

Konzepte, Rahmenbedingungen und Methodik

Dekarbonisierung der Energieversorgung eines Industrieparks



Quelle Bestandskraftwerk: Nina Wolter, Thomas Zekorn, Matthias Neef: Ermittlung und Prognose von Jahres-Energiebilanzen mit Hilfe stationärer thermodynamischer Prozesssimulations am Beispiel eines Industriekraftwerks, BWK – Das Energie-Fachmagazin 6/2016

Konzepte des Energiesystems

Für die schrittweise Analyse der Konzepte für die Transformation des bestehenden Kraftwerks wurden zwei Gruppen definiert:

1. **Monoenergetische Konzepte:** Diese Konzepte sind dadurch gekennzeichnet, dass nur ein Energieträger und ein Technologiepfad zum Einsatz kommt.
2. **Hybride Konzepte:** Diese Konzepte sind dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Energieträger und/oder mehrere Technologiepfade zu einer optimalen Gesamtanlage kombiniert werden.

Existing	Mono-energetic concepts									
B1	M0	M1	M2	M3	M4a	M4b	M5	M6	M7	
Nat.Gas CC	Nat.Gas CC	Biogas CC	H2 CC	Syngas CC	Synfuel CC	Biodiesel CC	Biomass ST	Electr. E-Boiler	Electr. ST + E-Heater + HT-Storage (CarnotBat)	

Referenz

Brennstoffwechsel

Elektrifizierung

Hybrid concepts																
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17
Nat.Gas CC	Nat.Gas CC	Biogas CC	H2 CC	Biomass ST	Electr. E-Boiler	Electr. E-Boiler	Electr. E-Boiler	Electr. E-Heater + HT-Storage	Electr. E-Heater + HT-Storage	Electr. E-Boiler	Electr. ST + E-Heater + HT-Storage (CarnotBat)	Electr. CC + E-Heater + HT-Storage (CarnotBat)				
Electr.	Electr. +CCS	Electr.	Electr.	Electr.	Nat.Gas	Biogas	H2	Biomass	Nat.Gas	Biogas	Biogas +HP	Nat.Gas	Biogas	H2	Biogas +HP	Biogas

Referenz

Brennstoffwechsel

Elektrifizierung ohne Stromerzeuger (GT, DT)

Elektrifizierung mit Stromerzeuger (GT, DT)

System Modellierung

Eine strukturierte Vorgehensweise für die techno-ökonomische Analyse



Definition of boundary conditions

Conceptual brainstorming

Concepts pre-selection

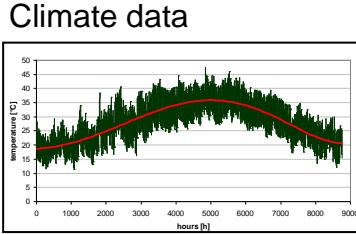
Detailed plant design

(Multi-) annual simulation

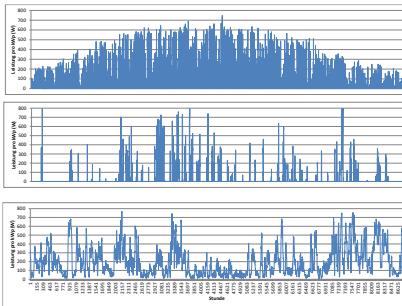
Design optimization

Techno-economic evaluation

Final Assessment and Ranking



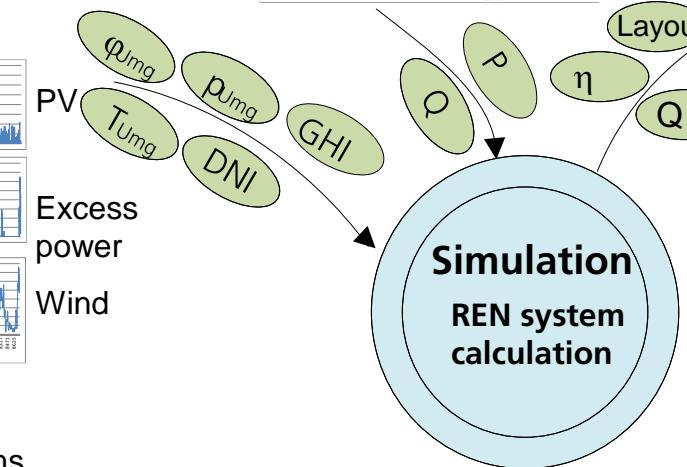
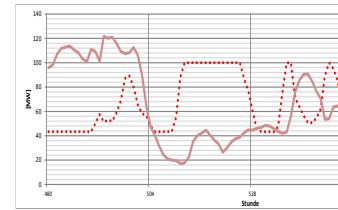
Renewable resource data



