

# Energetische und wirtschaftliche Bewertung der geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung

Der Geothermiekongress 2019, München, 19. November – 21. November 2019

T. Eller, F. Heberle und D. Brüggemann

# Agenda

---

- 1) Motivation
- 2) Methodik
- 3) Ergebnisse
- 4) Zusammenfassung

# Agenda

---

1) Motivation

2) Methodik

3) Ergebnisse

4) Zusammenfassung

# Motivation

## Geothermische Strom- und Wärmeerzeugung

- Bedarf an Wärme und Kälte entspricht der Hälfte des weltweiten Energiebedarfs
- Marktvolumen für Wärme und Kälte in 2017: 150 Milliarden Euro (270 Milliarden Euro in 2026) [1]

Organic Rankine Cycle (ORC) dient zur Umwandlung der thermischen Energie des Thermalwassers in elektrische Energie



Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Geothermiekraftwerken durch zusätzliche Wärmebereitstellung



Vermehrter Betrieb des Kraftwerks in Teillast durch zeitlich fluktuierenden Wärmebedarf



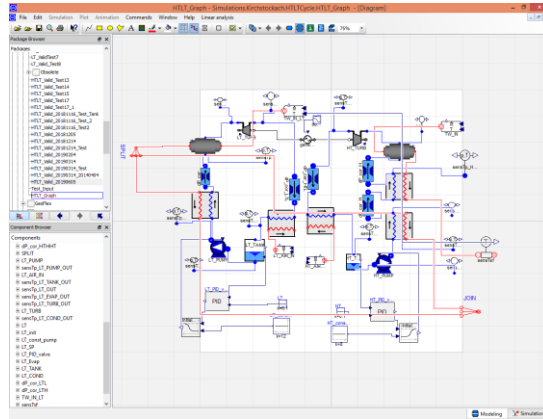
Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells eines Organic Rankine Cycle

[1] Richter, A.: Geothermal energy and the \$298 bn district heating & cooling market opportunity: [http://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-energy-and-the-298-bn-district-heating-cooling-market-opportunity/?utm\\_source=ThinkGeoEnergy+List&utm\\_campaign=e60a726b4b-TGE\\_Newsletter\\_RSS1&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_657e42f767-e60a726b4b-415241109](http://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-energy-and-the-298-bn-district-heating-cooling-market-opportunity/?utm_source=ThinkGeoEnergy+List&utm_campaign=e60a726b4b-TGE_Newsletter_RSS1&utm_medium=email&utm_term=0_657e42f767-e60a726b4b-415241109), letzter Zugriff: 5. September 2019.

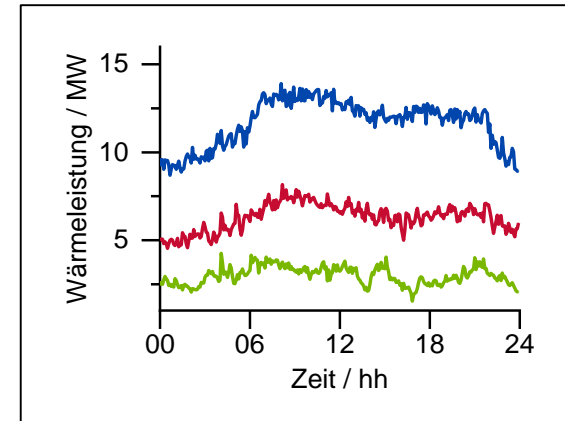
# Motivation

Bausteine für eine belastbare energetische und wirtschaftliche Bewertung

## Dynamisches Simulationsmodell



## Wärmelastprofile



Jahresertragssimulationen basierend auf Typtagen (VDI 4655)

# Agenda

---

- 1) Motivation
- 2) Methodik**
- 3) Ergebnisse
- 4) Zusammenfassung

# Methodik

## Typtage nach VDI 4655

- Typtage nach VDI 4655:

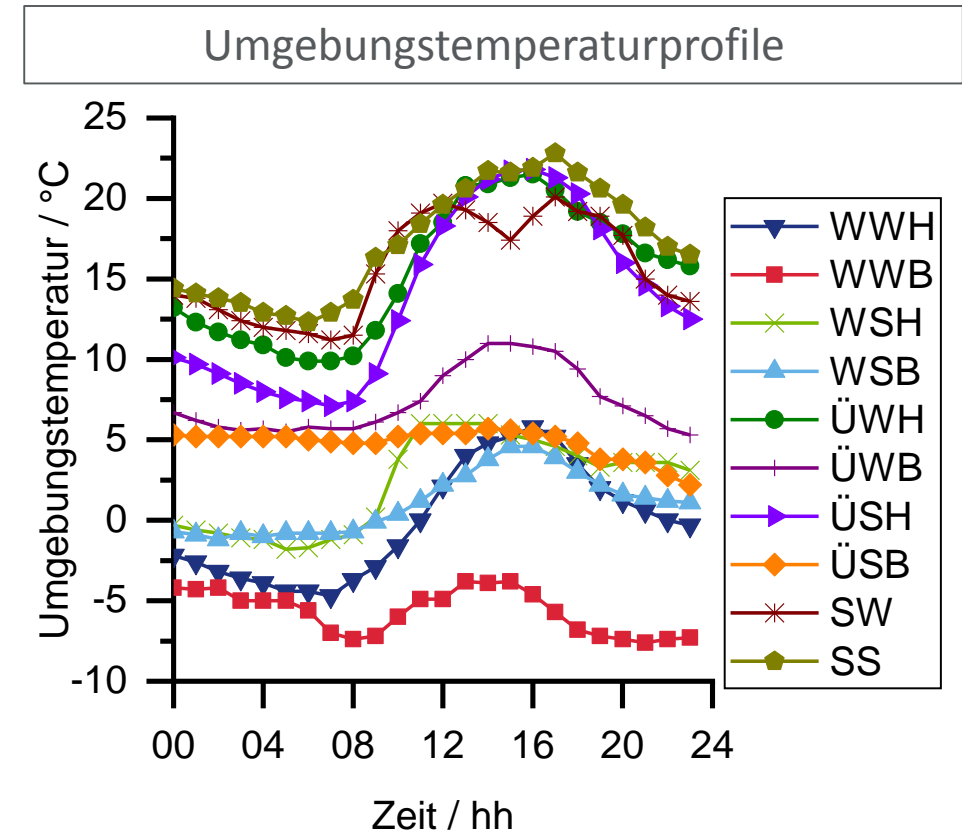
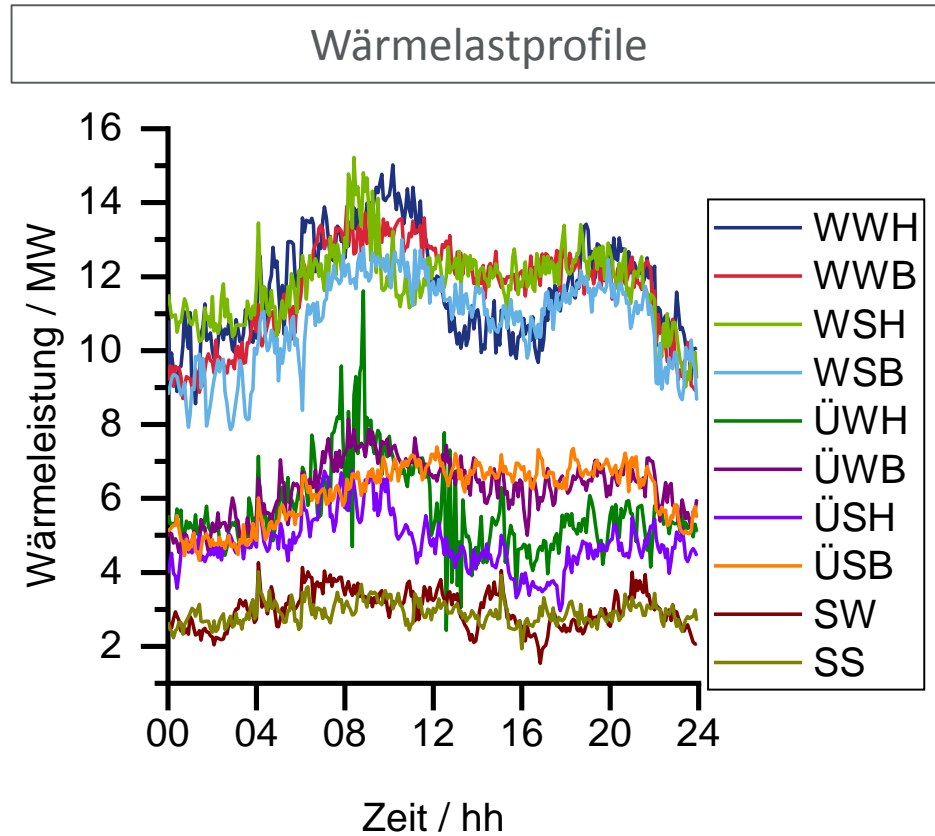


