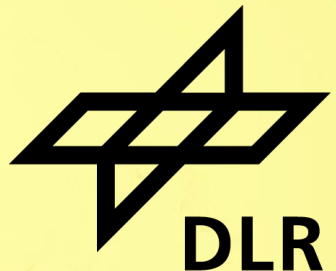


Konzepte zur Defossilisierung der Energieversorgung eines Standortes der chemischen Industrie

Stefano Giuliano

DLR Institut für Solarforschung

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



Agenda

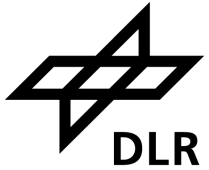
- Das DLR und das Institut für Solarforschung
- Motivation und Überblick über das Projekt StoREN
- Konzepte, Randbedingungen und Methodik
- Ergebnisse
- Schlussfolgerungen



Das DLR und das Institut für Solarforschung

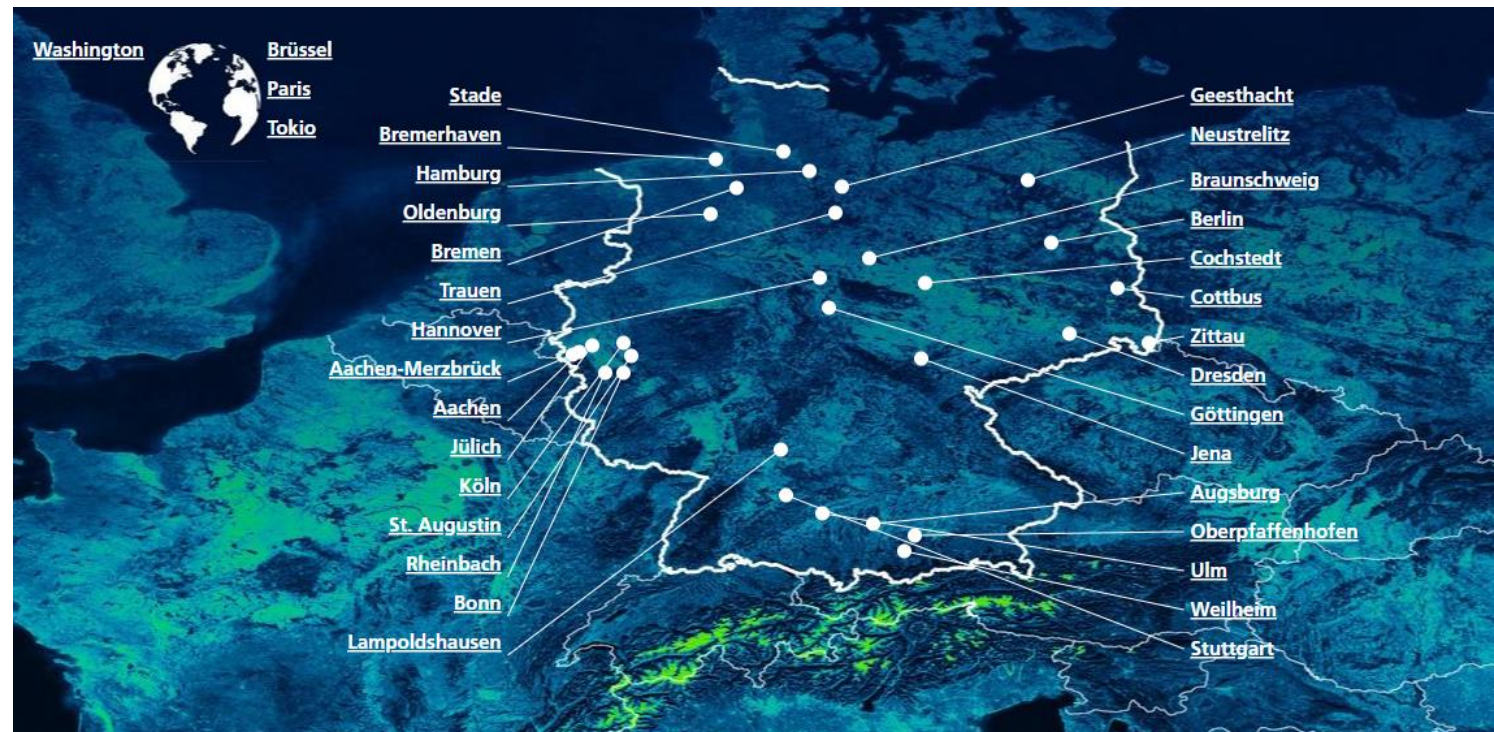
Überblick DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Forschungszentrum + Raumfahrtagentur + Projektträger

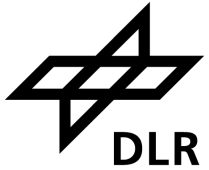


Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how **seiner 55 Institute und Einrichtungen**, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere **10.000 Mitarbeitenden** haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und **entwickeln Technologien 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



Nachfrage

Haushalte



Mobilität



Industrie



*Wandler
Speicher
Technologie*



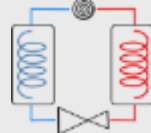
Dampfturbine



Stromspeicher



Wärmespeicher



Wärmepumpe

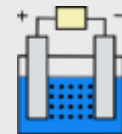
Strom & Wärme



Gasturbine



Chemische Speicher



Elektrolyse

Brennstoffe



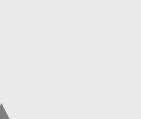
Brennstoffzelle



Reduktionsmittel



Thermochemie



Strom- & Gasnetz-Technologien

Management & Digitalisierung



Systembetrieb



Sektorenkopplung



Systemanalyse

Quellen



Windkraftanlagen



Konzentrierende Solarsysteme

Strom



Konzentrierende Solarsysteme

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

Wärme



Versorgung der Industrie

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

Chemische Energieträger



Defossilisierung der Chemieindustrie

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

Energiesystem

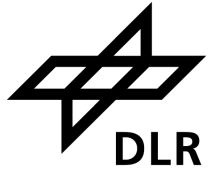


Ressourcen und Bedarfe

- 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.