Renewable Energy Systems



Load profile



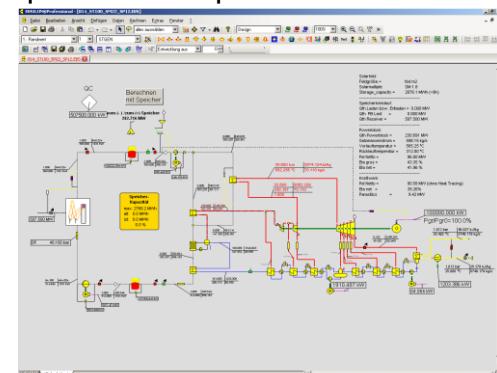
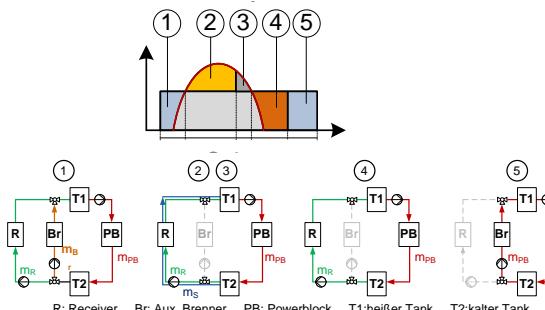
Simulation output

Implementation and coupling of new technologies:

- Thermal Storage
- Battery
- Heat pump
- Heat recovery
- etc.

Epsilon model
Power plant simulation for specific performance points

Operational strategy



Beispiel eines Energiesystem Modells

GuD WSK mit Biogas + Netzstrom: Transformation von 2030 und 2045

Zeitreihen als
Input für Modell:

Grid connection [MW]
→ result

Power supply [GWh_{el}]
→ result
(2030, 2045: HPFC, PPA
Baseload, PPA PAP S,
PPA PAP SW)