- Einteilung Deutschlands in verschiedene Klimazonen mit entsprechenden Testreferenzjahren (TRY):

...	WWH	<b>WWB</b>	WSH	WSB	...
...					
TRY12	23	57	2	16	
TRY13	29	91	6	19	
TRY14	22	115	5	25	
...					

# Methodik

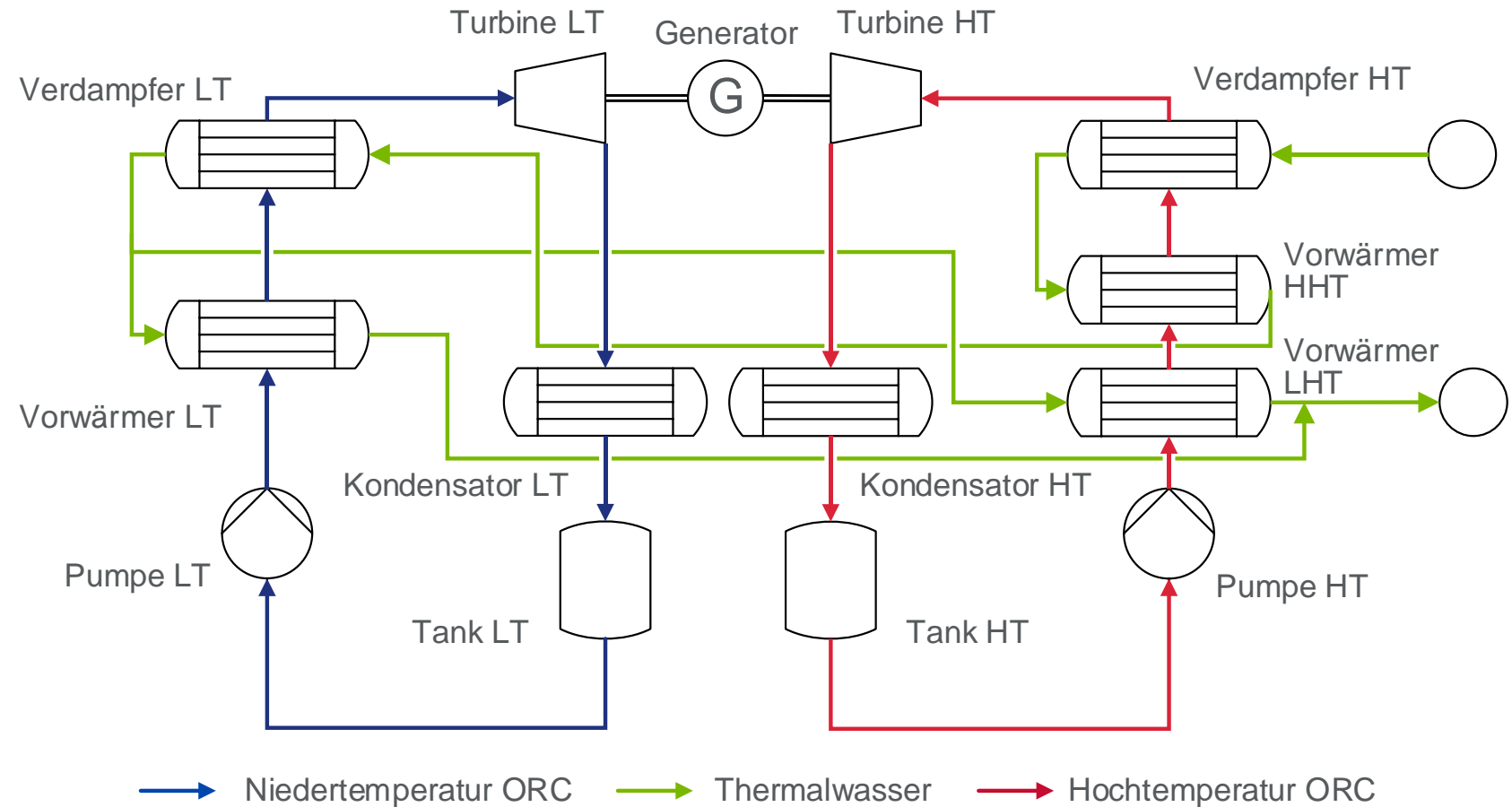
## Entwicklung von Wärmelastprofilen



Belastbare Wärmelast- und Umgebungstemperaturprofile für die jeweiligen Typtage

### Kraftwerk

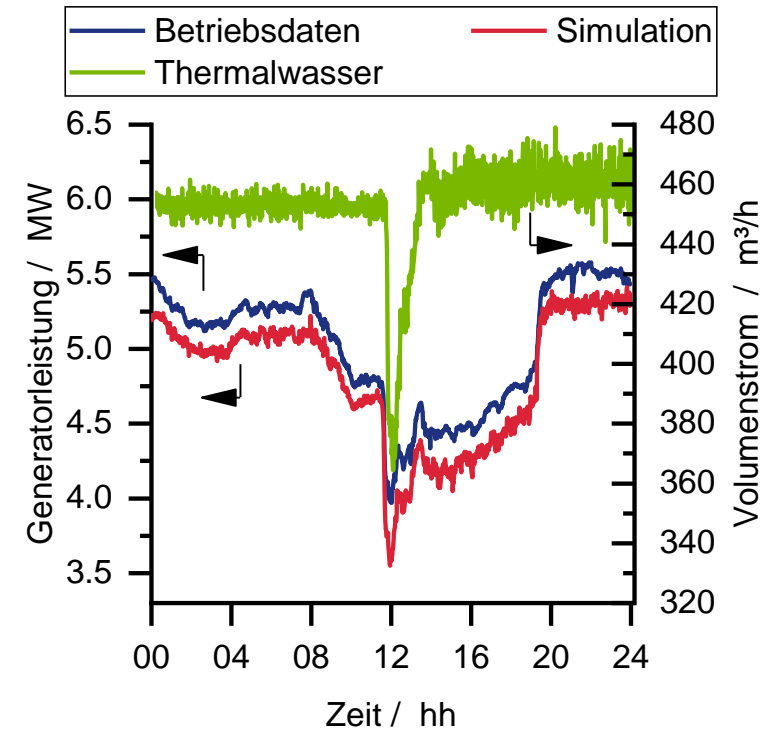
- Existierendes Kraftwerk in Süddeutschland
- Zweistufiger Organic Rankine Cycle
- Elektrische Nennleistung: 5,5 MW
- Thermalwasser-Parameter (138 °C, 120 kg/s)
- Umgebungstemperatur (Auslegungsfall): 8 °C



### Validierung des zweistufigen ORC-Systems:

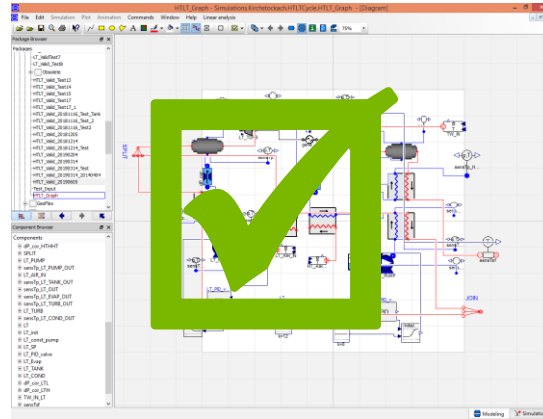
- **Variationskoeffizient** des mittleren quadratischen Fehlers für 23 Parameter im Durchschnitt: 3,5 %