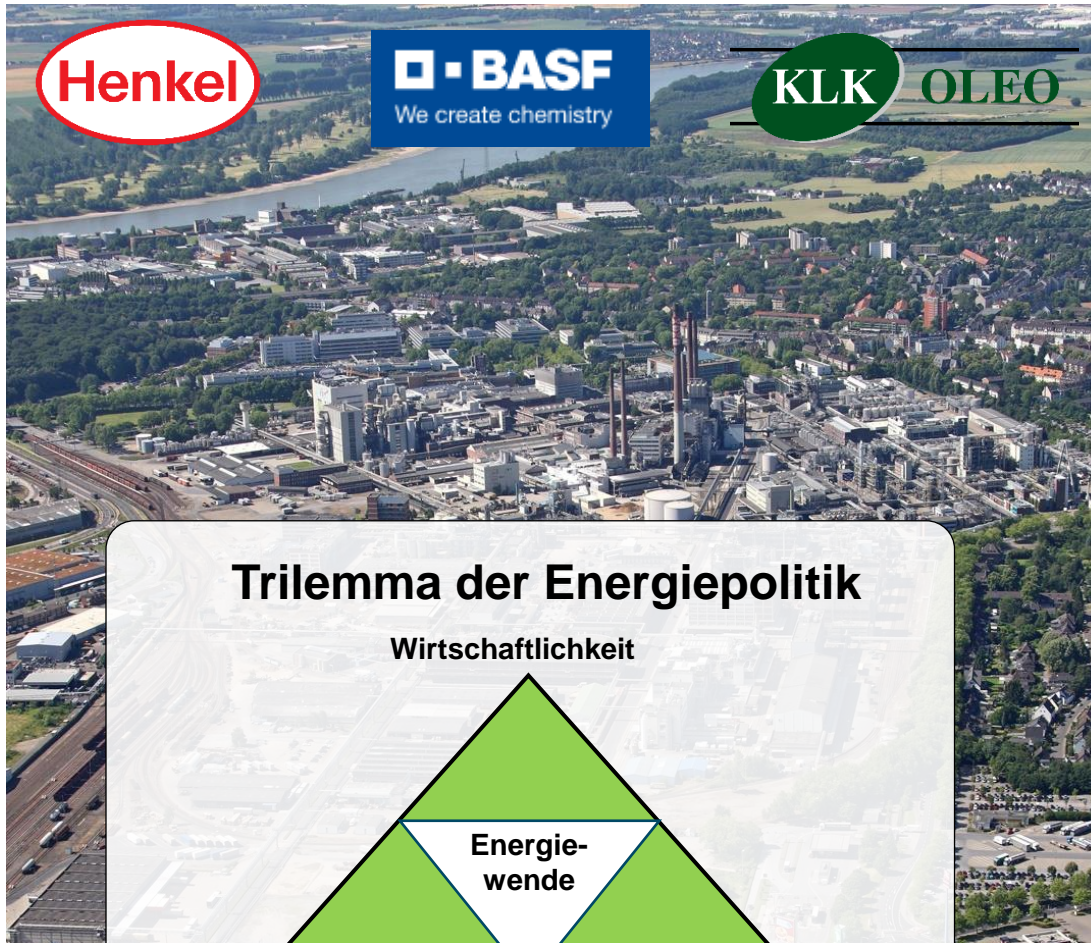
- **Defossilisierung von Produkten & Prozessschritten**
Elektrifizierung und Entwicklung neuer Produktionsverfahren, techno-ökonomische Machbarkeitsstudien
- **Konzeption & Betrieb von Versuchsanlagen**
Scale-up aus dem Labor- in den Großanlagenmaßstab
- **Prozessintegration durch digitale Zwillinge**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



Motivation und Überblick über das Projekt StoREN

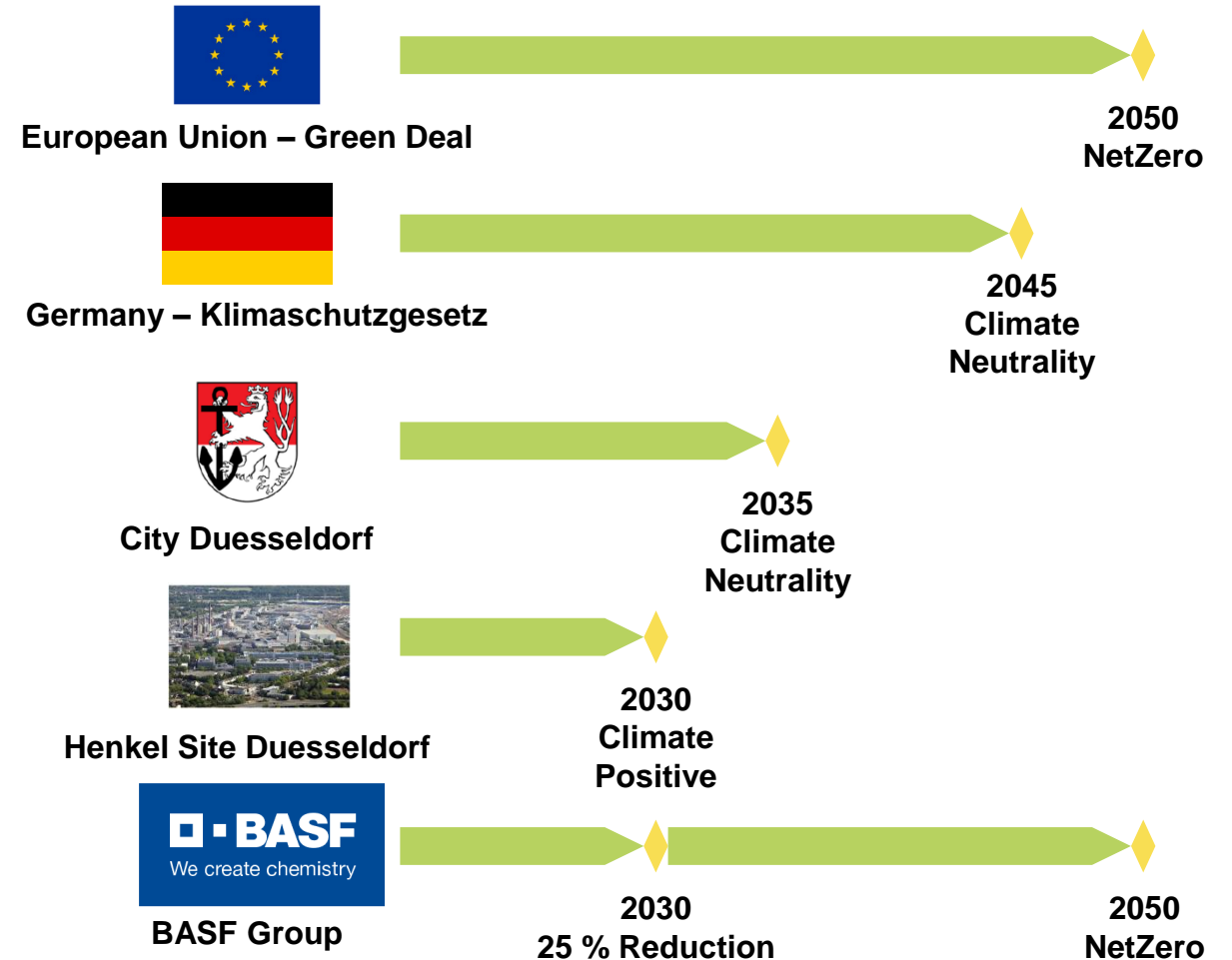
Motivation

Chemiestandort Düsseldorf-Holthausen mit Kraftwerk

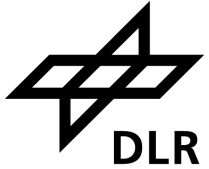


source: BASF


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**).

