



Zur Wirtschaftlichkeit von solarer Prozesswärme

Beiträge zur Wärmewende

BSW-Webinar: Dekarbonisierung der Industrie mit Solarer Prozesswärme
Im Rahmen der Woche der Wärme

Dr.-Ing. Gregor Bern
28.11.2024
www.ise.fraunhofer.de

Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem

Studie zu Energiesystemszenarien

Thelen, C., Nolte, H., Kaiser, M., Jürgens, P., Müller, P., Senkpiel, C., Kost, C.
„Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Bundesländer im Transformationsprozess“,
2024, Fraunhofer ISE.
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>



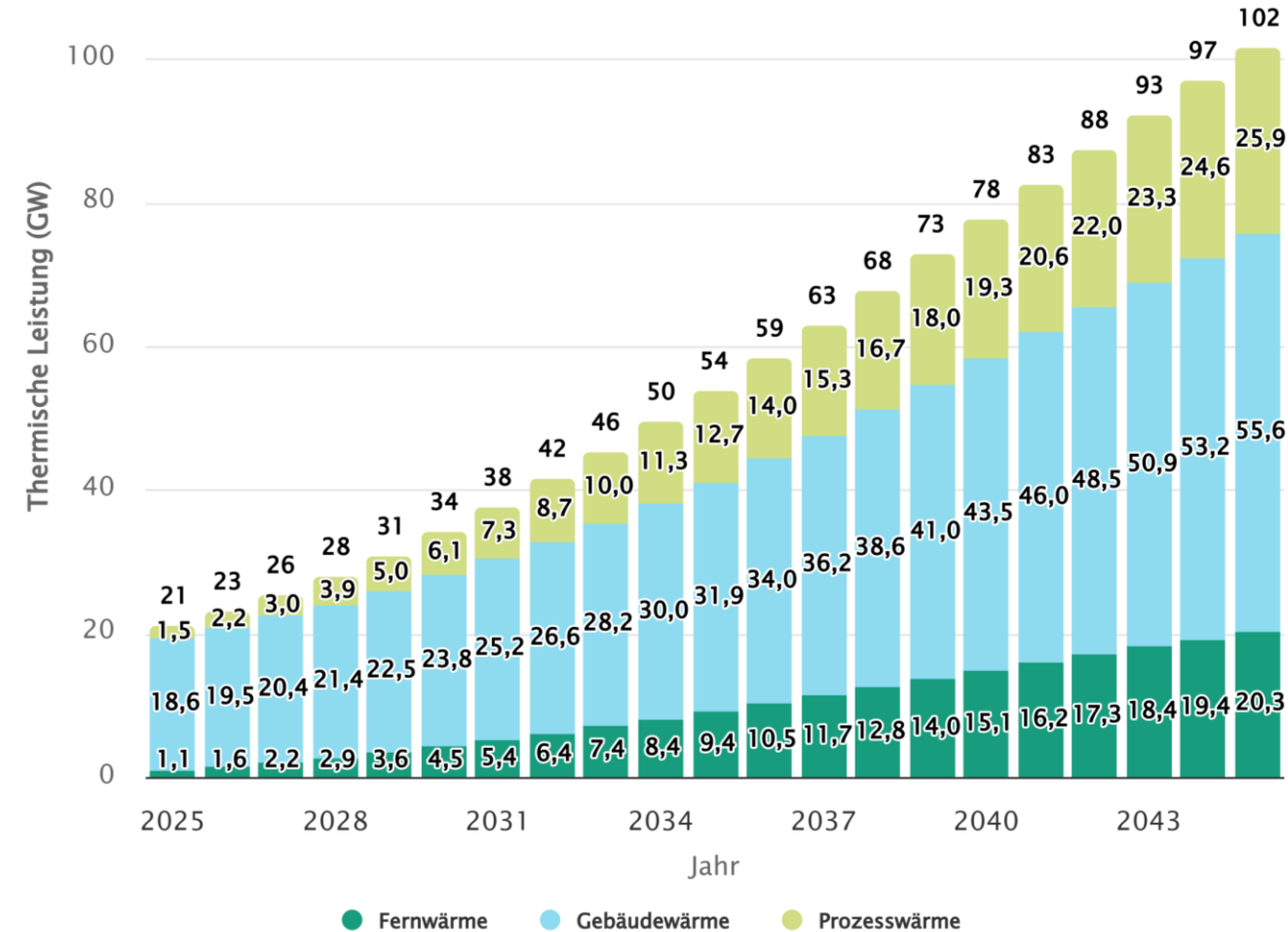
Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem

Studie zu Energiesystemszenarien

Solarthermie, Szenario Robust

Präzise modellgestützte techno-ökonomische Optimierung für Transformationspfade:

- Verbraucher und Quellen
- Energiesystemkomponenten & Austausch
- Regionale Verteilung und Wetterbedingungen
- Mathematische Optimierung:
Minimierung der Gesamtkosten bei strikten Treibhausgas-Reduktionsziele
(jährlich; Klimaneutralität bis 2045)
- 4 Szenarien:
Technologieoffen, Effizienz, Beharrung, Robust



Energy Charts: <https://www.energy-charts.info/>



Zur Wirtschaftlichkeit von solarer Prozesswärme

Beiträge zur Wärmewende

Beispielhafte Prozesse und Standorte als Referenz für den Einsatz in Deutschland

Potential der Solarwärme für Brennstoffeinsparungen

Überblick

Ist es profitabel, in Solarthermie in Deutschland zu investieren?

- Die Studie betrachtet Solarthermie für **industrielle Prozesswärme**
- Unterschiedliche Prozesstemperaturanforderungen wurden untersucht (z. B.
 - Pasteurisierung von Milch (80°C)
 - chemische Prozesse und (300°C)
 - Dampfnetze (120°C)

Schlüsselindikatoren:

- Levelized Cost of Heat (LCOH)
- Amortisationszeit
- OPEX-Einsparungen gegenüber Erdgas- und CO₂-Kosten



Fallstudie

Beispielhafte Referenzstandorte

Drei Standorte wurden berücksichtigt, die das Spektrum der Strahlungsbedingungen Deutschland abdecken.

Bremen → geringe jährliche Einstrahlung

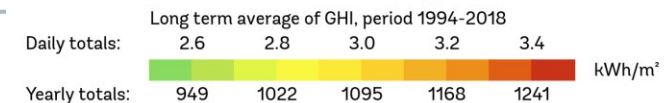
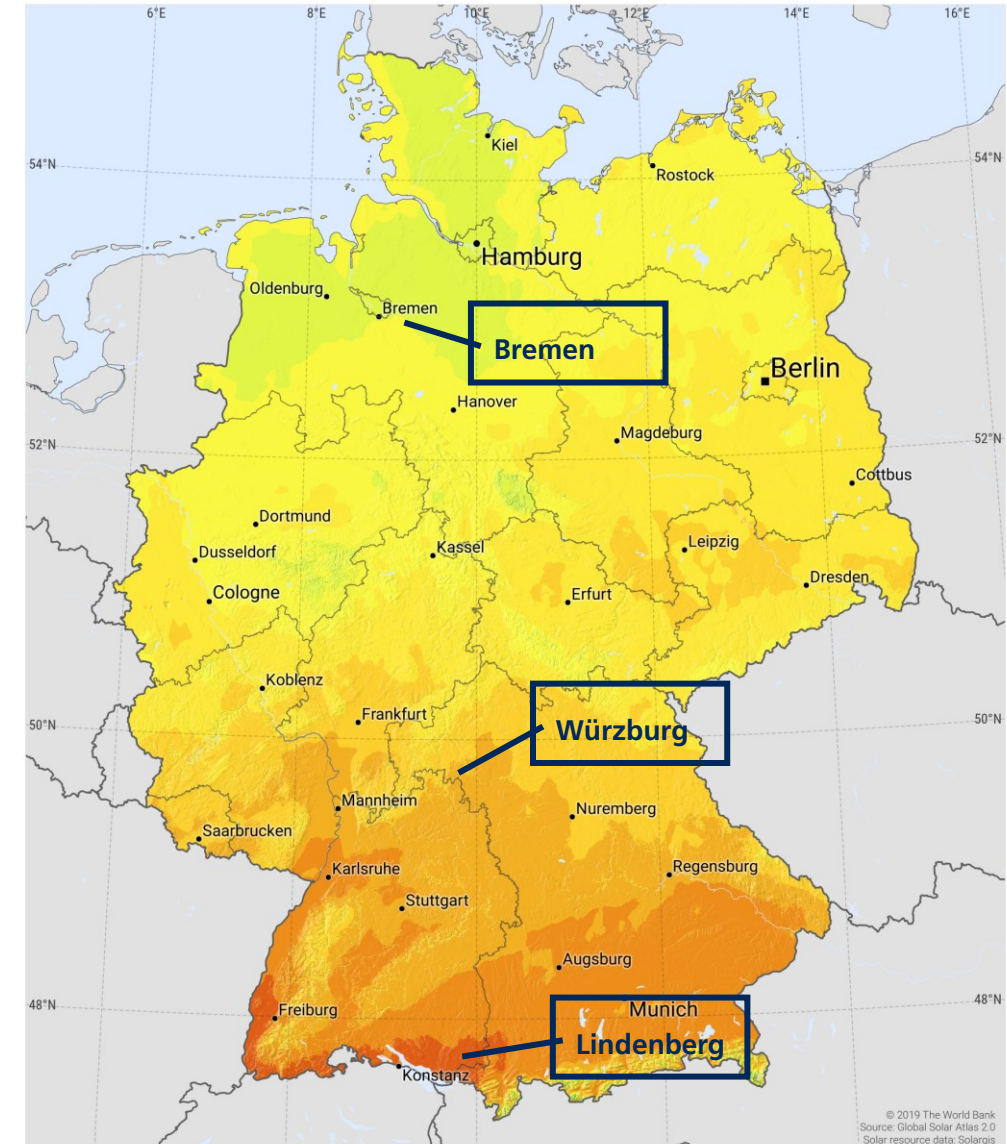
- DNI: 948 kWh/m².a
- DHI: 540 kWh/m².a