Fuel supply [GWh_{th}]
→ result

Production residues
2030: - GWh_{th}
2045: - GWh_{th}

Gas Turbine [MW]
→ result

Steam boiler [MW]
→ result

Electric heater [MW]
→ result

Thermal storage [MWh]
→ result

Steam boiler SB [MW]
→ result

Steam Turbine [MW]
→ result

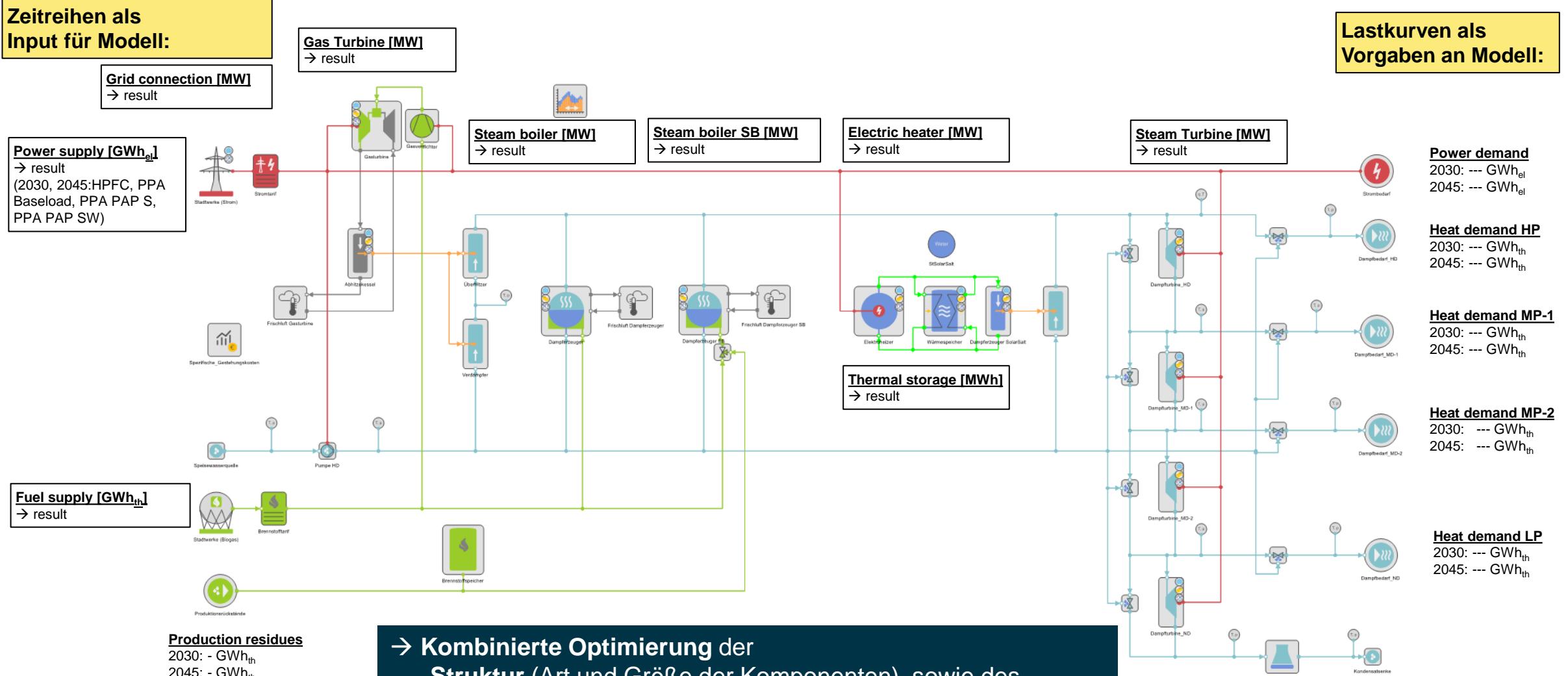
Dampfbedarf HD

Dampfbedarf MD-1

Dampfbedarf MD-2

Dampfbedarf ND

Kondensatservice



→ Kombinierte Optimierung der
Struktur (Art und Größe der Komponenten) sowie des
Betriebs (Auswahl der jeweils günstigsten Prozessführung)

Lastkurven als
Vorgaben an Modell:

Power demand
2030: --- GWh_{el}
2045: --- GWh_{el}

Heat demand HP
2030: --- GWh_{th}
2045: --- GWh_{th}

Heat demand MP-1
2030: --- GWh_{th}
2045: --- GWh_{th}

Heat demand MP-2
2030: --- GWh_{th}
2045: --- GWh_{th}

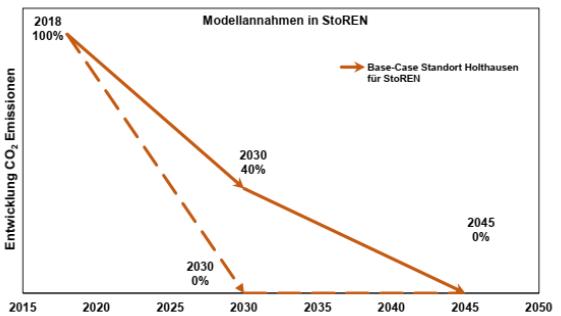
Heat demand LP
2030: --- GWh_{th}
2045: --- GWh_{th}

Spezifikationen und Randbedingungen

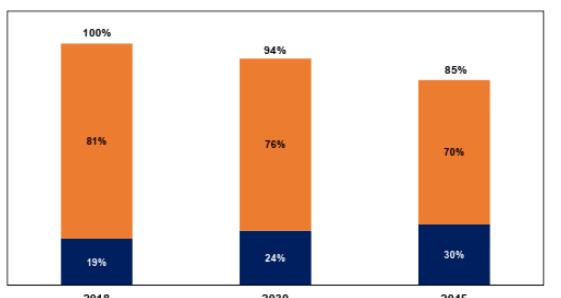
Detailliertes Databook mit allen technischen und wirtschaftlichen Spezifikationen



CO2-Reduktionsziele und Modelljahre: Basis 2018 + 2030 + 2045



Bestandsaufnahme und Bedarfsanalyse im Industriepark Holthausen



+ Lastgänge Dampf- und Strombedarf
2018 sowie 2030 und 2045 (Prognose)

Jährliche Strompreisindizes für Deutschland						
[€/GWh]	2023	2025	2030	2035	2040	2045
Base	102.5	115.6	79.7	89.5	89.9	90.6
Peak	105.7	119.6	85.1	94.6	91.0	87.1
Off-Peak	100.8	113.4	76.8	86.7	89.4	92.5
Avg.	103.3	116.7	81.5	91.6	91.5	91.5

* Als Avg. wird der mit Energierelativen gewichtete Durchschnitt aller stündlichen Preise des jeweiligen Zeitraums ausgewertet.