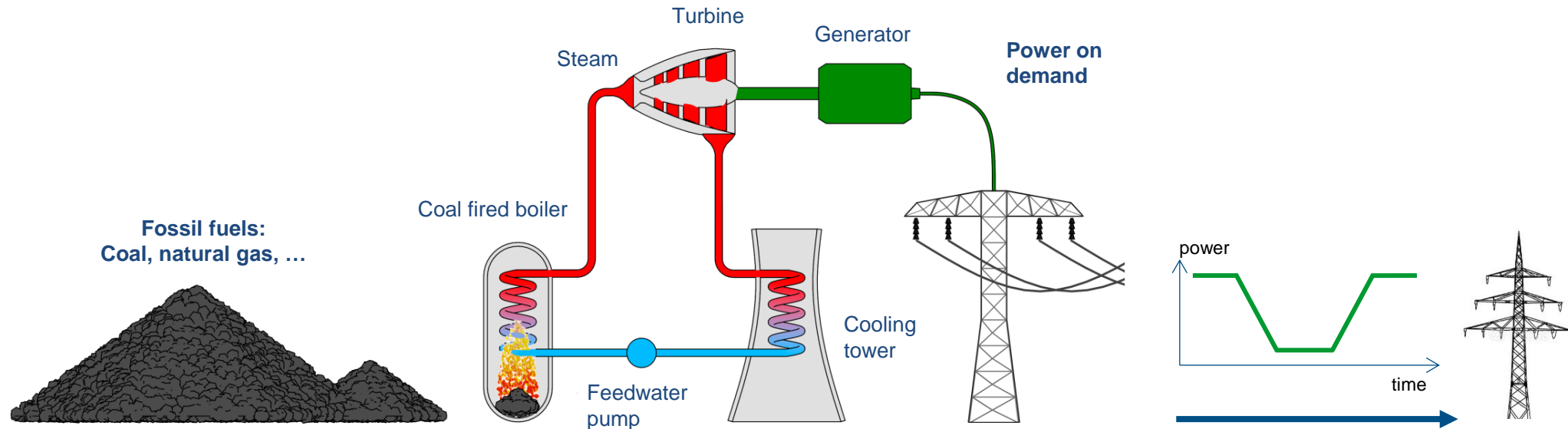
Vorhaben	StoREN – Phase 1 Dekarbonisierung der <u>Strom-</u> und <u>Wärme-</u> erzeugung mit <u>Erneuerbaren</u> im Industriepark Holthausen mit Wärmespeicherkraftwerken und anderen innovativen Technologien
Laufzeit	01.01.2023 bis 31.12.2023
Autoren des Berichts:	Arnulf Reitze ¹ , Stefano Giuliano ² , 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 Pöttsch ³ , Daniel Meierhöfer ³ , Michael Roling ³ ¹ BASF, ² DLR, ³ Henkel
Förderung	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>

Was ist ein Wärmespeicherkraftwerk (WSK)/ Carnot Batterie?

Ausgangspunkt: Fossil befeuertes Kraftwerk

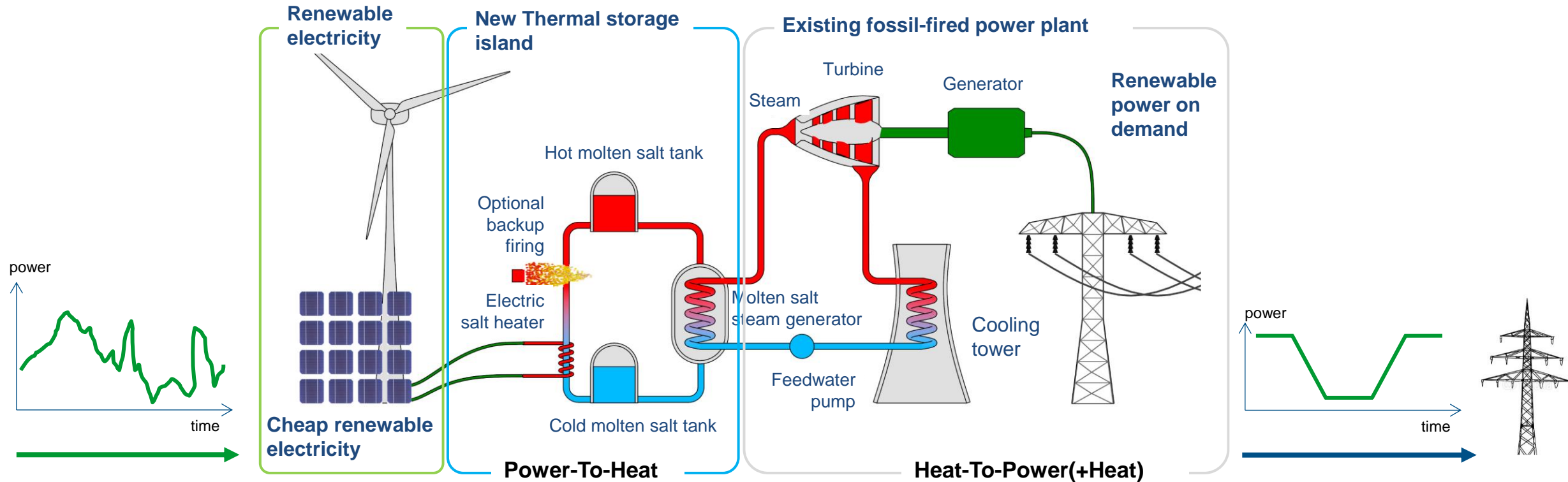


- Wege zur Dekarbonisierung:
 - Elektrifizierung mit grünem Strom
 - Brennstoffwechsel auf grüne Brennstoffe
 - Solarthermie
 - Kombinationen → Hybrid

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.