- Elektrische Generatorleistung:

Ergebnisse	
Variationskoeffizient (Generatorleistung)	4,2 %
Korrelationskoeffizient	0,99

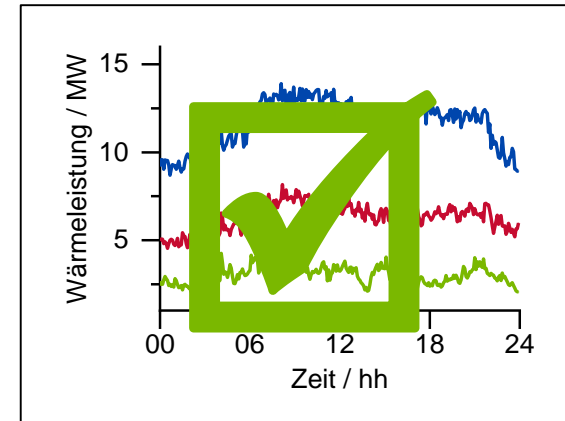


Das Simulationsmodell ist quantitativ und qualitativ zur Abbildung des realen Kraftwerks geeignet.

### Dynamisches Simulationsmodell



### Wärmelastprofile

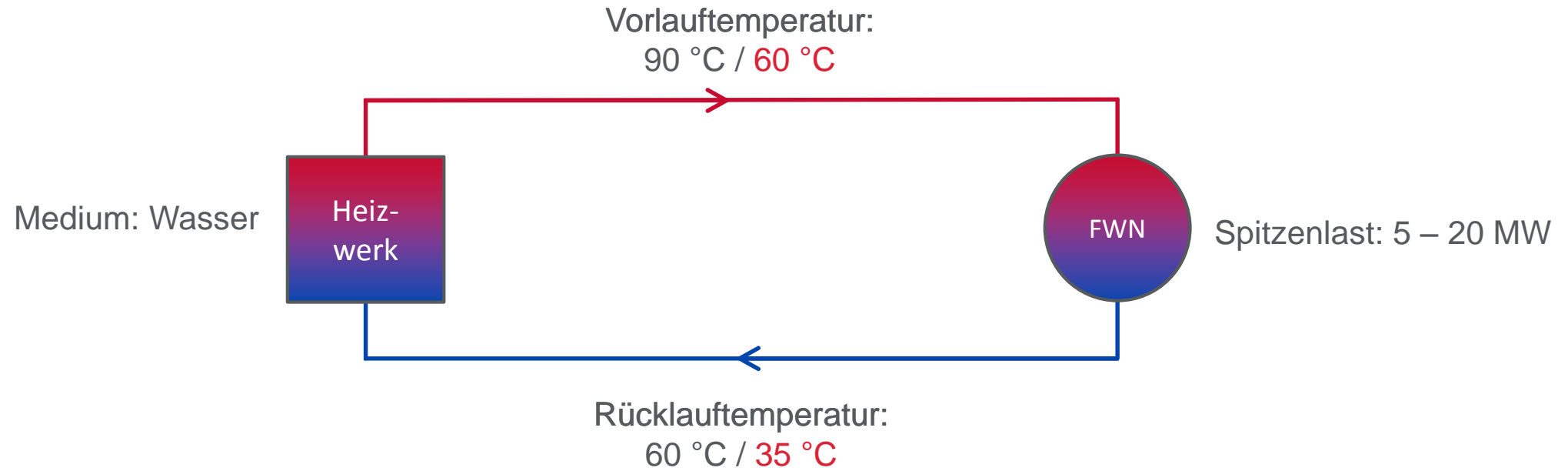


### Jahresertragssimulationen basierend auf Typtagen (VDI 4655)

# Methodik

## Randbedingungen

- Fernwärmenetz (FWN):



- Wärmeorientierter Betrieb

- Wirtschaftliche Rahmenbedingungen:
  - Strompreis: 25,2 ct/kWh (nach §45 EEG)
  - Wärmepreis: 7,2 ct/kWh [1]
  
- Betrachtung verschiedener Konzepte zur Strom- und Wärmeerzeugung:
  - Parallel
  - HHT-Konzept
  - LT-Konzept