* Als Q-Avg. wird der mit Energiemengen gewichtete Durchschnitt aller stündlichen Preise des jeweiligen Zeitraums ausgewertet.

toREN Spezifikationen und Rahmenbedingungen (Lastenheft, data book):

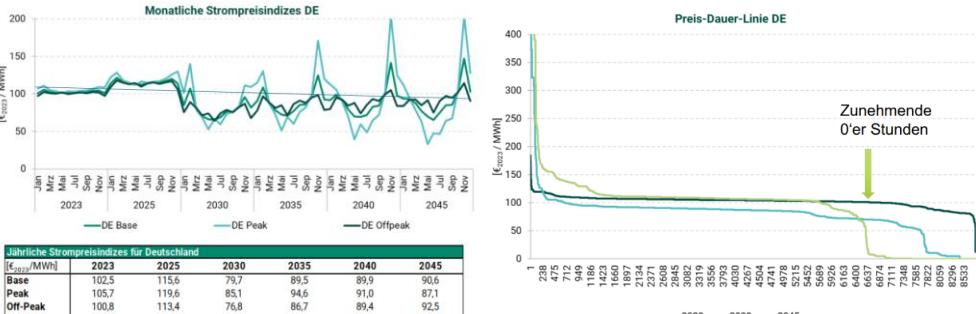
P2: Bedarfsanalyse und Projektrandbedingungen

Inhaltsverzeichnis

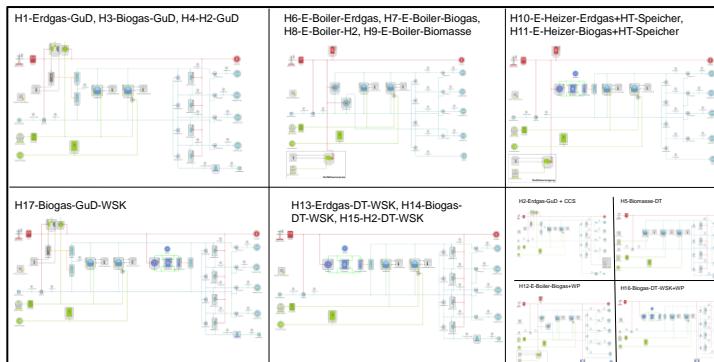
- 0 EINLEITUNG, AUSGANGSSITUATION, ZIEL
 - 1 CO2-REDUKTIONSZIELE UND MODELLIAHRE
 - 2 BESTANDSANLAGE KRAFTWERK HOLTHAUSEN
 - 3 BESTANDSAUFGNAHME UND BEDARFSANALYSE DER PRODUKTIONSANLAGEN IM INDUSTRIEPARK HOLTHAUSEN
 - 1.1 Energiebedarf und Entwicklung
 - 1.2 Technische Randbedingungen
 - 4 ENERGIEMARKTDATEN, -MARKTMODELLE UND -Szenarien
 - 5 ANALYSE HEUTIGER UND ZUKÜNTIGER REGULATORISCHE RAHMENBEDINGUNGEN
 - 1.1 Herkunftsachweis von Strom aus erneuerbaren Energien
 - 1.2 Zielerreichung der Dekarbonisierung des Industriestandorts Holthausen
 - 6 ÜBERSICHT DER VARIANTEN FÜR UMBAUKONZEpte
 - 7 TECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN
 - 1.1 Allgemeines
 - 1.2 Design Point Spezifikationen – Monoenergetische Anlagen
 - 1.3 Design Point Spezifikationen – Hybride Anlagen H1...H9
 - 1.4 Design Point Spezifikationen – Hybride Anlagen H10...H17
 - 8 KOSTEN (CAPEX, OPEX), FINANZPARAMETER UND WIRTSCHAFTLICHKEITSMODELL
 - 1.1 Kostenstruktur
 - 1.2 Kosten (CAPEX, OPEX),
 - 1.3 Energieträger und Energiemarktdataen
 - 1.4 Finanzparameter
 - 9 KOSTENMODELL UND WIRTSCHAFTLICHKEITSKENNZAHLEN
 - 10 BEWERTUNGSKRITERIEN
 - 11 ANHANG: INFORMATIONEN BESTANDSANLAGE

Seite 1 von 59

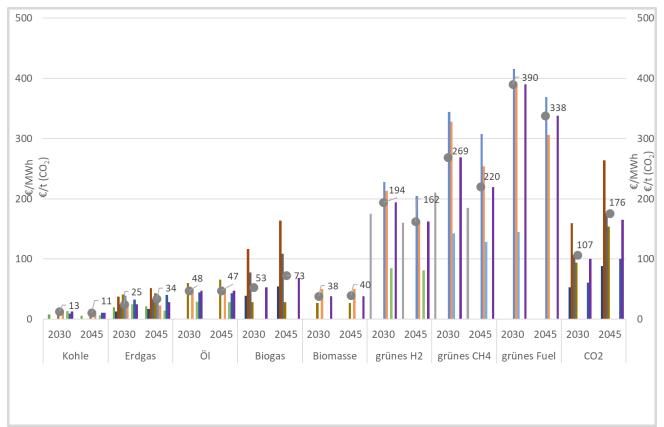
Stromkosten (HPFC, grüne PPA) mit Umlagen, Abgaben und Netzentgelten