Würzburg → mittlere jährliche Einstrahlung

- DNI: 1097 kWh/m².a
- DHI: 571 kWh/m².a

Lindenberg im Allgäu → hohe jährliche Einstrahlung

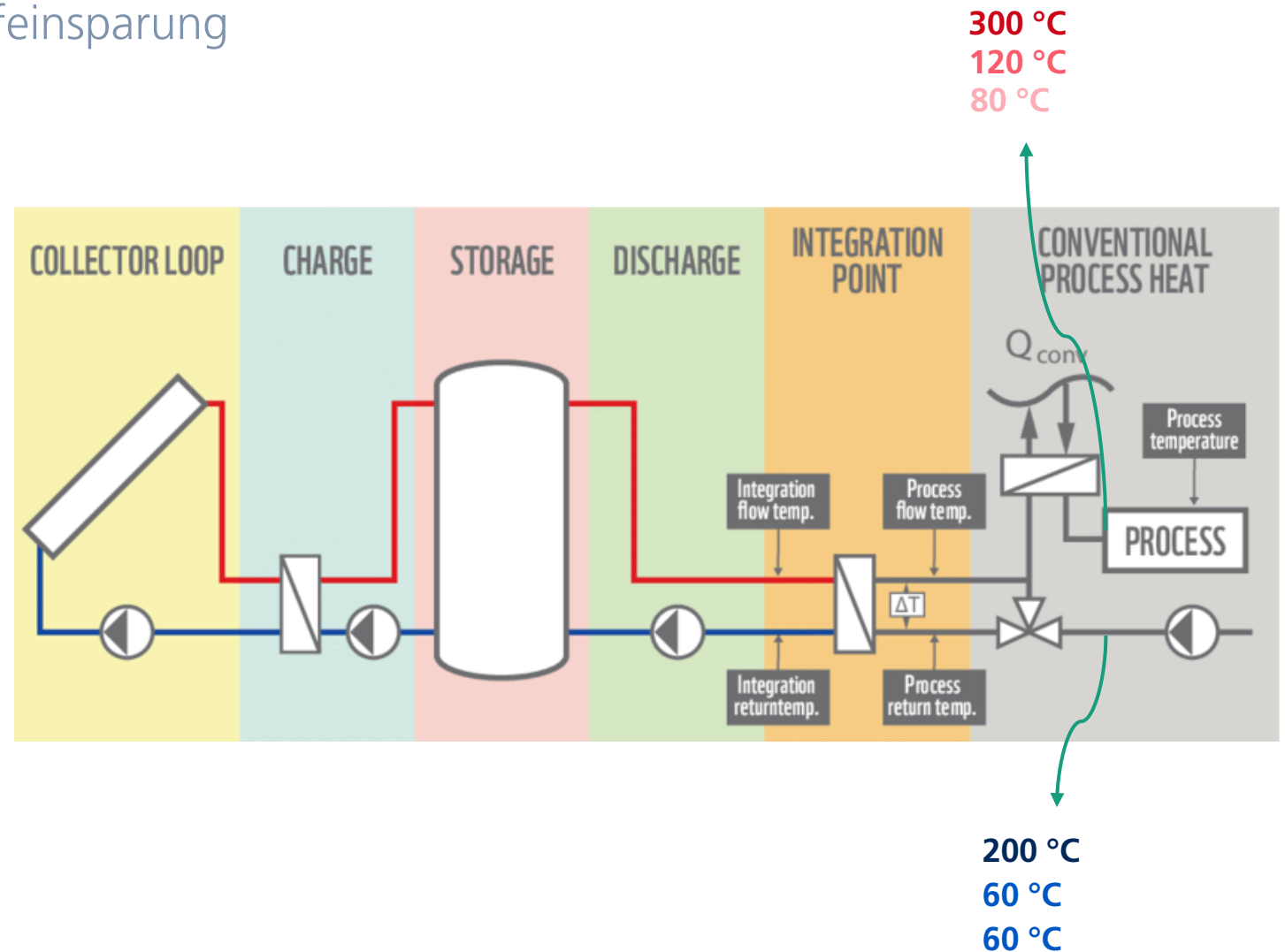
- DNI: 1221 kWh/m².a)
- DHI: 576 kWh/m².a



Methodik

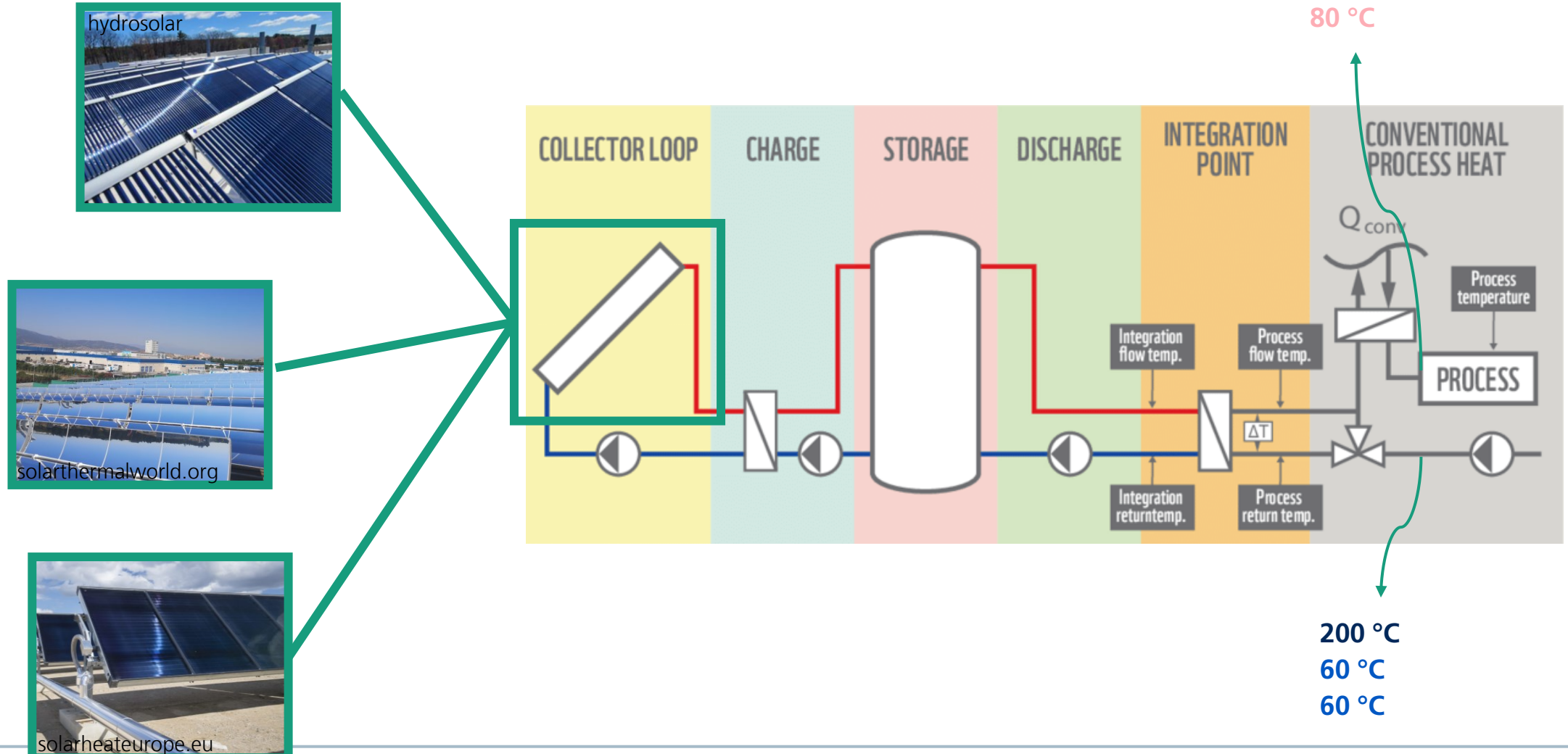
Solarthermische Wärme zur Brennstoffeinsparung

Solarkomponenten können zu einem **bestehenden** Gasbrenner hinzugefügt oder in ein **neu entwickeltes Hybridsystem** integriert werden.