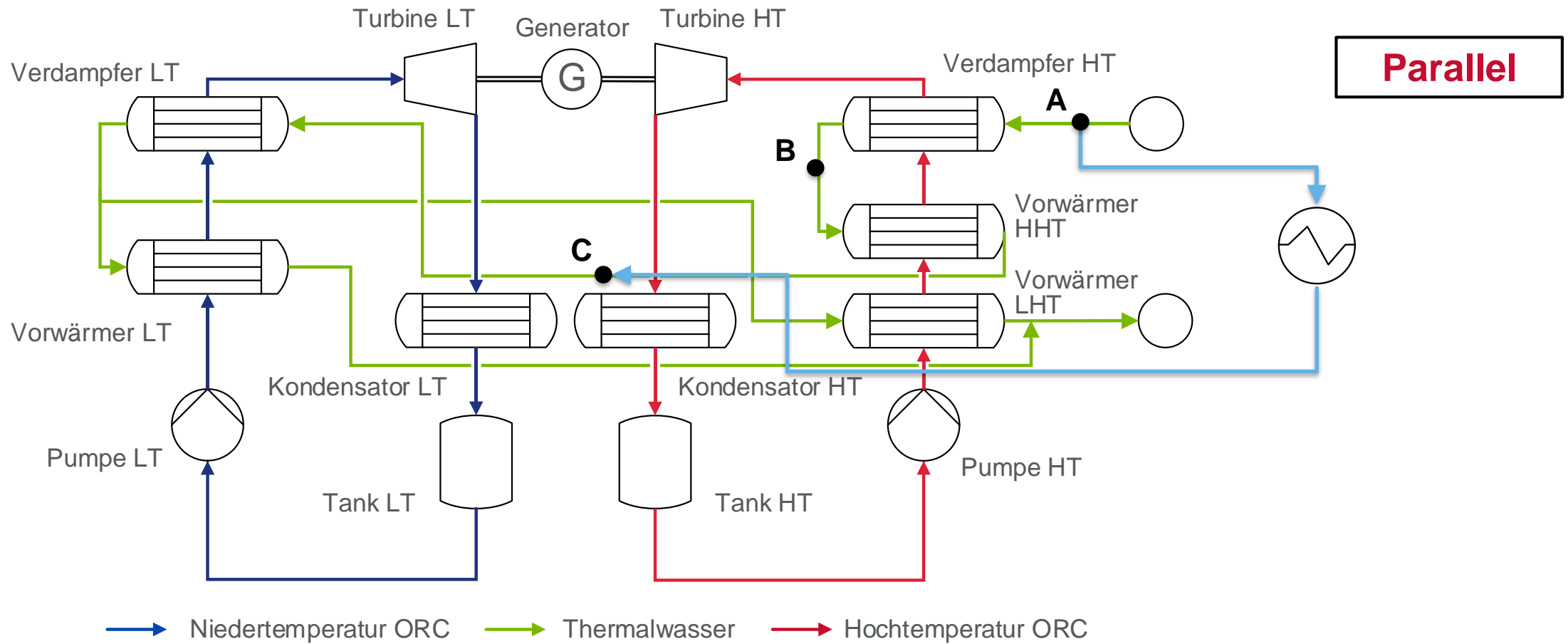


[1] AGFW - Der Effizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (Ed.): Fernwärme - Preisübersicht, Frankfurt am Main, 2019.

Bildquelle: <https://www.istockphoto.com/de/vektor/geldsack-euro-zeichnung-gm182026853-27550755>