**technische und wirtschaftliche
Spezifikationen für jedes Konzept**



Brennstoffkosten, CO₂-Kosten



Preise Energieträger für StoREN

fuel:2030/45

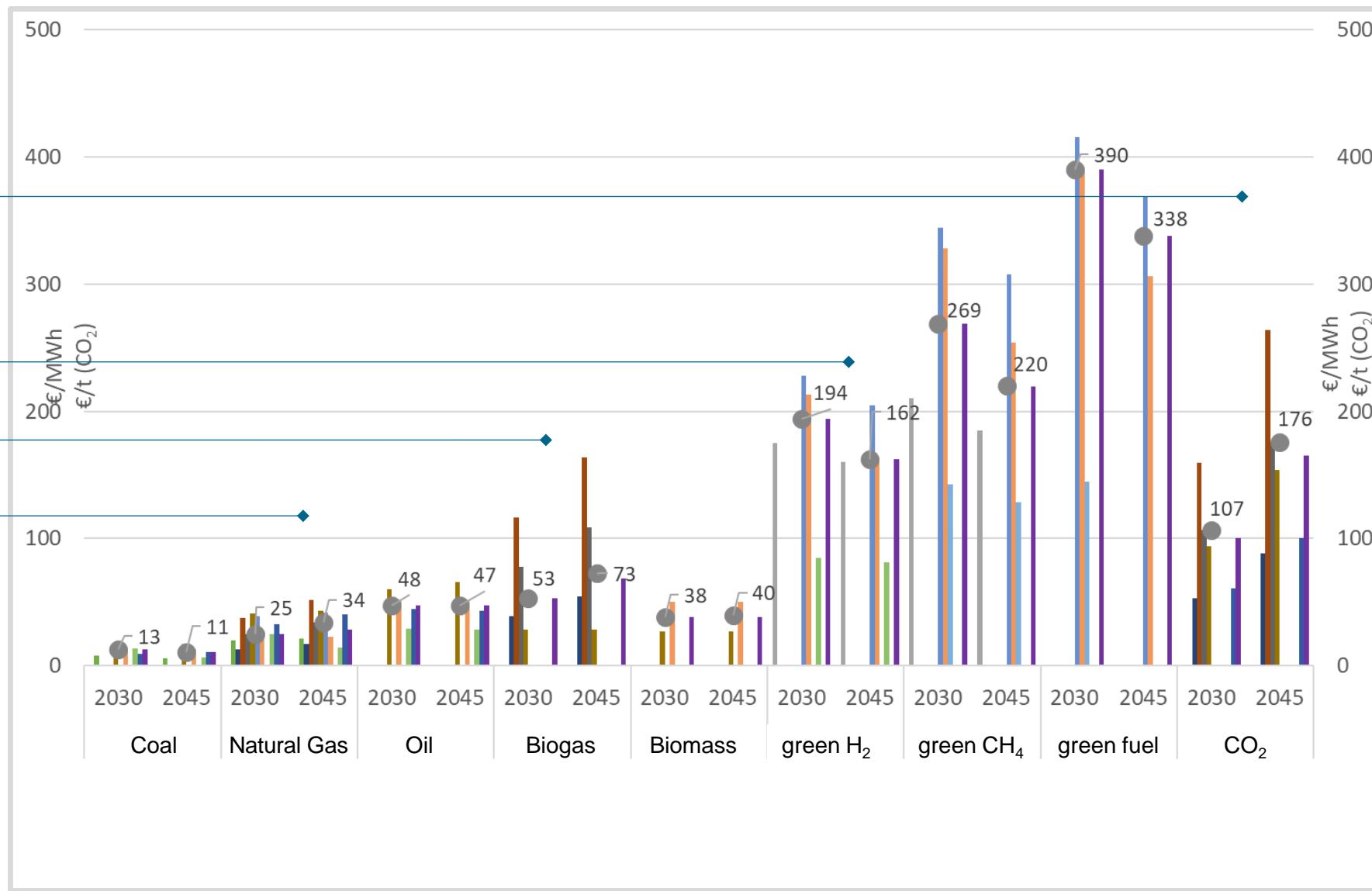