Methodik

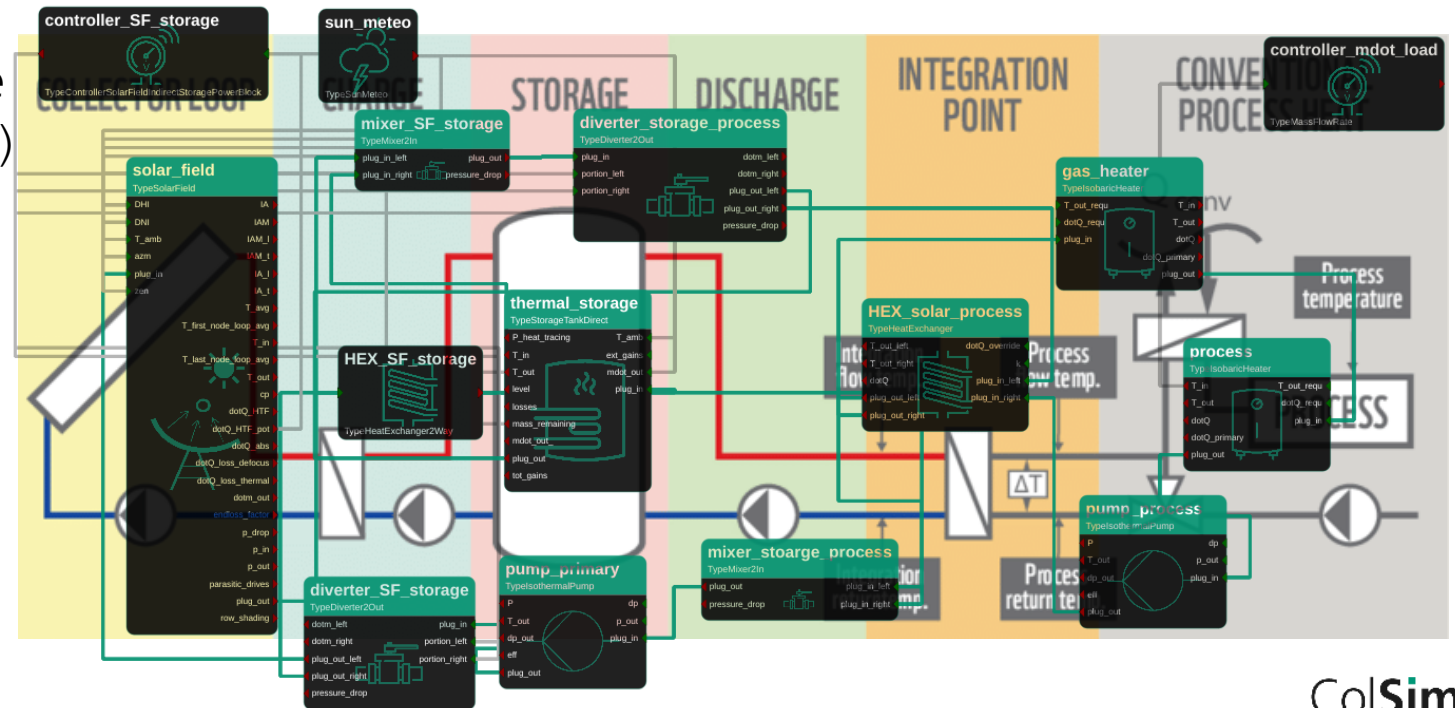
Solarthermische Wärme zur Brennstoffeinsparung



Methodik

Solarthermische Wärme zur Brennstoffeinsparung

- Simulation & Optimierung ColSim
(Fraunhofer ISE-Software für dynamische thermohydraulische Systemmodellierung)

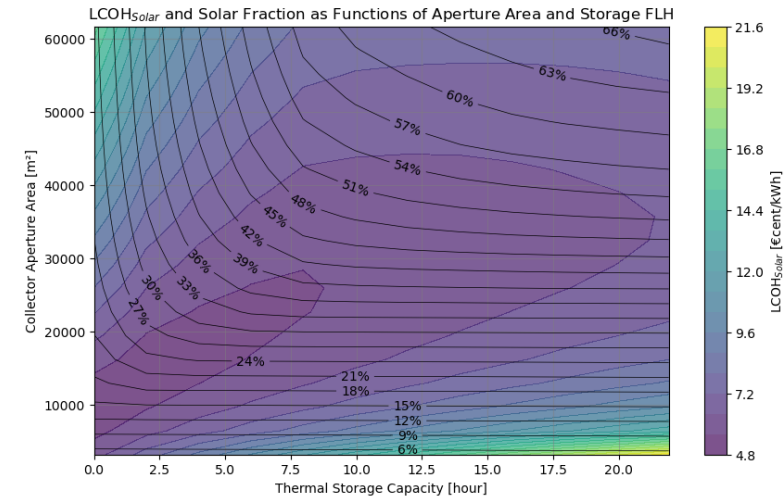


ColSim 

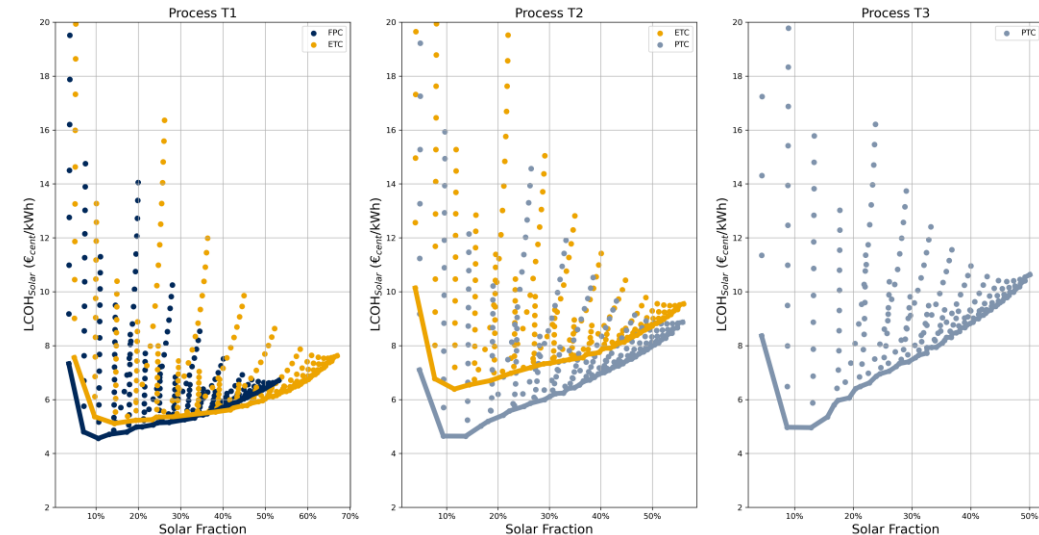
Methodik

Modellierung, Simulation und Optimierung

- Simulation & Optimierung ColSim
(Fraunhofer ISE-Software für dynamische thermohydraulische Systemmodellierung)
- Parametrische Variation für jeden Standort x Kolleorttechnologie x Prozess
Insgesamt **6.156 Konfigurationssimulationen!**
- Variation über
 - Kollektorfläche
 - Speicherkapazität
- Lösungen mit niedrigsten $\text{LCOH}_{\text{Solar}}$, $\text{LCOH}_{\text{Hybrid}}$, und kürzester **Amortisationszeit**
- Auch die Höhe der **Einsparungen über die gesamte Lebensdauer** des Systems wird untersucht.



LCOH_{Solar} Optimization for Würzburg without EEW Incentives



Ökonomische Bewertung

Levelized Cost of Heat

- Die **LCOH**-Methode ermöglicht es, Systeme mit unterschiedlichen Technologien und Kostenstrukturen miteinander zu vergleichen.
- Die Nettobarwertmethode (NPV) wird verwendet.

$$LCOH = \frac{\text{Barwert der Kosten über die Lebensdauer}}{\text{Barwert der Wärmezeugung über die Lebensdauer}}$$

- Durch die **Abzinsung aller** Ausgaben und der über die Lebensdauer **erzeugten Wärmemenge** auf denselben Referenzzeitpunkt wird die Vergleichbarkeit des LCOH sichergestellt.
- Derselbe Diskontsatz wird für alle Technologien verwendet.
- Detaillierte **Zahlungsströme von Einnahmen und Ausgaben** während der Lebensdauer sowie die **abgezinste Produktion** berechnet.

$$LCOH_X = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{(I_{t,X} + M_{t,X} + F_t + CO_{2t})}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_{t,X}}{(1+r)^t}}$$

- $I_{t,X}$: Investitionsausgaben im Jahr t für das System X
 $M_{t,X}$: Betriebs- und Wartungskosten (O&M) im Jahr t für das System X
 F_t : Brennstoffkosten im Jahr t
 CO_{2t} : CO₂ -Steuer aufwendungen im Jahr t
 E_t : Vom System X im Jahr t erzeugte thermische Energie
 r : Realer Diskontsatz
 n : Erwartete Lebensdauer des Systems