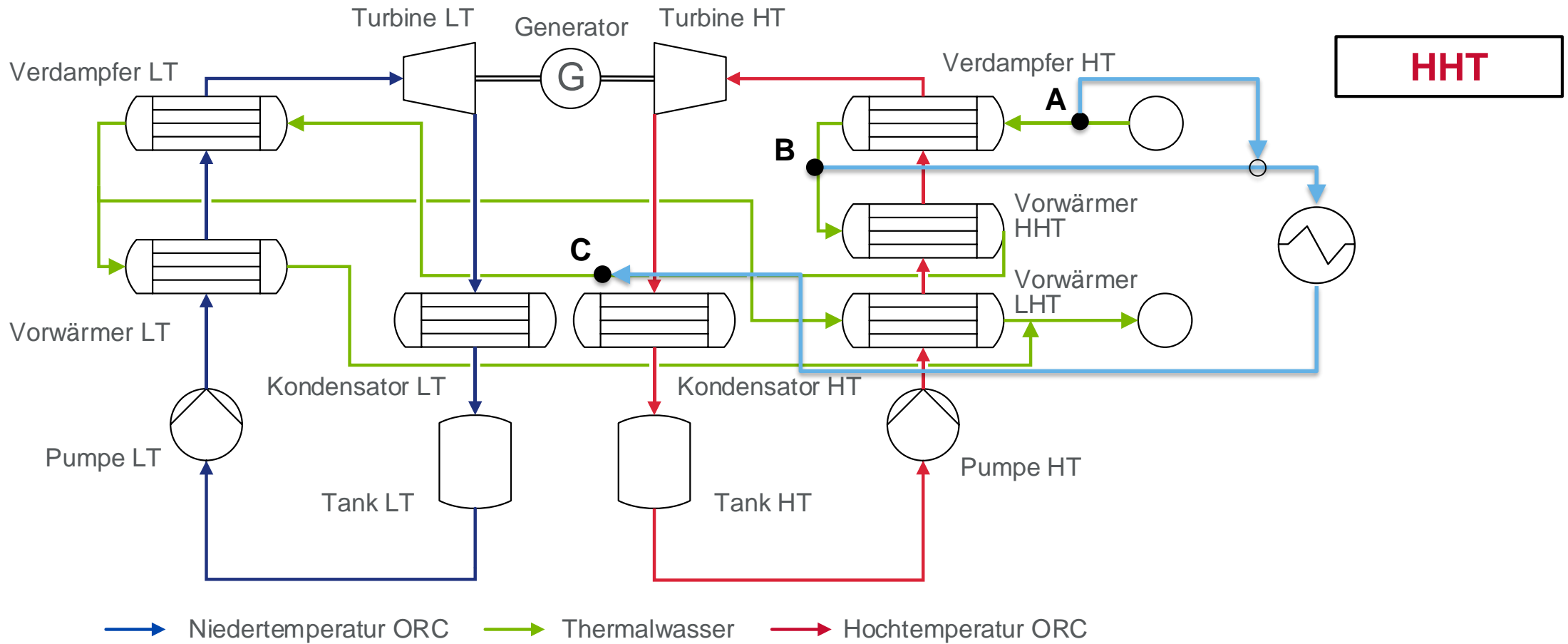
# Methodik

## Strom- und Wärmeerzeugungskonzepte



# Methodik

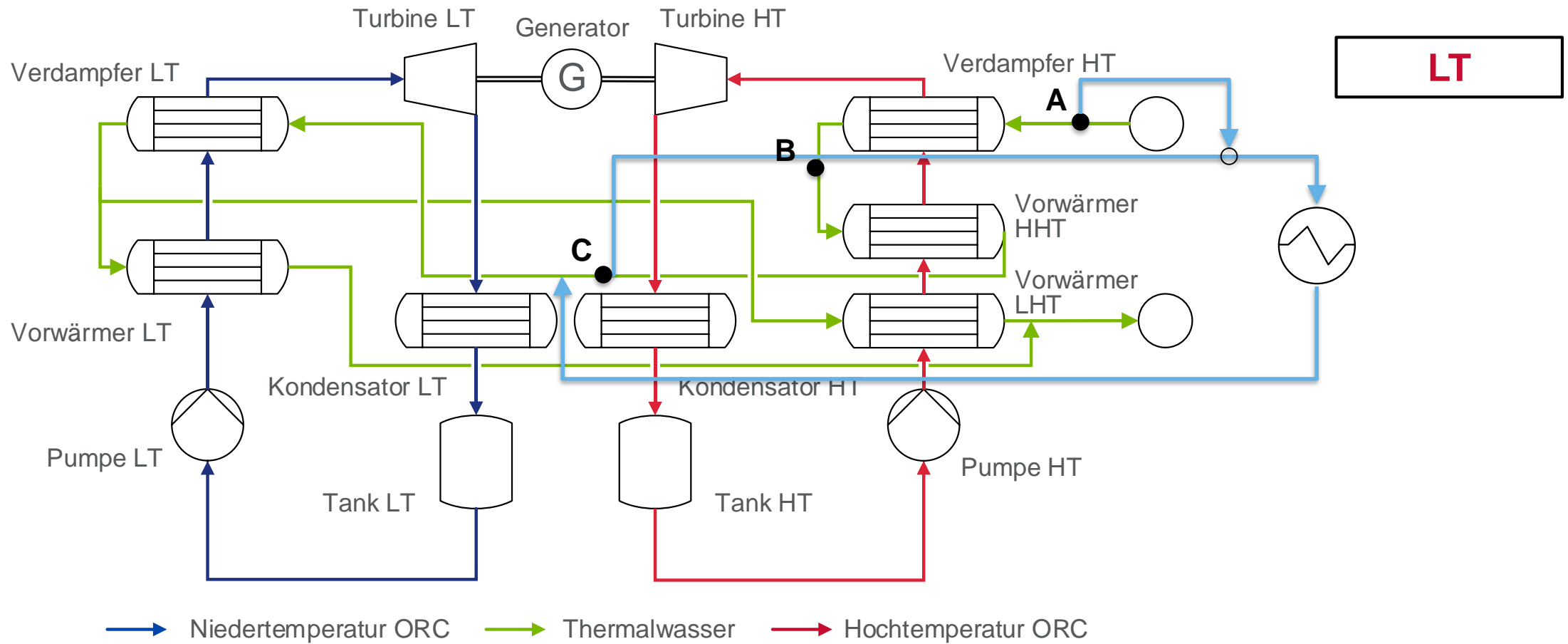
## Strom- und Wärmeerzeugungskonzepte



**HHT**

# Methodik

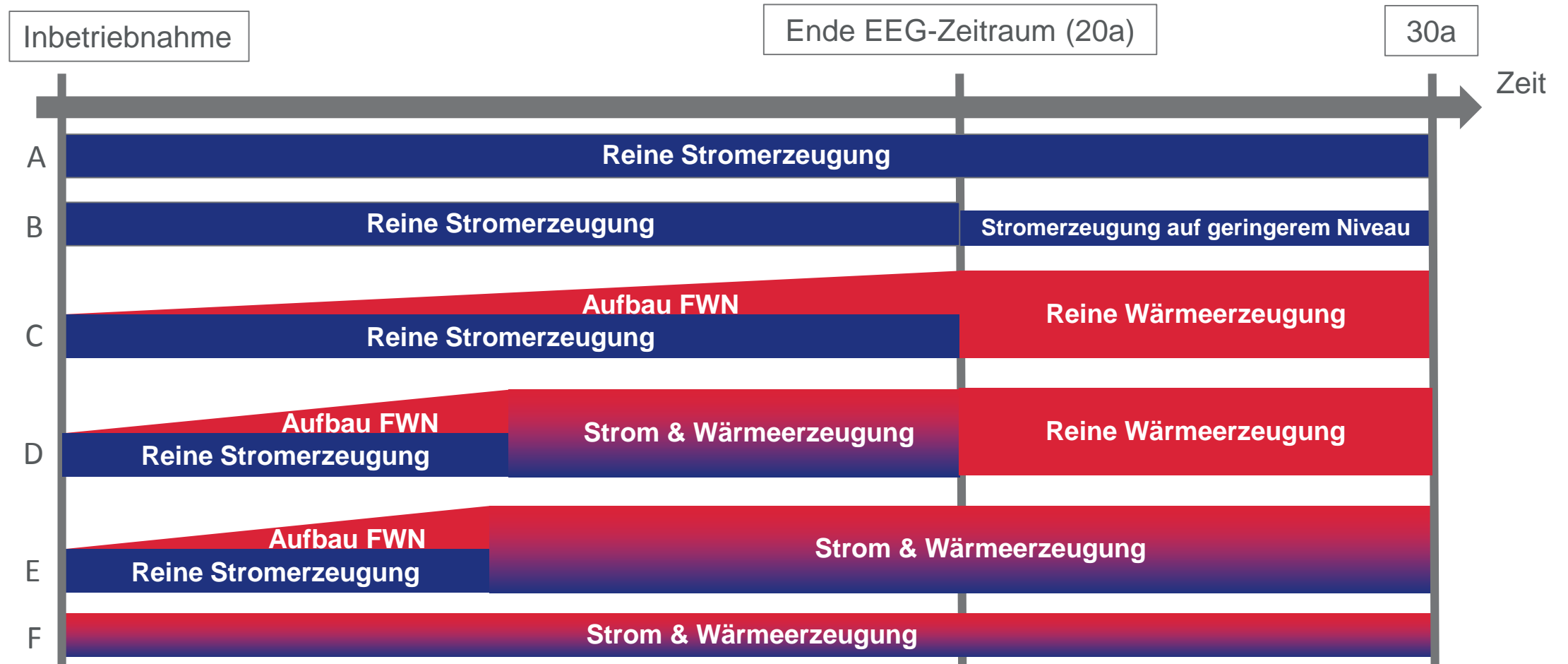
## Strom- und Wärmeerzeugungskonzepte



LT

# Methodik

## Szenario-Betrachtung



Kapitalwertmethode zur ökonomischen Bewertung der verschiedenen Szenarien:

$$C_0 = -K_{Inv} + \sum_{t=1}^n \frac{E_{Strom,t} + E_{Wärme,t}}{(1+i)^t}$$

Formelzeichen	Erläuterung
$E_t$	Erträge aus der Strom- und Wärmeerzeugung
$K_{inv}$	Investitionskosten Fernwärmenetz
$i$	Kalkulationszinssatz 9,36 %
$n$	Lebensdauer: 30 Jahre