CO₂:107/176 €/t

in €/MWh

green H₂:194/162

Biogas: 53/75

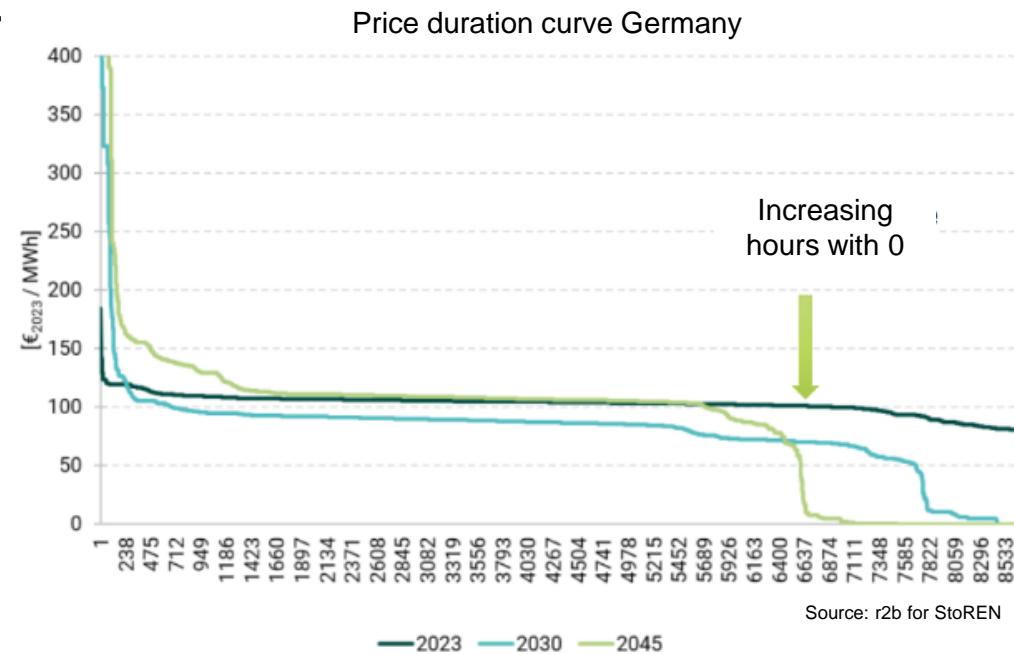
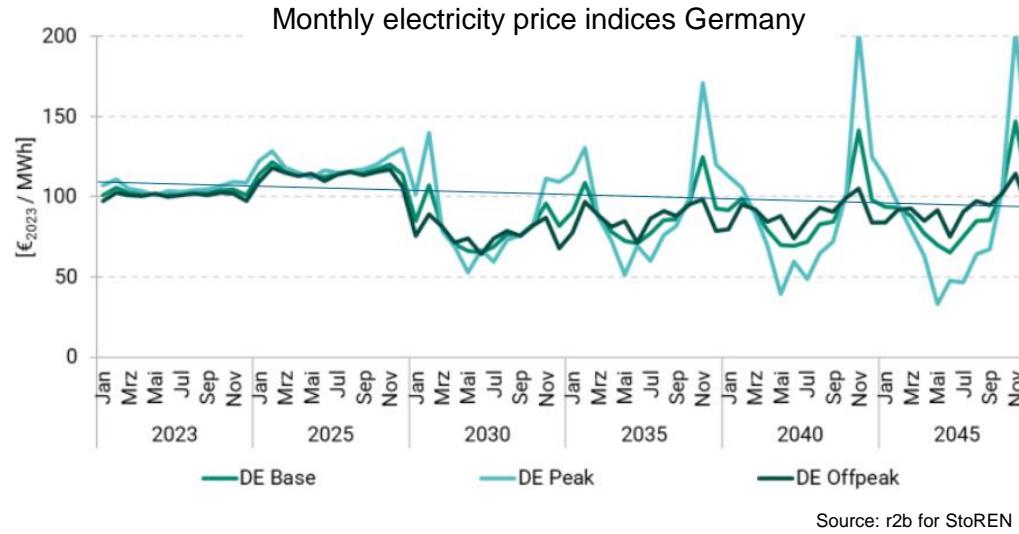
Natural Gas: 25/34