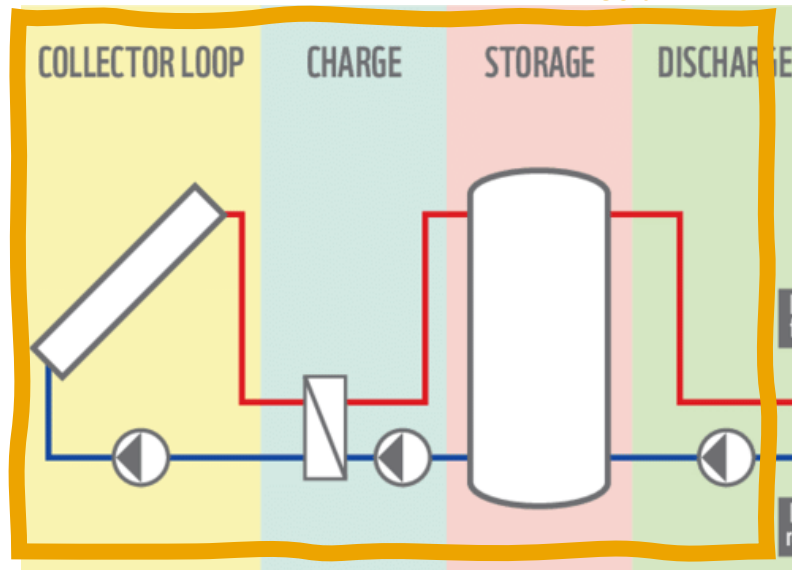
Ökonomische Bewertung

Solar | Erdgas | Hybrid

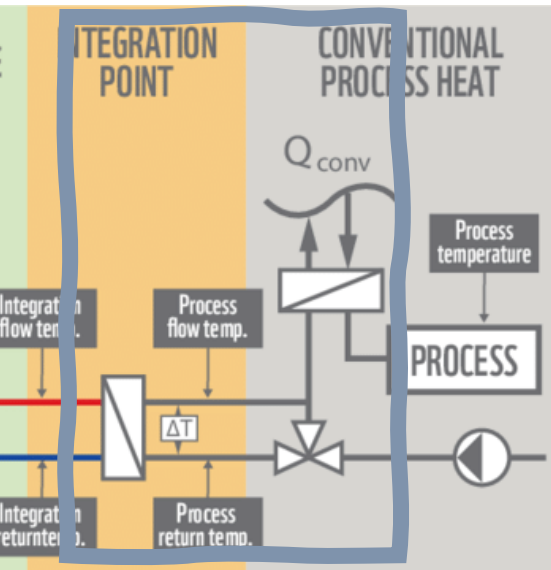
$$LCOH_{\text{Solar}} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{(I_{t,\text{Solar}} + M_{t,\text{Solar}} + F_t + CO_{2t})}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_{t,\text{Solar}}}{(1+r)^t}}$$

$$LCOH_{\text{NG}} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{(I_{t,\text{NG}} + M_{t,\text{NG}} + F_t + CO_{2t})}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_{t,\text{NG}}}{(1+r)^t}}$$

Solarkomponenten zu $LCOH_{\text{Solar}}$



Gastherme-Komponenten zu $LCOH_{\text{NG}}$



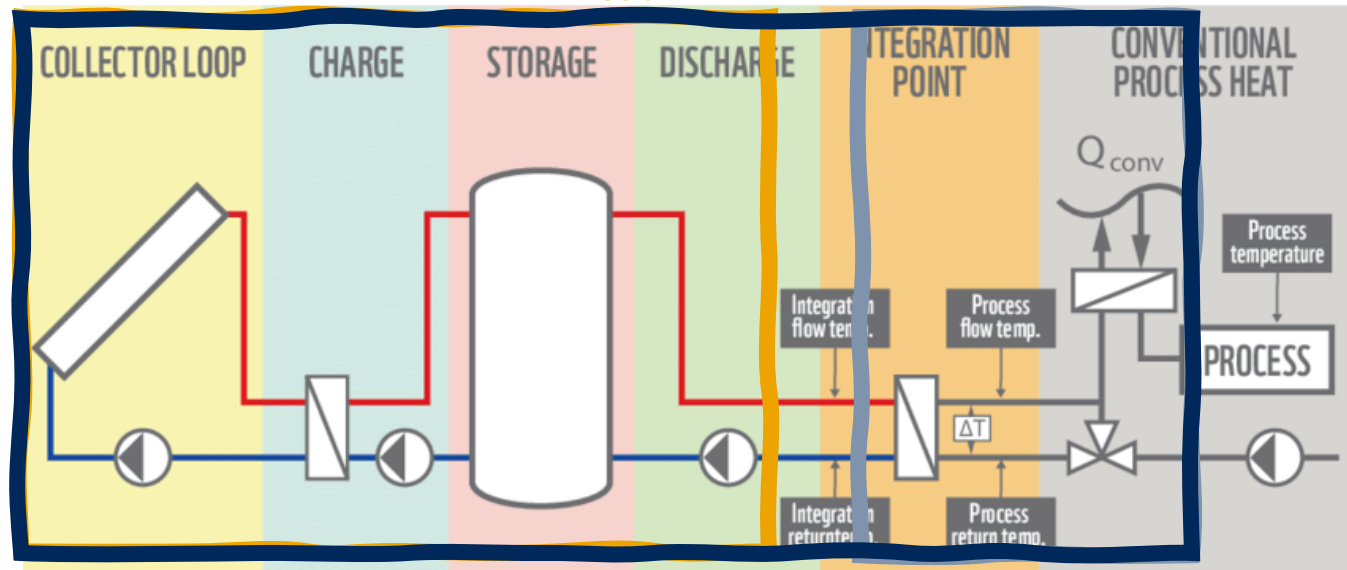
Ökonomische Bewertung

Solar | Erdgas | Hybrid

$$LCOH_{Hybrid} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{(I_{t,Solar} + M_{t,Solar} + I_{t,NG} + M_{t,NG} + F_t + CO_{2t})}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_{t,Solar} + E_{t,NG}}{(1+r)^t}}$$

Solarkomponenten zu $LCOH_{Solar}$

Gastherme-Komponenten zu $LCOH_{NG}$

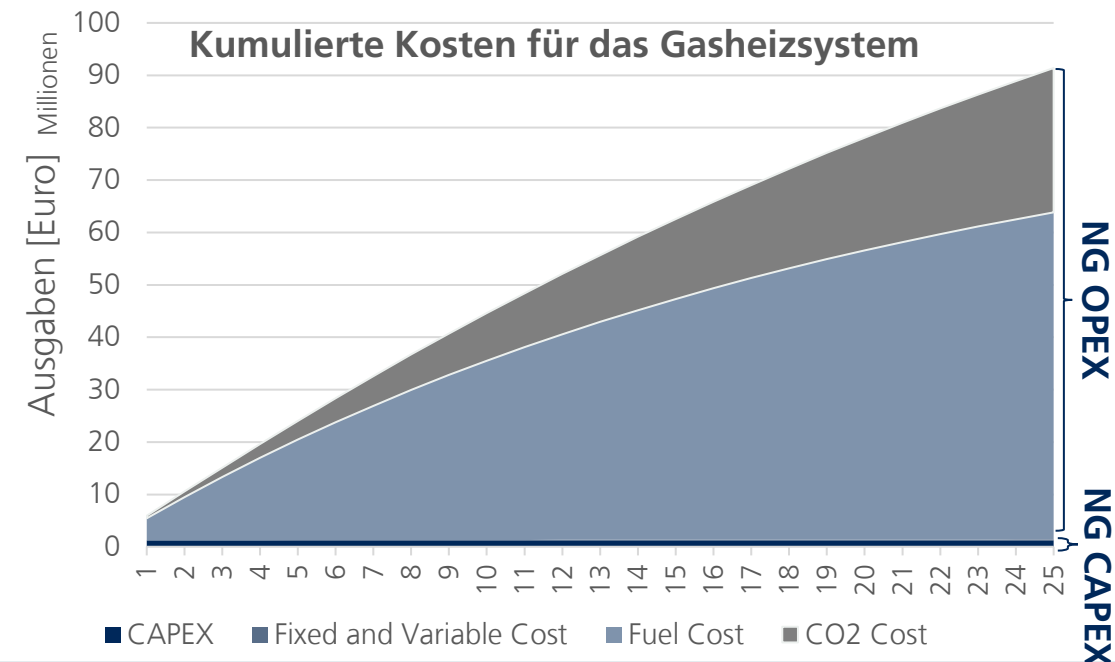
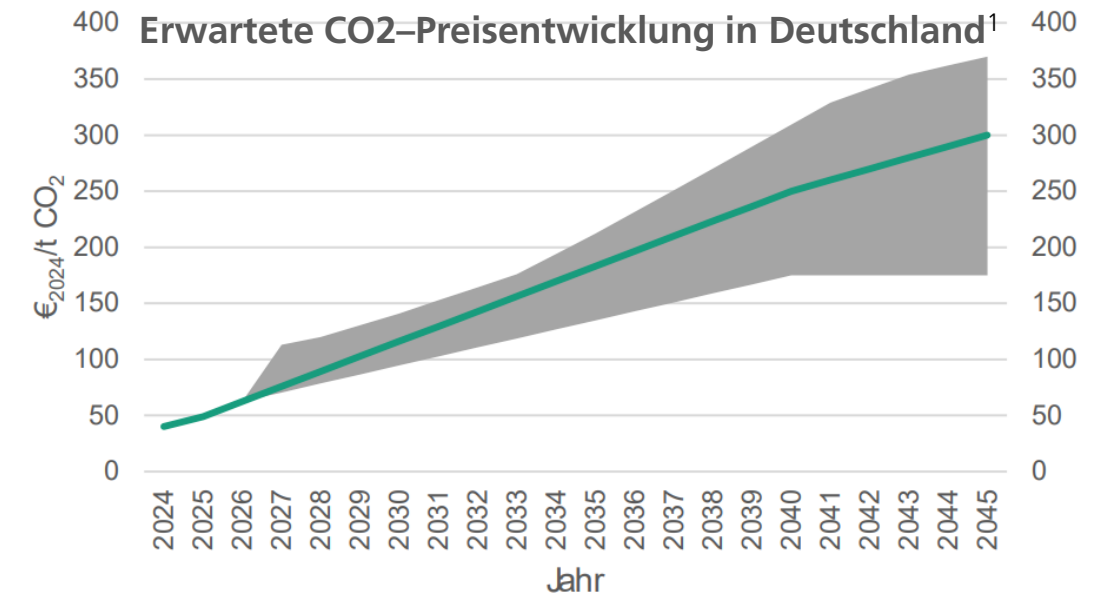