Annahme Preissteigerungsrate: 2,1 %

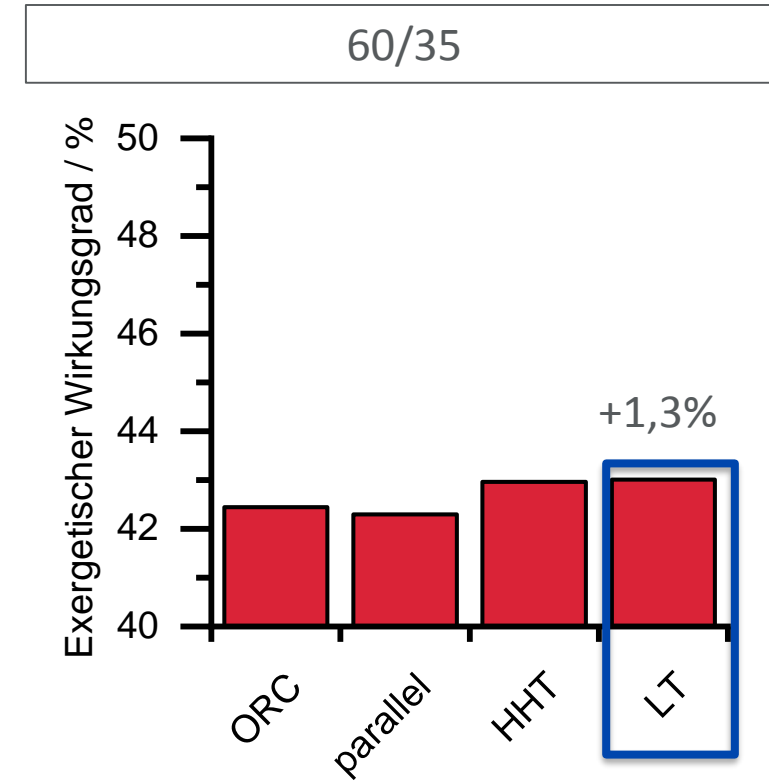
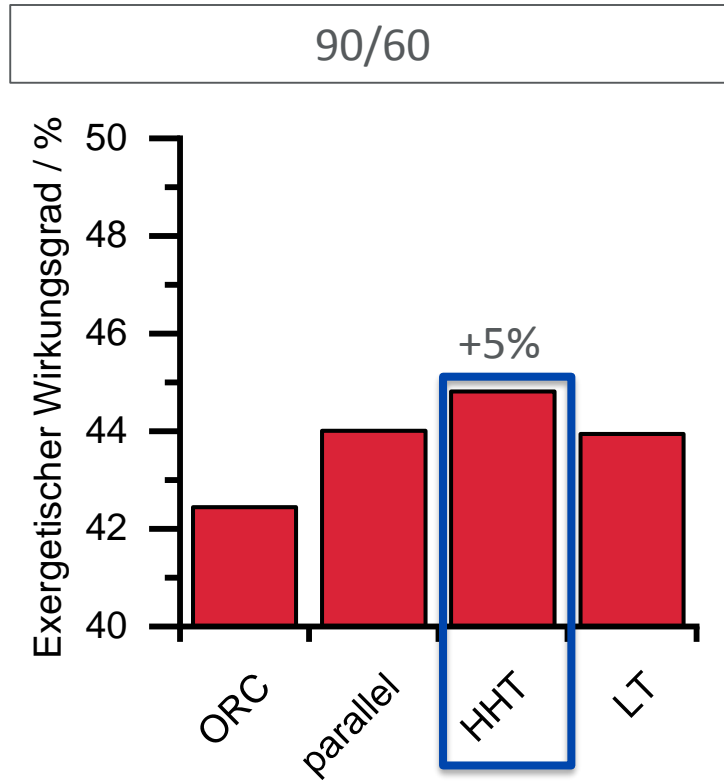
# Agenda

---

- 1) Motivation
- 2) Methodik
- 3) Ergebnisse**
- 4) Zusammenfassung

# Ergebnisse

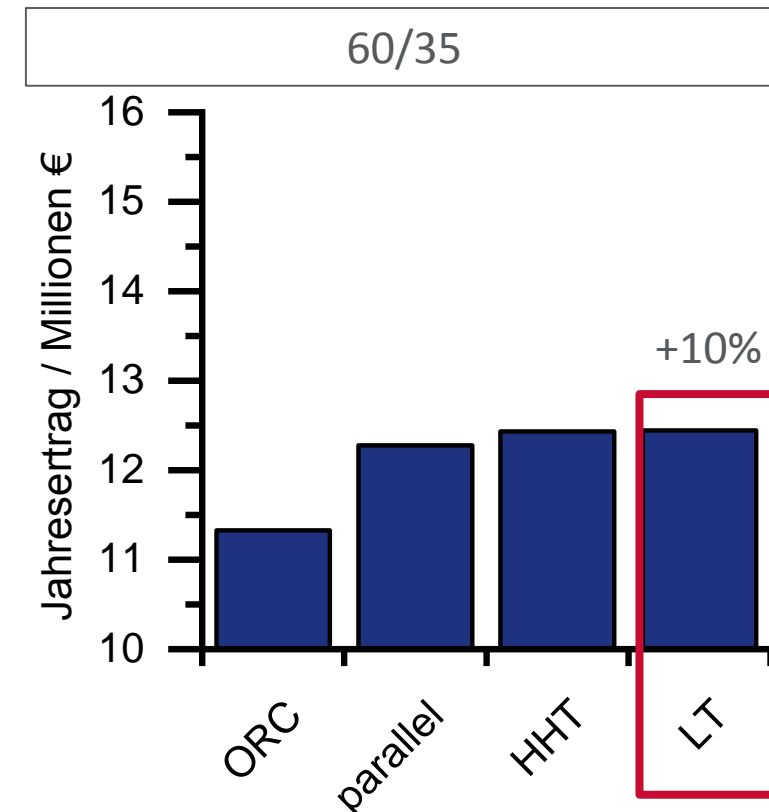
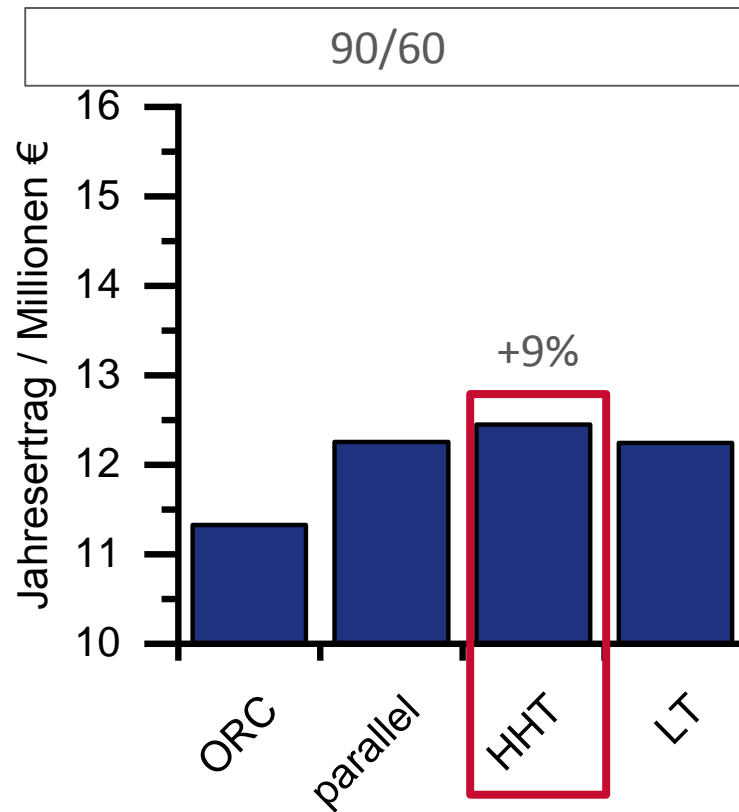
## Variation der Vor- und Rücklauftemperaturen