Preise Strom (HPFC day-ahead, Grünstrom PPA) für StoREN



Hourly price forward course (HPFC), day ahead



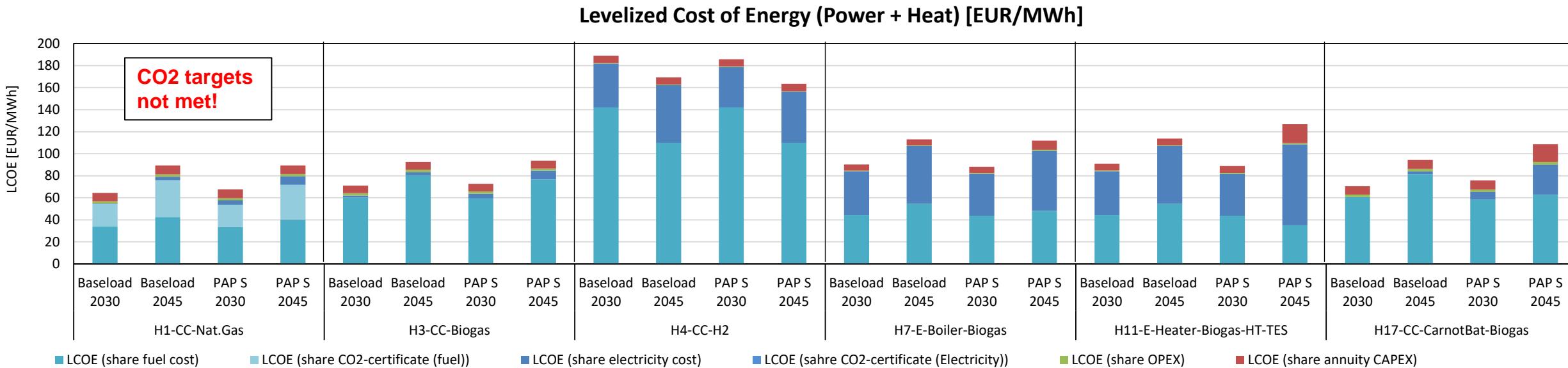
Green Power Purchase Agreement (PPA)

Price component [€ ₂₀₂₃ /MWh]	Solar (large ground-mounted PV)			Combination Wind Onshore, Offshore, large ground-mounted PV		
	2023	2030	2045	2023	2030	2045
Base price	102.50	79.49	90.53	102.50	79.49	90.53
Market value	99.62	55.05	45.00	99.43	63.45	59.43
PPA price pay-as-produced	103.78	57.45	43.31	103.36	65.79	59.55
PPA price baseload	137.41	104.84	116.00	137.17	105.68	117.81

Source: r2b for StoREN

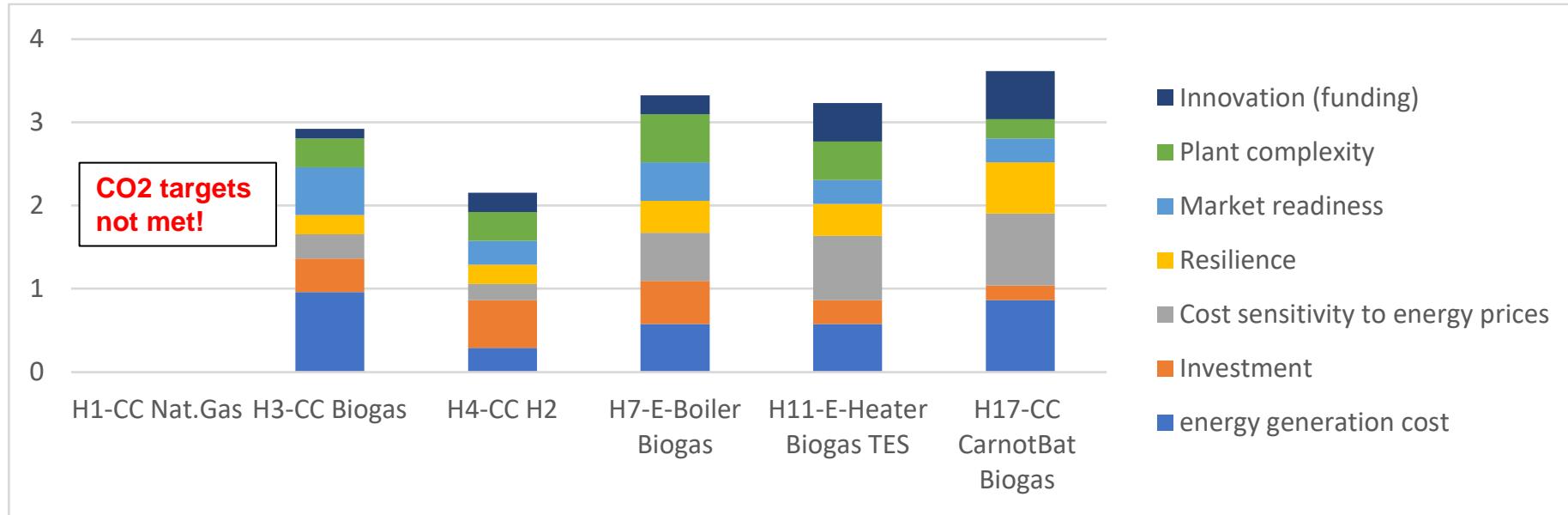
Ergebnisse

Energiegestehungskosten (LCOE) für Hybride Konzepte



- Die Energiekosten (Brennstoff + Strom) überwiegen deutlich zu der Annuität + Betriebskosten
- H1 (Erdgas), H3 (Biogas) und H17 (CarnotBat Biogas) eng beieinander, E-Boiler Varianten etwas dahinter (da keine GT)
- Erdgasbezug (laut Szenarien) am günstigsten, aufgrund der CO2 Kosten allerdings ähnlich Biogas.
- 2030 wird aufgrund der noch niedrigen Brennstoffpreise mehr Brennstoff verwendet, 2045 sinken die Strompreise weiter, daher auch mehr Stromnutzung (bei Konzepten mit E-Boiler/ Elektroerhitzer).
- H4 (Wasserstoff) hat deutlich höhere Erzeugungskosten.