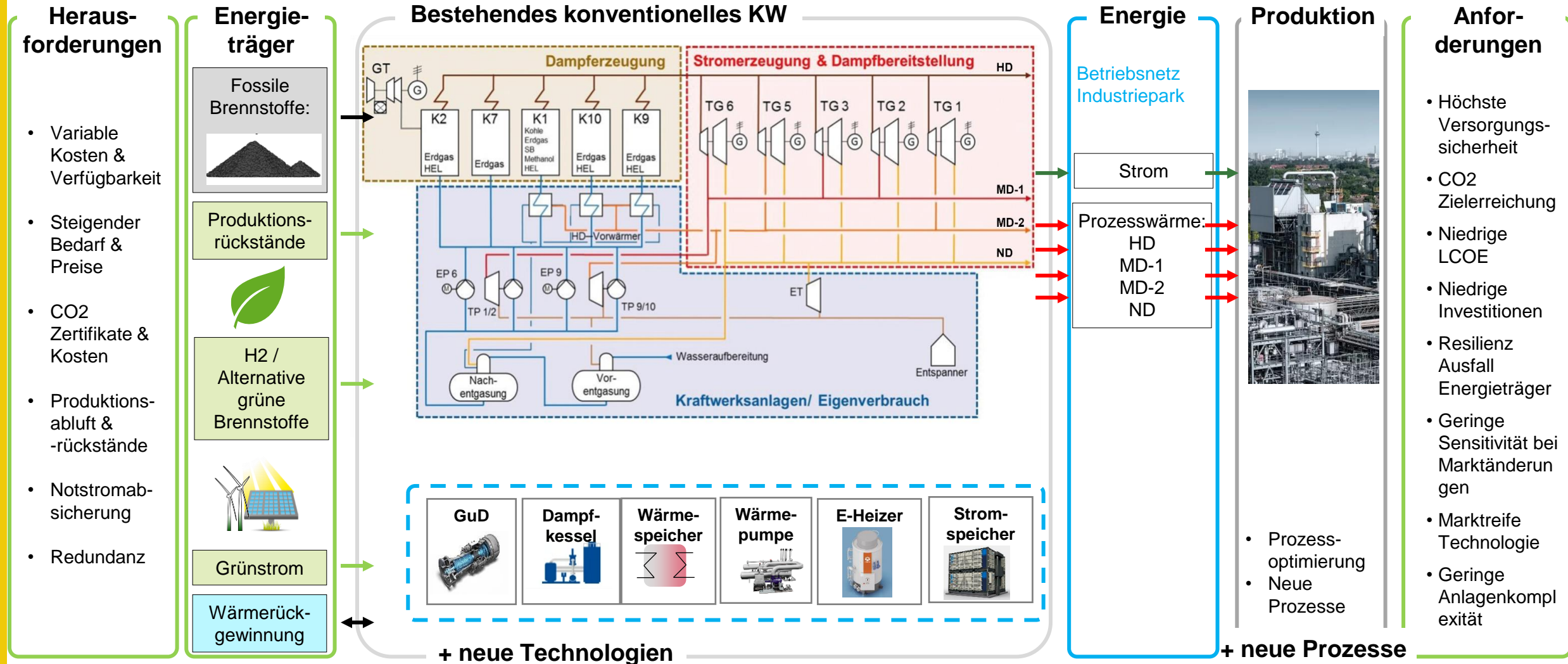
Fluctuating renewable power is stored in thermal energy storage



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 Prozesssimulationen 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-Boiler	Electr. E-Heater + HT-Storage	Electr. E-Heater + HT-Storage	Electr. E-Boiler	Electr. ST + E-Heater + HT-Storage (CarnotBat)	Electr. ST + E-Heater + HT-Storage (CarnotBat)	Electr. ST + E-Heater + HT-Storage (CarnotBat)	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