Referenz-Gasheizsystem

$LCOH_{NG}$

$$LCOH_{NG} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{(I_{t,NG} + M_{t,NG} + F_t + CO_{2t})}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_{t,NG}}{(1+r)^t}}$$

- Über die Lebensdauer v. 25 Jahren ist der $LCOH_{NG}$:
14.1 €cent/kWh
- Annahmen:
 - Der Gaspreis bleibt konstant¹ bei **7.8 €cent/kWh²** (Netto: **5.6 €cent** + **2.2 €cent** Steuern und Abgaben)
 - CO₂-Emissionen: 0.201 tCO₂/MWh_{NG}³
 - Mittlerer Jahressystemwirkungsgrad des NG-Systems: 81 %
 - CO₂-Preis **startet bei 45 €/T** in 2024

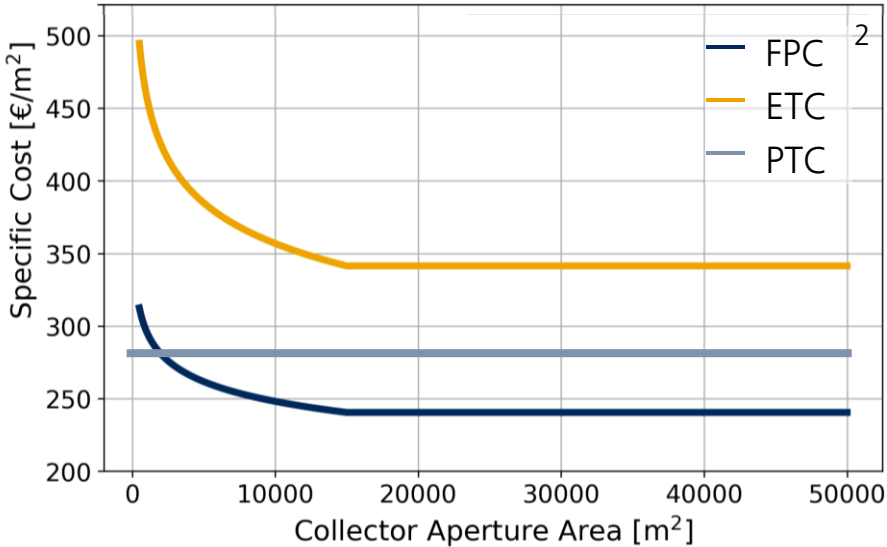


Wichtige berücksichtigte Parameter

Finanzielle und technische Annahmen

Szenario	Prozesstemperatur (°C)	Wärmeträgerfluid	Speicherdichte (kWh/m³)	Speicherkosten (€/kWh _{th})
Szenario T1	80-60	Wasser	20	37
Szenario T2	120-60	Druckwasser	60	48,6
Szenario T3	300-200	Thermalöl	50	71,5

Kollektor	Kollektorkosten (€/m²) ¹	Lebensdauer (Jahre)	Jährliche O&M (% von CAPEX)	Reale Diskontierungsrate (%)
Flachkollektor (FPC)	Siehe Kurve	25	0	5
Vakuumröhrenkollektor (ETC)	Siehe Kurve	25	0,5	5
Parabolrinnenkollektor (PTC)	285	25	1	5



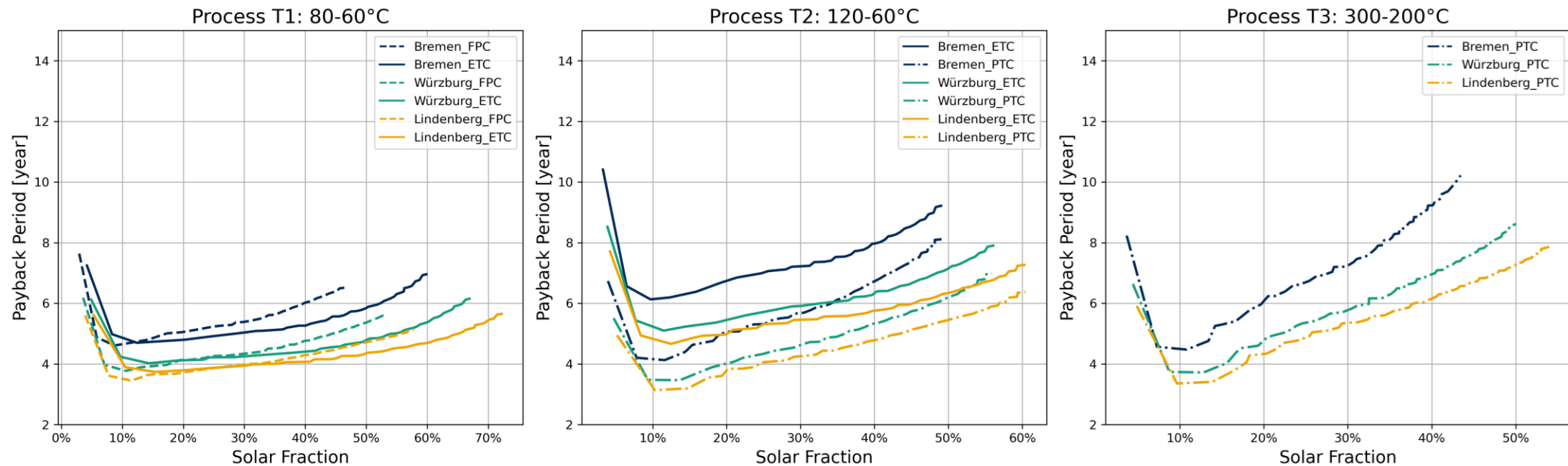
- Hinzu kommen Kosten für Wärmetauscher, Gasbrenner, BoP, EPC, Rücklagen, Projektentwicklung, Nebenkosten, Solarfeldkomponenten
- Optional wird die EEW-Förderung von 50% auf CAPEX berücksichtigt für ein Mittelgroßes Unternehmen (MU)

Studienergebnisse (mit EEW)

Optimierte Amortisationszeit für verschiedene Standorte

Die Amortisationszeit beginnt bereits **ab 3 Jahren** für einen **niedrigen solaren Deckungsanteil**!

Unter 9 Jahren, um einen **hohen solaren Deckungsanteil von 50 %** zu erreichen!