Bewertung und finales Ranking



- Muss-Anforderungen: Einhaltung der CO2-Ziele, Versorgungssicherheit gegeben
- H1 wurde aufgrund nicht einzu haltender CO2-Ziele nicht mit bewertet
- H7, H11 und H17 schneiden am Besten ab und liegen nah beieinander
- H17 ist die am Besten bewertete Variante aufgrund von hoher Resilienz und im Vergleich geringer Kostensensitivität gegen Energiepreisänderung
- H4 aufgrund von hohen Energiegestehungskosten am schlechtesten bewertet

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Es wurden verschiedene Konzepte für die **Defossilierung des Industrieparks Holthausen mit Carnot Batterien und weiteren innovativen Technologien** untersucht.
- Umfangreiche **techno-ökonomische Optimierungen und Parameterstudien** mit verschiedenen Energieträgern wurden für die Modelljahre 2030 und 2045 durchgeführt. Dabei wurde auf die umfangreiche **System- und Modellierungskompetenz aus dem CSP-Bereich** aufgebaut.
- Randbedingungen: begrenzte (2030) und keine (2045) fossilen Brennstoffe wegen CO₂ Erreichung, Zunahme der Volatilität bei Strompreisen, Markt für grüne Brennstoffe angespannt
- **Erdgasvarianten können meist die CO₂-Vorgaben nicht einhalten** oder sind künftig durch CO₂ Kosten unwirtschaftlicher.
- Monoenergetische Konzepte haben bzgl. Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Resilienz keine Vorteile → **Robuste zukünftige Energieversorgungssysteme für die Industrie sind hybride Systeme**, die sowohl **Grünstrom** als auch **grüne Brennstoffe** verwenden.
- Bis 2045 besteht die Stromerzeugung zu über 80% aus **Erneuerbarer Elektrizität** (PV, Wind) und **die Preise werden weiter fallen**. Damit wird Strom zur primären Energieform für die Wärmeversorgung → Für Standorte ohne Möglichkeit der standortnahen Eigenerzeugung ist ein **rascher Netzausbau erforderlich**.
- 3 Konzepte liegen hinsichtlich **LCOE (2030: ~70/ 2045:~90...110 €/MWh)**: deutlich vorne:
 - Biogas GuD ohne Speicher mit Backup (Var. H3) – hohe Abhängigkeit vom Gaspreis
 - E-Boiler in Kombi mit Biogas (Var. H7) - ohne Stromeigenerzeugung
 - Kombination von beidem: GuD – E-Heizer und großer Speicher (Var. H17) -> Kombination beider Vorteile
- Vorzugsvariante H17 (GuD mit Biogas und E-Heizer + thermischer Speicher):
niedrige Energieerzeugungskosten & optimal resilient gegen Marktveränderungen
- Für Industrieparks mit ausreichend Flächen, solaren Ressourcen und geeigneten Temperaturbereichen:
standortnahe Eigenerzeugung mit CSP/ CST berücksichtigen!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt: stefano.giuliano@dlr.de

Vorhaben	StoREN – Phase 1 Dekarbonisierung der Strom- und Wärmeerzeugung mit Erneuerbaren im Industriepark Holthausen mit Wärmespeicherkraftwerken und anderen innovativen Technologien
Laufzeit	01.01.2023 bis 31.12.2023
Autoren des Berichts:	Arnulf Reitze ¹ , Stefano Giuliano ² , Gerrit Koll ² , Christiane Glasmacher-Remberg ¹ Eike Mahnke ¹ , Michel Pepers ¹ , Judith Jäger ² , Martin Bolten ² , Michael Dragovic ³ , Frank Thom ³ , Manja Ostermann ³ , Philipp Pötzsch ³ , Daniel Meierhöfer ³ , Michael Roling ³
Förderung	¹ BASF, ² DLR, ³ Henkel EFO 0187A, EFO 0187B Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen



Projekt Bericht:

<https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A189935302X/StoREN-Phase-1-Dekarbonisierung-der-Strom-und-W%C3%A4rmeerzeugung>