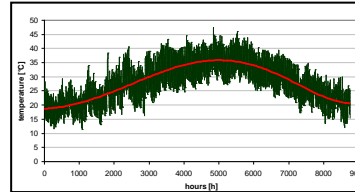
(Multi-) annual simulation

Design optimization

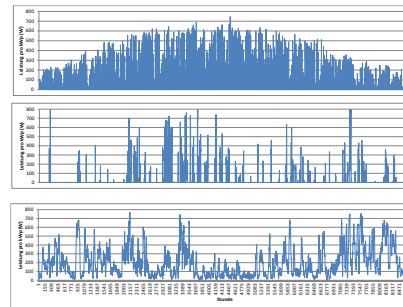
Techno-economic evaluation

Final Assessment and Ranking

Climate data



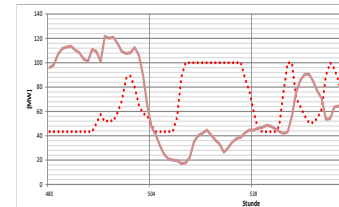
Renewable resource data



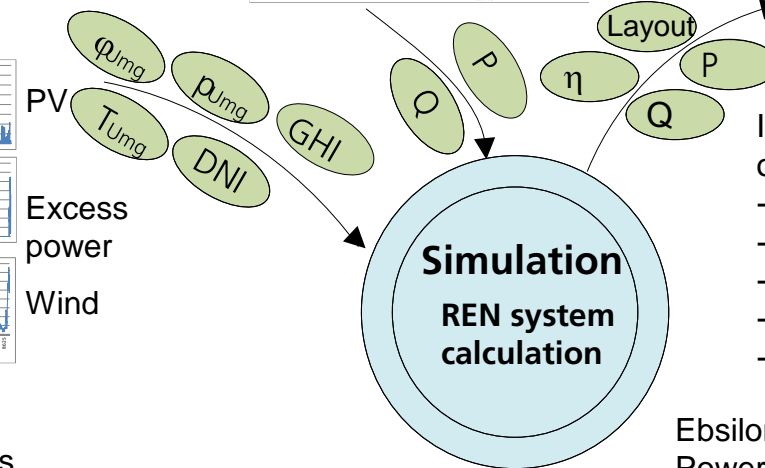
Renewable Energy Systems



Load profile



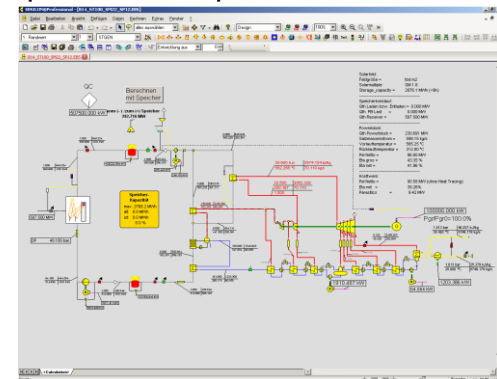
Simulation output



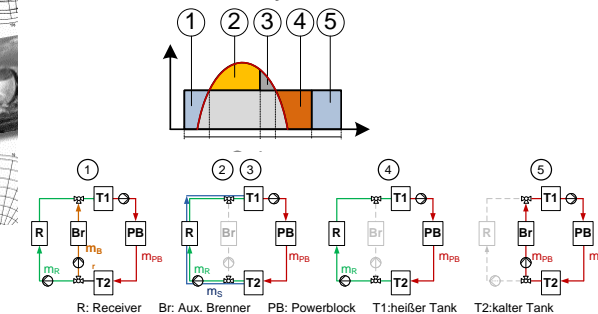
Implementation and coupling of new technologies:

- 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

Gas Turbine [MW]
→ result

Steam boiler [MW]
→ result

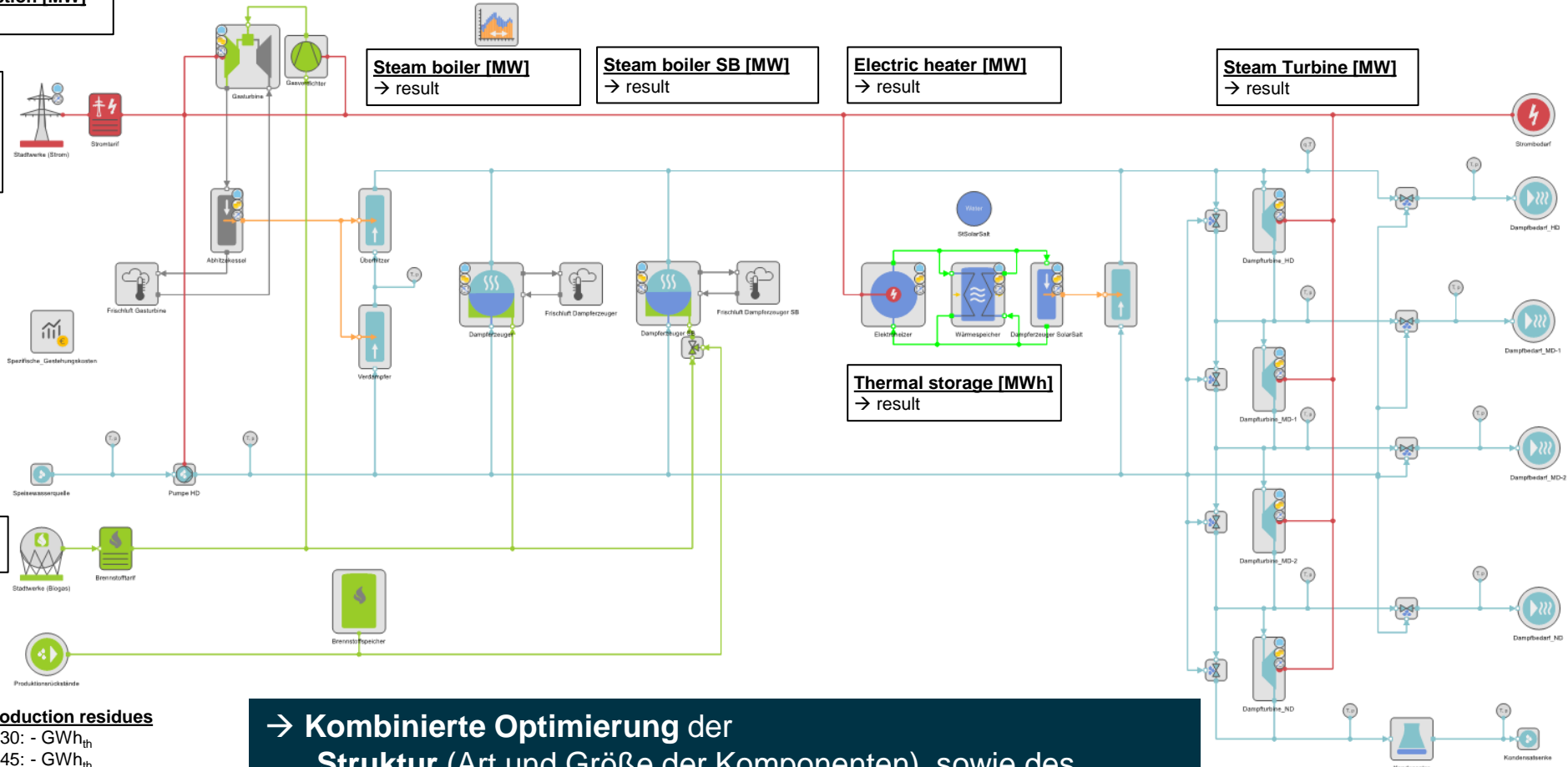
Steam boiler SB [MW]
→ result

Electric heater [MW]
→ result

Steam Turbine [MW]
→ result

**Lastkurven als
Vorgaben an Modell:**

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



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}

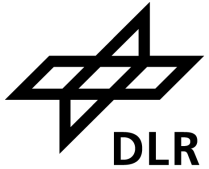
Heat demand LP
2030: --- GWh_{th}
2045: --- GWh_{th}

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

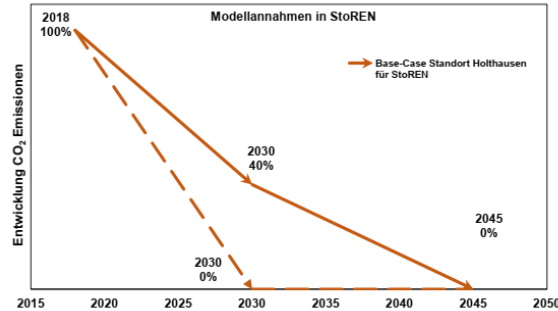
→ **Kombinierte Optimierung der
Struktur** (Art und Größe der Komponenten) sowie des
Betriebs (Auswahl der jeweils günstigsten Prozessführung)