Investitionen und Einsparungen

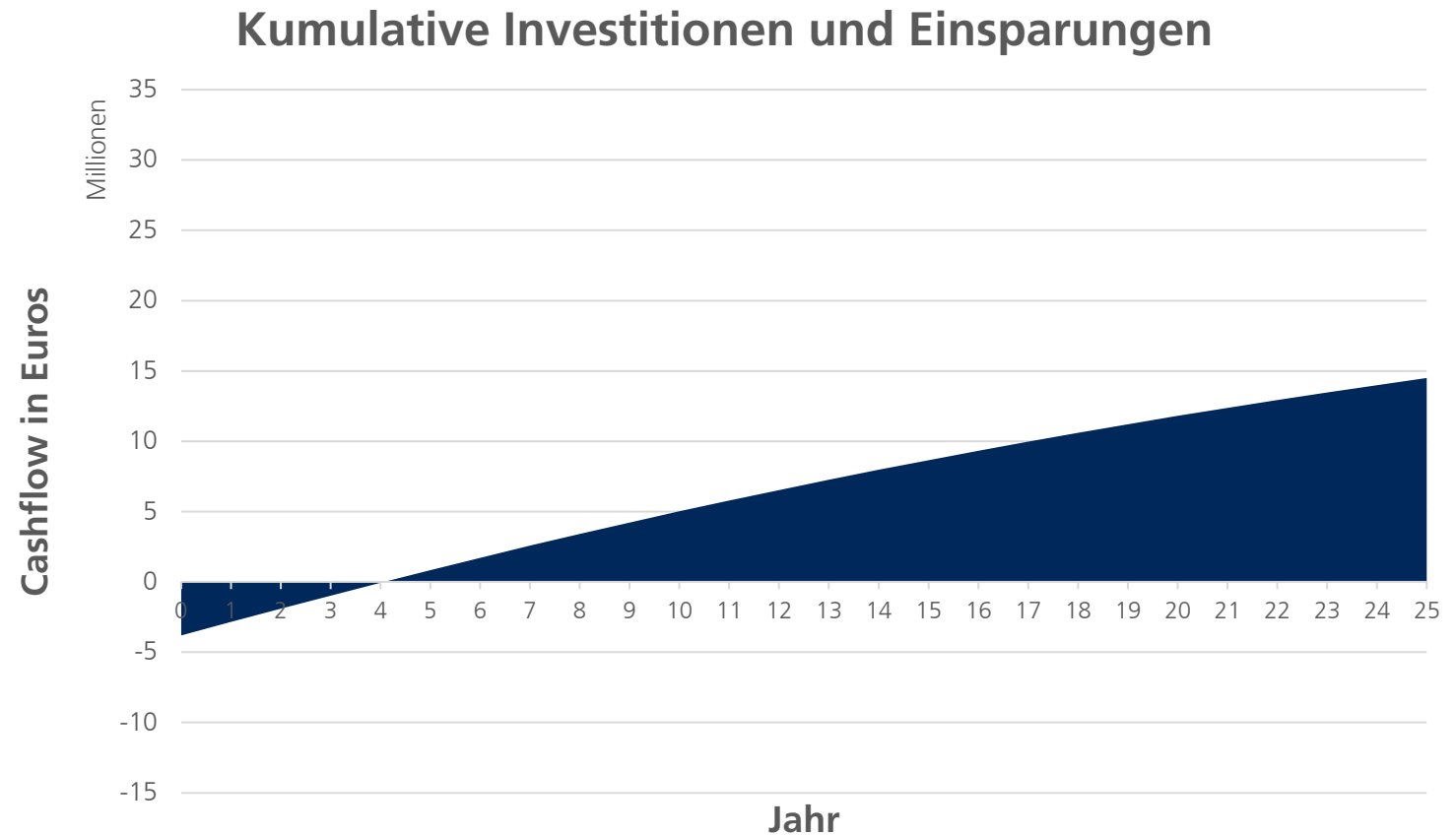
Kleine vs. große Solare Deckungsrate

Solare Deckungsrate: 20%

LCOH_{Solar}: 3.25 €_{cent}/kWh

LCOH_{Hybrid}: 11.86 €_{cent}/kWh

Amortisationszeit: 4.1 Jahre



PTC in Prozess T2: 120-60°C bei Würzburg mit EEW-Förderung

Investitionen und Einsparungen

Kleine vs. große Solare Deckungsrate

Solare Deckungsrate: 20%

$\text{LCOH}_{\text{Solar}}$: 3.25 €_{cent}/kWh

$\text{LCOH}_{\text{Hybrid}}$: 11.86 €_{cent}/kWh

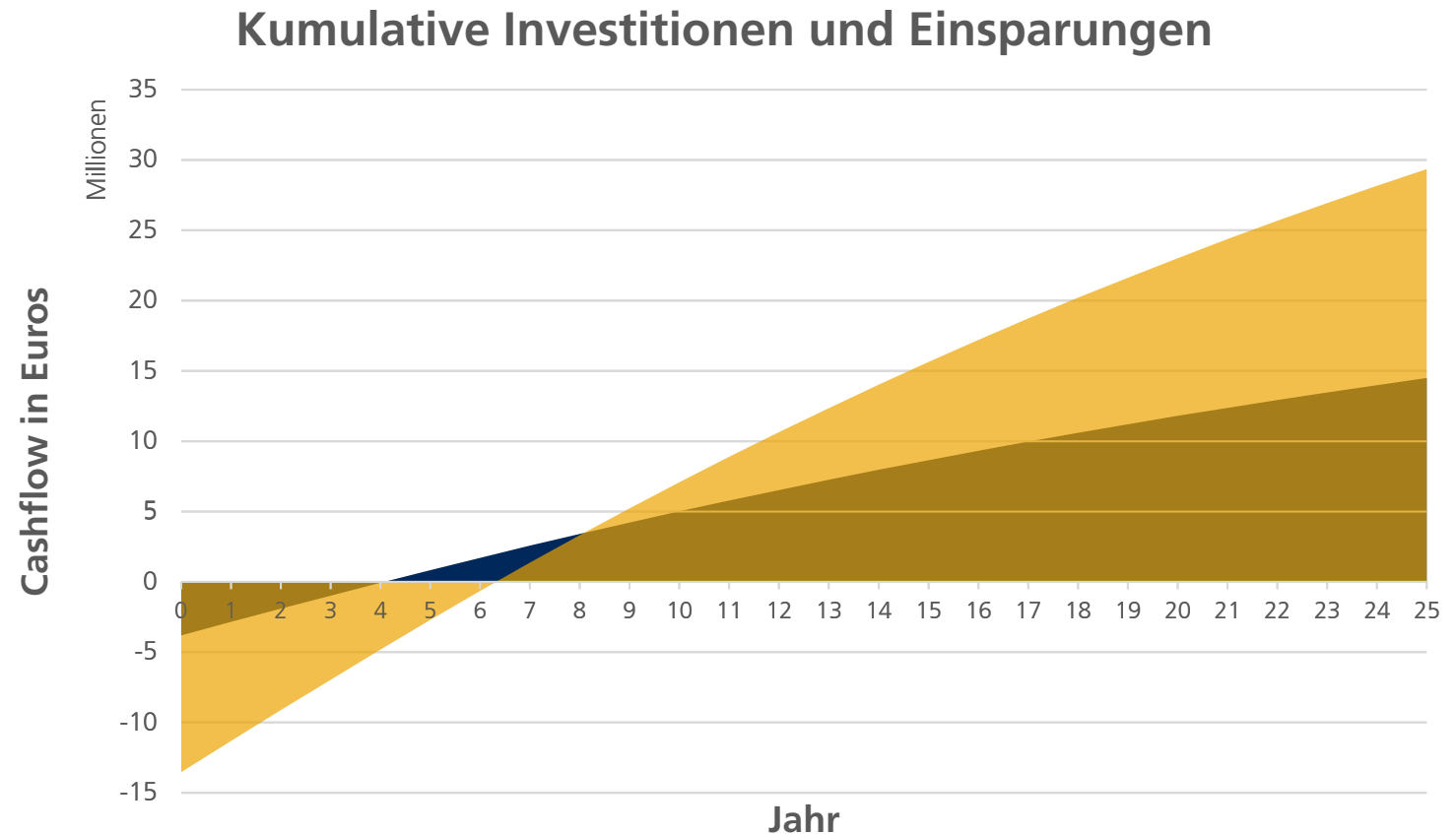
Amortisationszeit: 4.1 Jahre

Solare Deckungsrate: 50%

$\text{LCOH}_{\text{Solar}}$: 4.82 €_{cent}/kWh

$\text{LCOH}_{\text{Hybrid}}$: 9.57 €_{cent}/kWh

Amortisationszeit: 6.3 Jahre

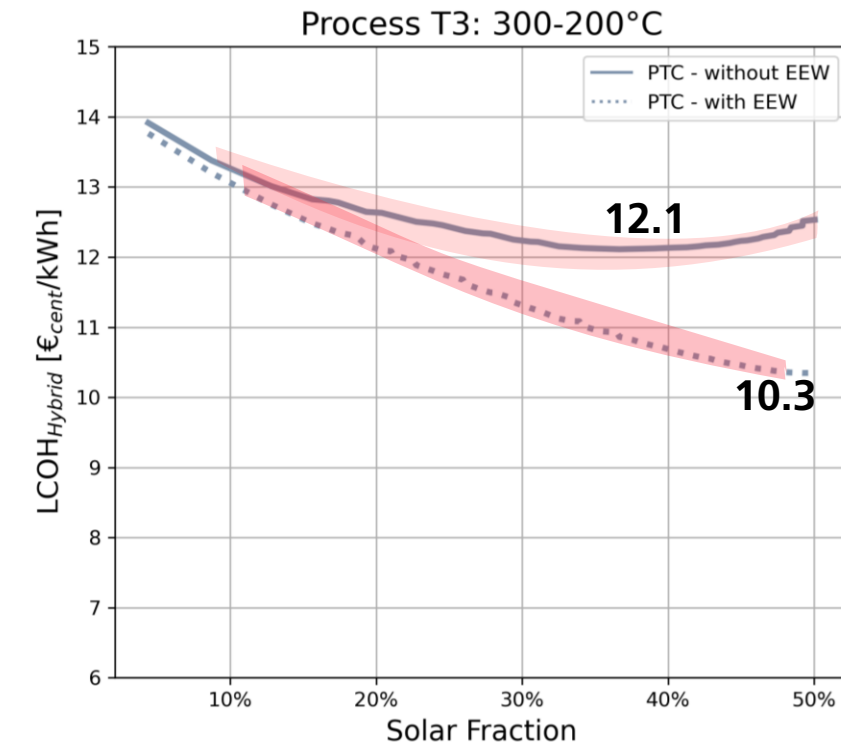
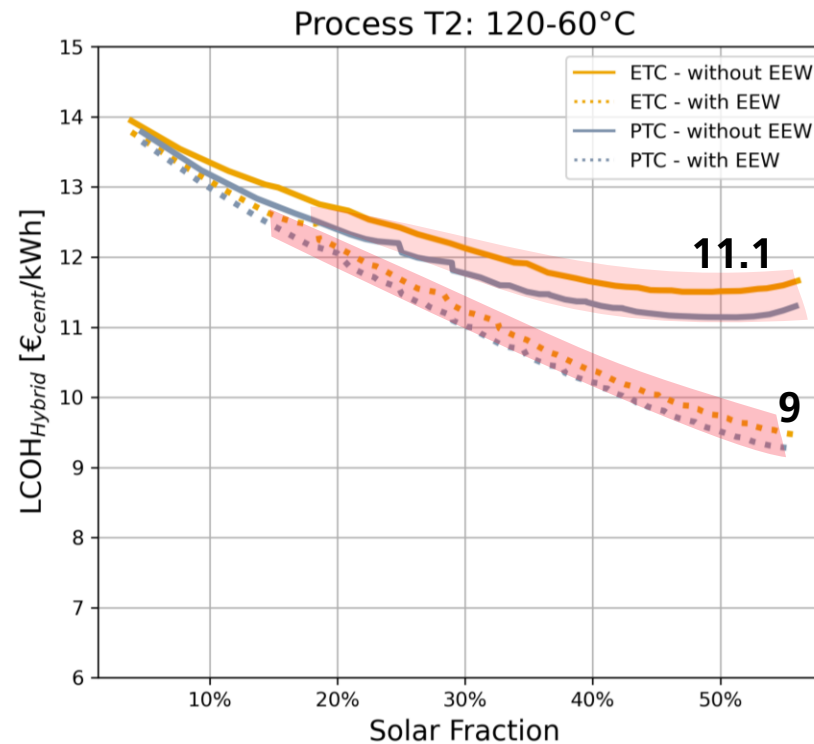
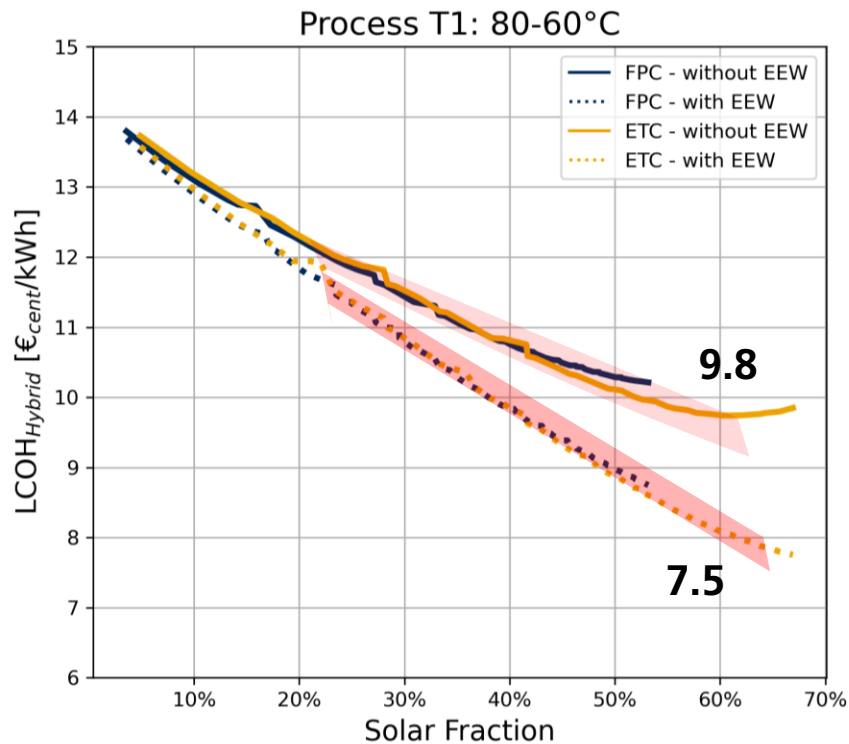