Spezifikationen und Randbedingungen

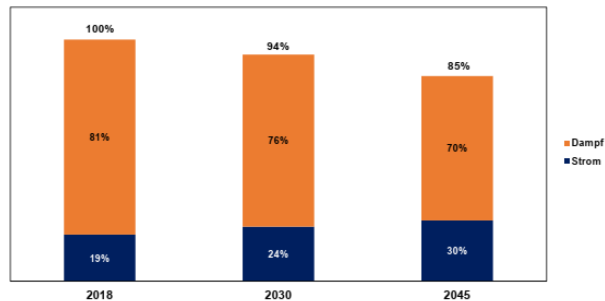
Detailliertes Databook mit allen technischen und wirtschaftlichen Spezifikationen



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



Bestandsaufnahme und Bedarfsanalyse im Industriepark Holthausen



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

StoREN Spezifikationen und Rahmenbedingungen (Lastenheft, data book): AP2: Bedarfsanalyse und Projektanforderungen

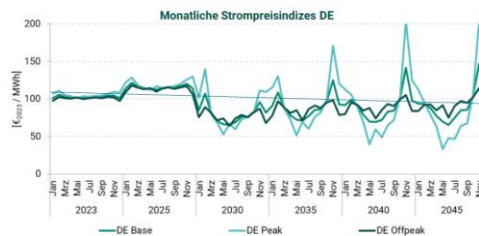
Inhaltsverzeichnis

- 1 EINLEITUNG, AUSGANGSSITUATION, ZIEL
- 2 CO2-REDUKTIONSZIELE UND MODELLJAHRE
- 3 BESTANDSANLAGE KRAFTWERK HOLTHAUSEN
- 4 BESTANDSAUFNAHME UND BEDARFSANALYSE DER PRODUKTIONSANLAGEN IM INDUSTRIEPARK HOLTHAUSEN
 - 4.1 Energiebedarf und Entwicklung
 - 4.2 Technische Randbedingungen
- 5 ENERGIEMARKTDATEN, -MARKTMODELLE UND -SZENARIEN
- 6 ANALYSE HEUTIGER UND ZUKÜNFTIGER REGULATORISCHER RAHMENBEDINGUNGEN
 - 6.1 Herkunftsnachweis von Strom aus erneuerbaren Energien
 - 6.2 Zielerreichung der Dekarbonisierung des Industriestandorts Holthausen
- 7 ÜBERSICHT DER VARIANTEN FÜR UMBBAUKONZEPTE
- 8 TECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN
 - 8.1 Allgemeines
 - 8.2 Design Point Spezifikationen – Monoenergetische Anlagen
 - 8.3 Design Point Spezifikationen – Hybride Anlagen H1...H9
 - 8.4 Design Point Spezifikationen – Hybride Anlagen H10...H17
- 9 KOSTEN (CAPEX, OPEX), FINANZPARAMETER UND WIRTSCHAFTLICHKEITSMODELL
 - 9.1 Kostenstruktur
 - 9.2 Kosten (CAPEX, OPEX),
 - 9.3 Energieträger und Energiemarktdaten
 - 9.4 Finanzparameter
- 10 KOSTENMODELL UND WIRTSCHAFTLICHKEITSKENNZAHLEN
- 11 BEWERTUNGSKRITERIEN
- 12 ANHANG: INFORMATIONEN BESTANDSANLAGE

Stand: 25.10.2023

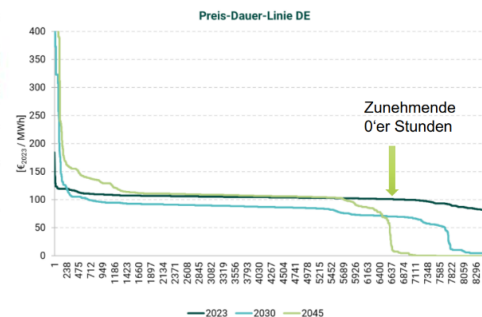
Seite 1 von 59

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

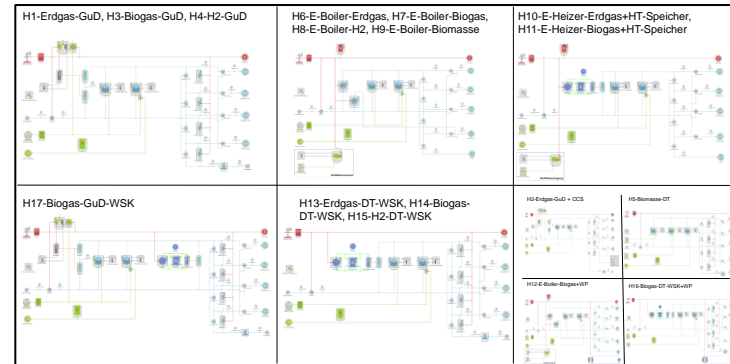


Jährliche Strompreisindizes für Deutschland	2023	2025	2030	2035	2040	2045
Base	102,5	115,6	79,7	89,5	89,9	90,6
Peak	108,7	119,6	85,1	94,6	91,0	87,1
Off-Peak	100,8	113,4	76,8	86,7	89,4	92,5
Q-Avg.*	103,3	116,7	81,5	91,6	91,5	91,5

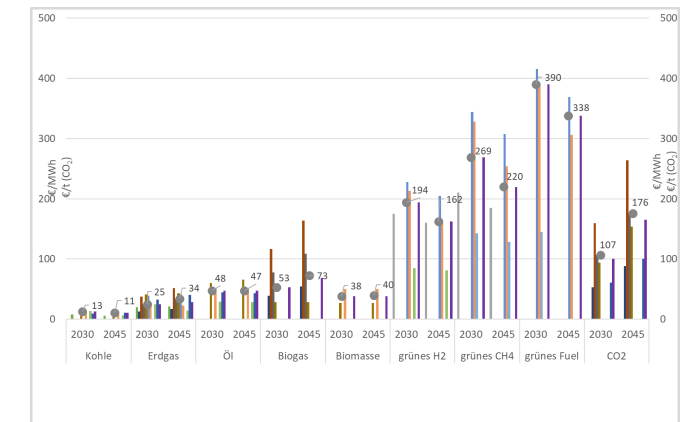
* Als Q-Avg. wird der mit Energiemengen gewichtete Durchschnitt aller stündlichen Preise des jeweiligen Zeitraums ausgewertet.



technische und wirtschaftliche Spezifikationen für jedes Konzept



Brennstoffkosten, CO2-Kosten



Preise Energieträger für StoREN



fuel:2030/45

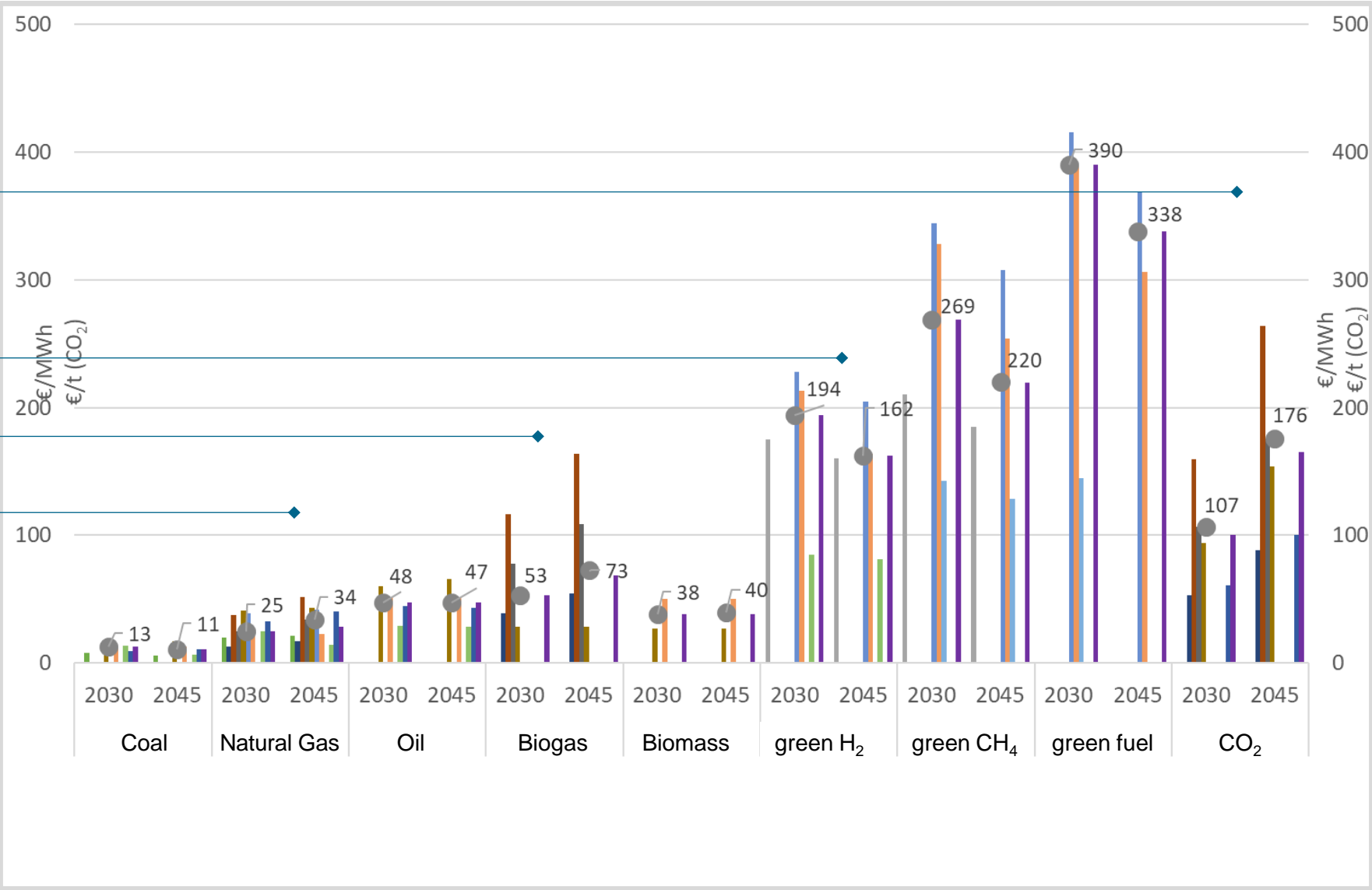
CO₂ :107/176 €/t

in €/MWh

green H₂:194/162

Biogas: 53/75

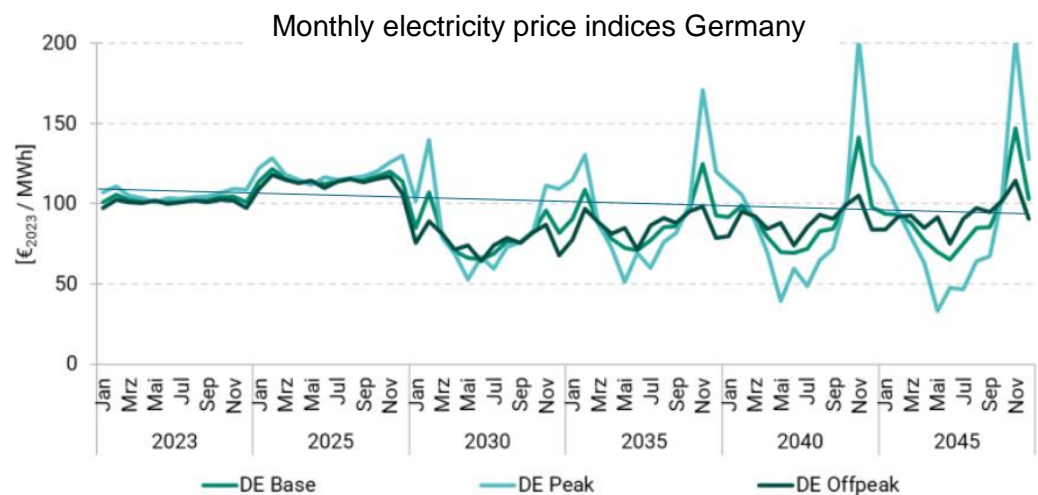
Natural Gas: 25/34



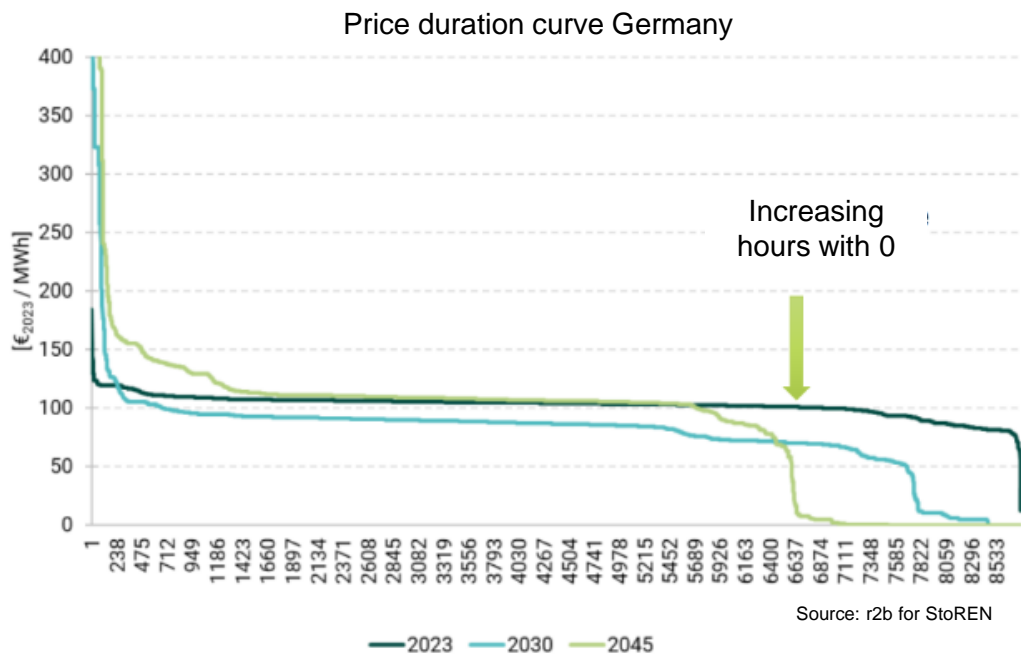
Preise Strom (HPFC day-ahead, Grünstrom PPA) für StoREN



Hourly price forward curve (HPFC), day ahead



Source: r2b for StoREN



Source: r2b for StoREN

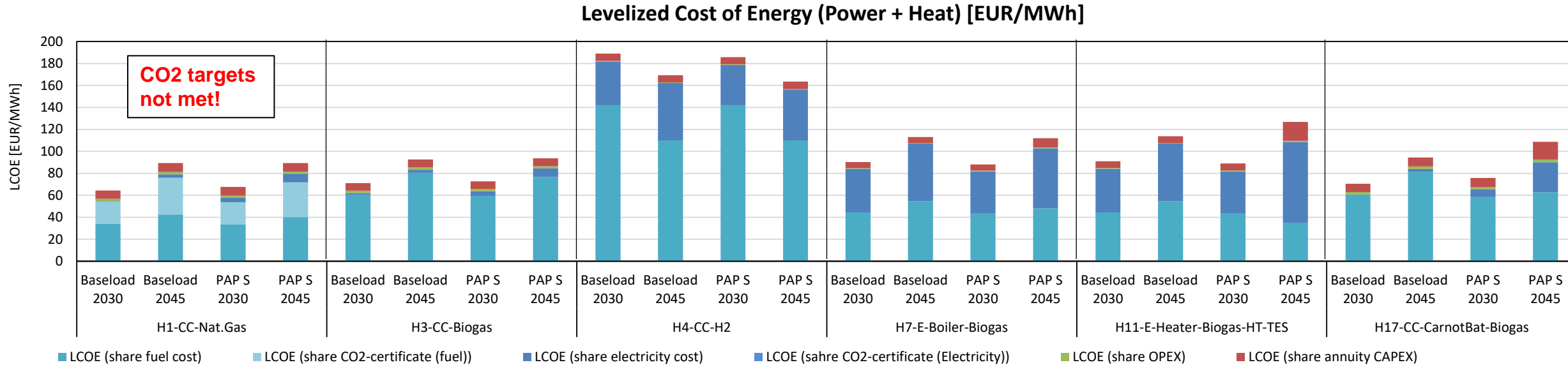
Green Power Purchase Agreement (PPA)

	Solar (large ground-mounted PV)			Combination Wind Onshore, Offshore, large ground-mounted PV		