PTC in Prozess T2: 120-60°C bei Würzburg mit EEW-Förderung

System-Wärmegestehungskosten – Referenzstandort: Würzburg

Solare Deckungsrate vs. $\text{LCOH}_{\text{Hybrid}}$

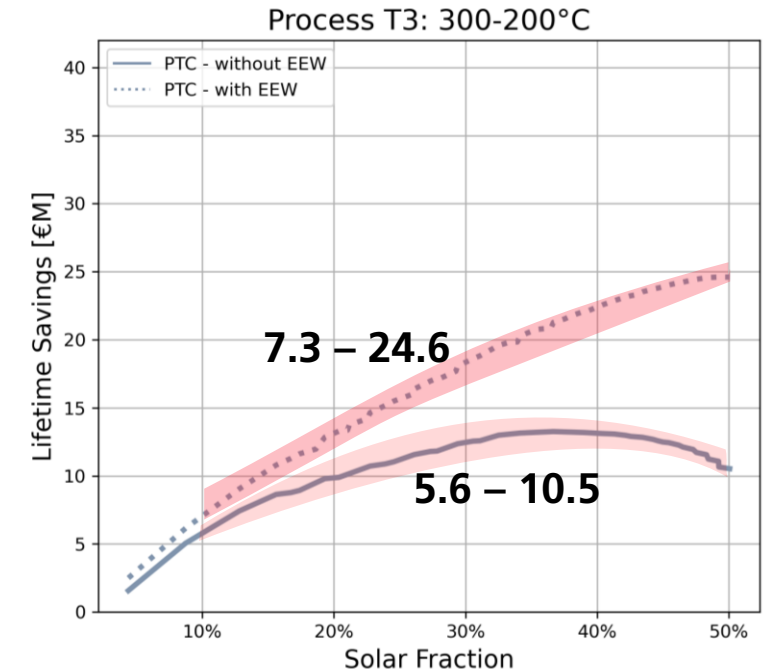
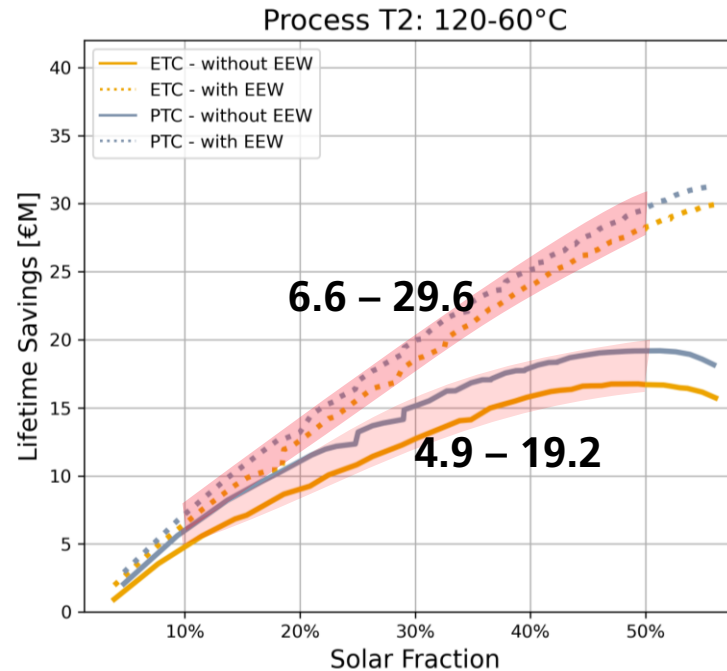
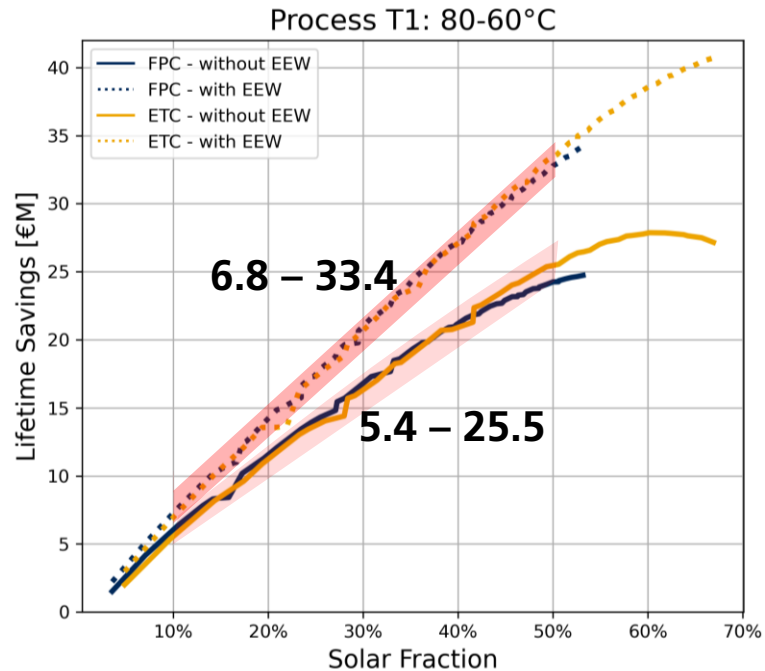
Bis zu **37% geringere Wärmegestehungskosten** gegenüber fossiler Wärme über die Lebenszeit (bei einer solaren Deckungsrate von 50%)



Optimierte Einsparungen über die gesamte Lebensdauer– Location: Würzburg

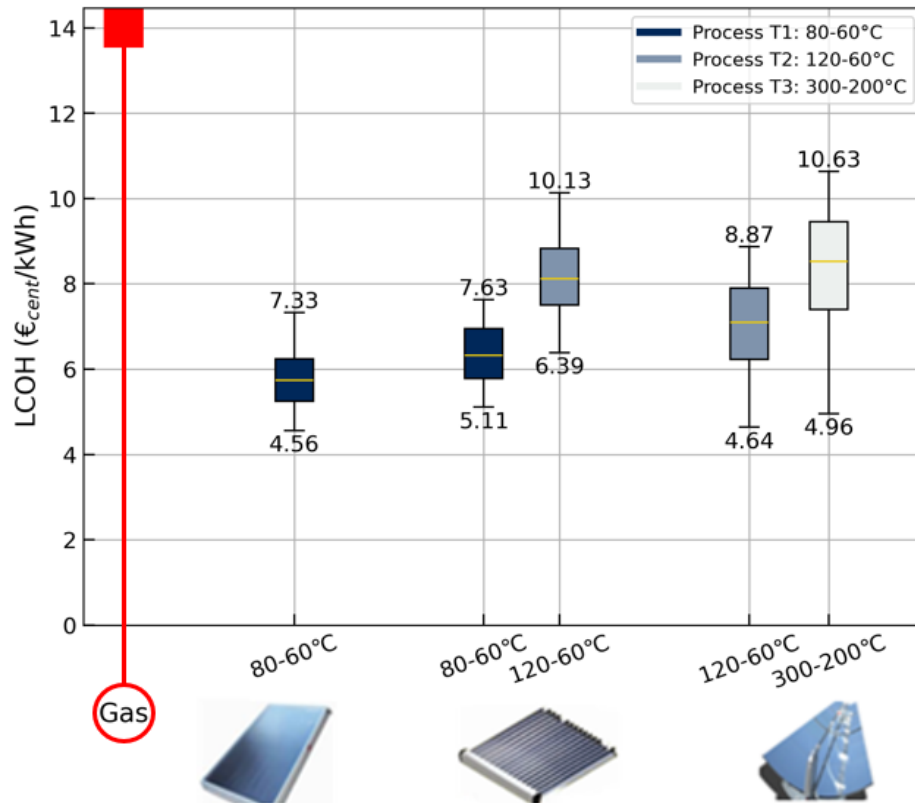
Solare Deckungsrate vs. Einsparungen

Bis zu **37% Kosteneinsparung** gegenüber fossiler Wärme über die Lebenszeit (bei einer solaren Deckungsrate von 50%)

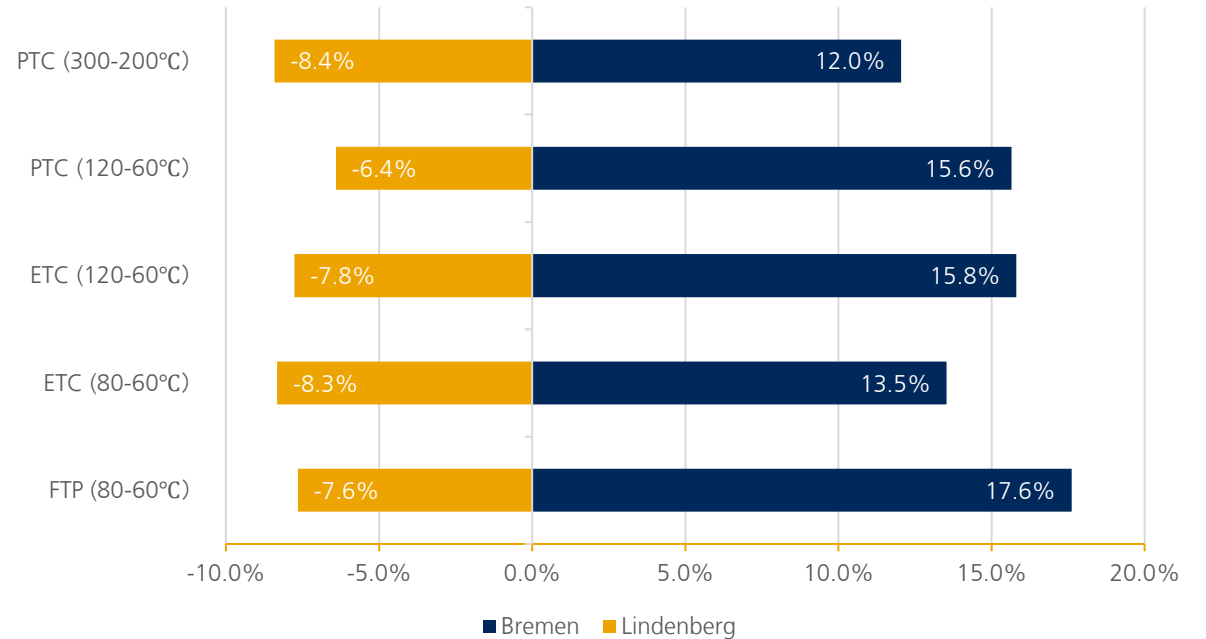


LCOH-Bereich und Variabilität nach Standort

LCOH nach Prozess in Würzburg und prozentuale Abweichung nach Standort – ohne EEW-Förderung

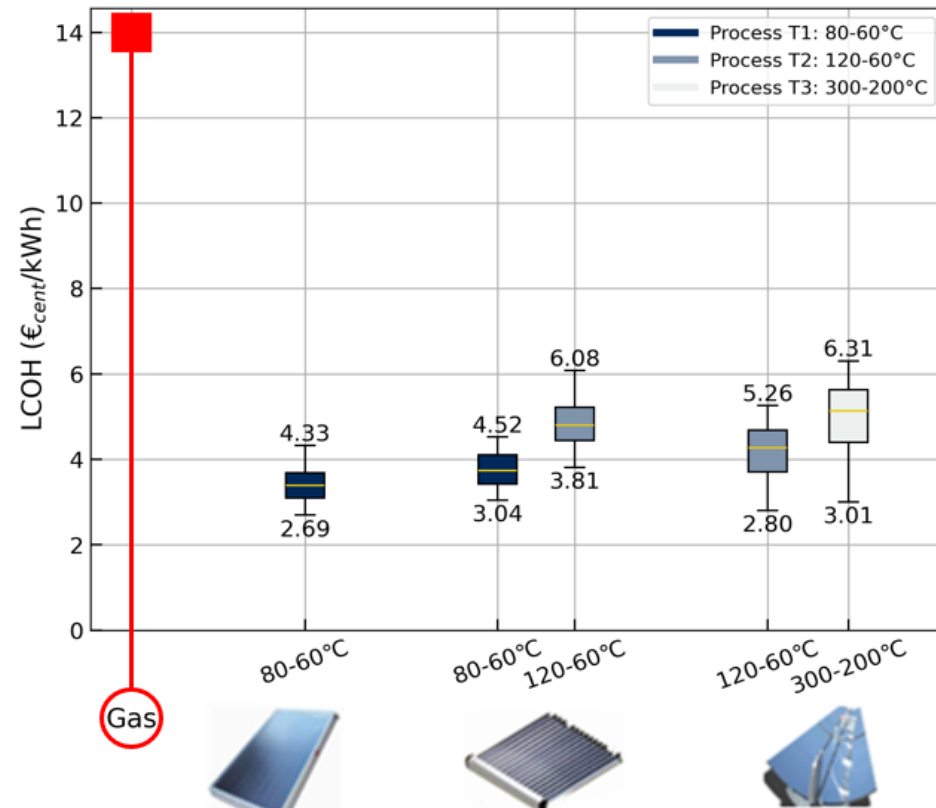


LCOH_{solar} prozentuale Abweichung gegenüber Würzburg

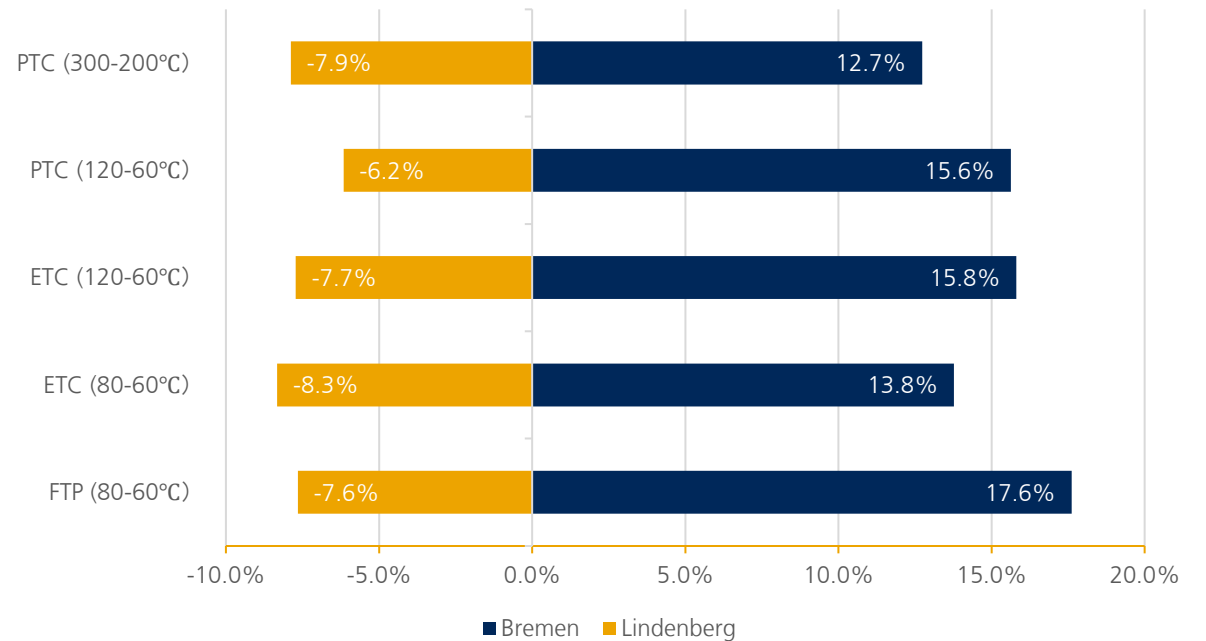


LCOH-Bereich und Variabilität nach Standort

LCOH nach Prozess in Würzburg und prozentuale Abweichung nach Standort – mit EEW-Förderung



LCOH_{Solar} prozentuale Abweichung gegenüber Würzburg





Herzlichen Dank für Ihr Interesse und Ihre Aufmerksamkeit

Dr. Shahab Rohani, Xinyue Zhou, Dr.-Ing. Gregor Bern
Concentrating Systems and Technologies
Phone: +49 761 4588-5906
gregor.bern@ise.fraunhofer.de