Price component [€/2023/MWh]	2023	2030	2045	2023	2030	2045
Base price	102.50	79.49	90.53	102.50	79.49	90.53
Market value	99.62	55.95	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

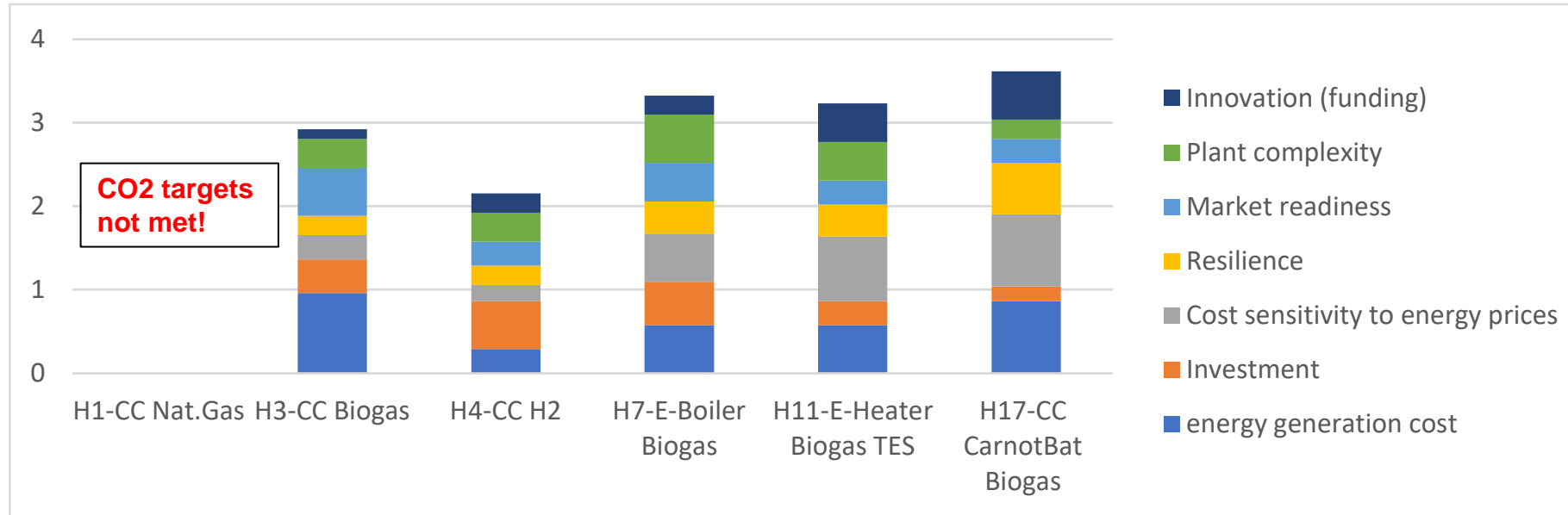
Ergebnisse

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 einzuhaltender 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

- 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 <u>Strom-</u> und Wärme- erzeugung 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 ¹ BASF, ² DLR, ³ Henkel
Förderung	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>