Zusätzliche Wärmeauskopplung führt zu höherem exergetischen Wirkungsgrad

# Ergebnisse

## Variation der Vor- und Rücklauftemperaturen



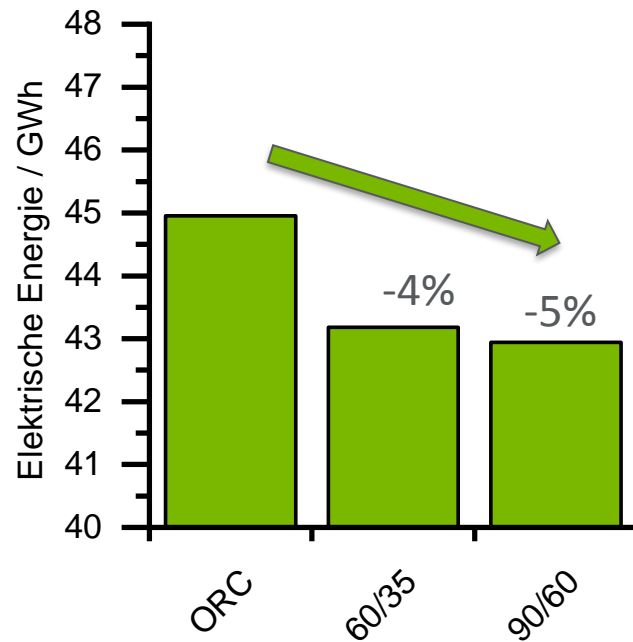
Zusätzliche Wärmeauskopplung führt zu höheren Jahreserträgen

# Ergebnisse

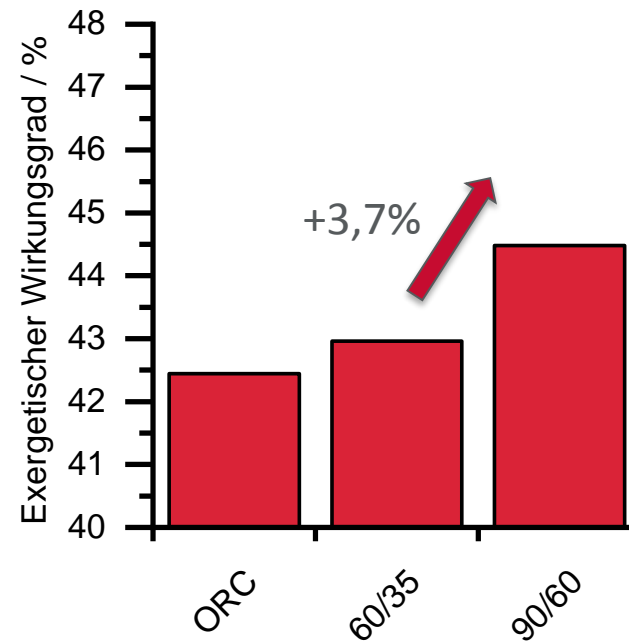
## Variation der Vor- und Rücklauftemperaturen

HHT-Konzept:

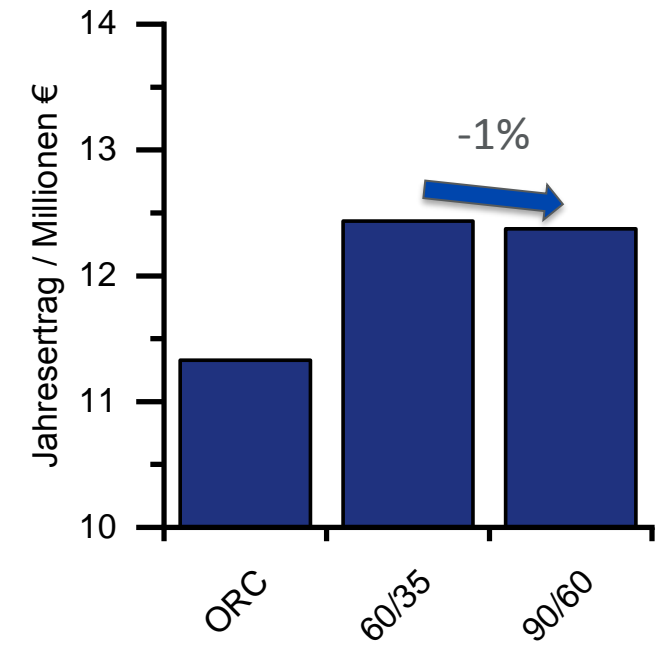
Elektrische Energieerzeugung



Exergetischer Wirkungsgrad



Jahreserträge

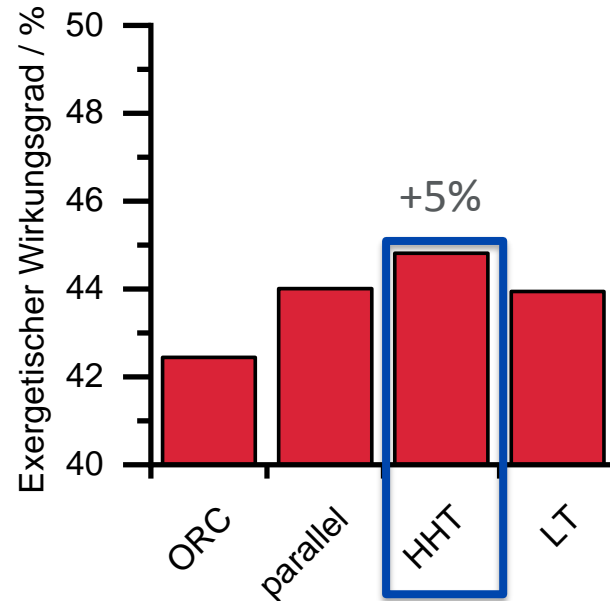


Höhere Vorlauftemperatur liefert höheren exergetischen Wirkungsgrad

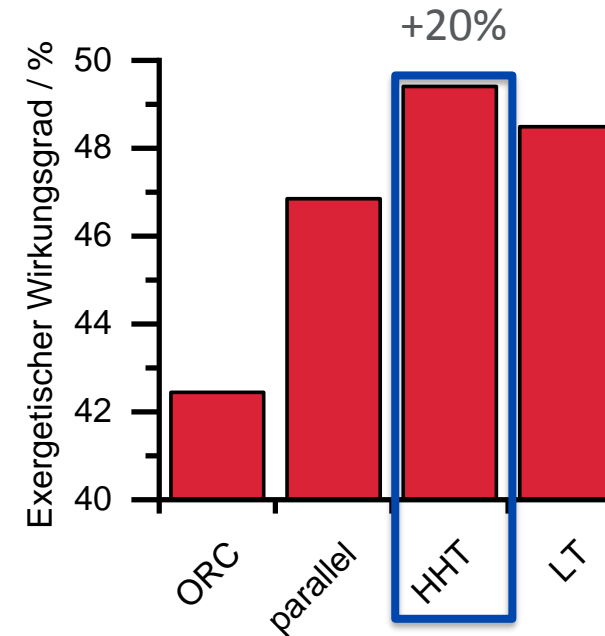
# Ergebnisse

## Jährlicher exergetischer Wirkungsgrad

5 MW



20 MW

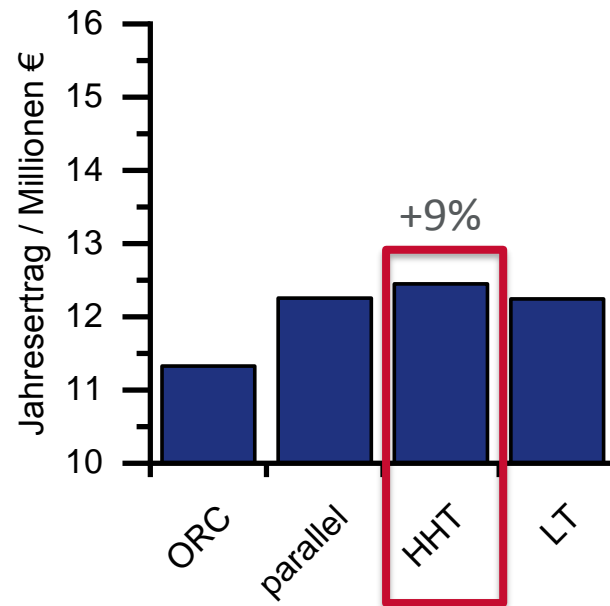


Höhere Spitzenlast des FWN führt zu höheren exergetischen Wirkungsgraden für alle Konfigurationen

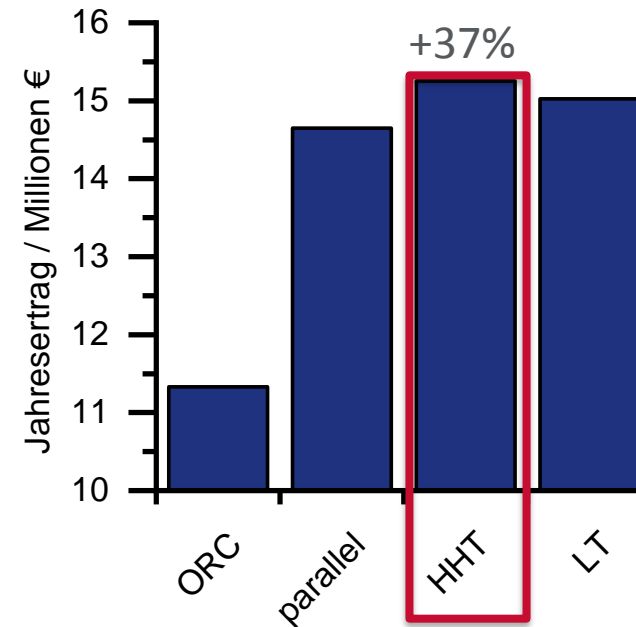
# Ergebnisse

## Jahreserträge

5 MW



20 MW



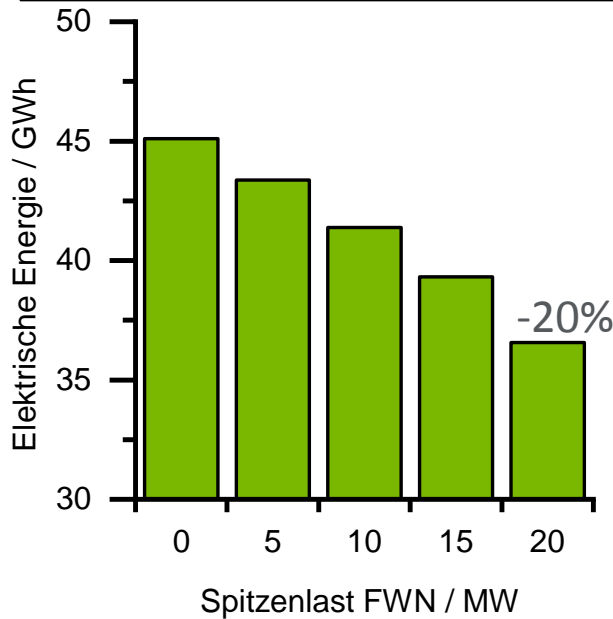
- Zusätzliche Wärmebereitstellung führt zu höheren Jahreserträgen
- Durch Erhöhung der Spitzenlast des FWN können die Erträge noch weiter gesteigert werden

# Ergebnisse

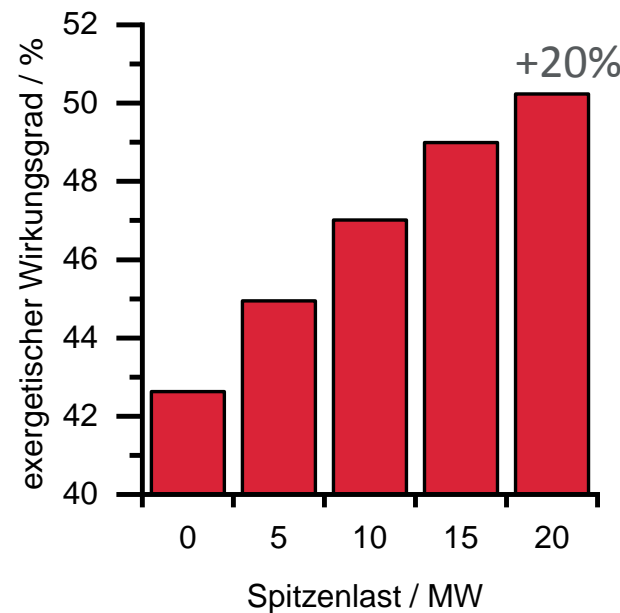
## Verschiedene Spitzenlasten des Fernwärmenetzes

HHT-Konzept:

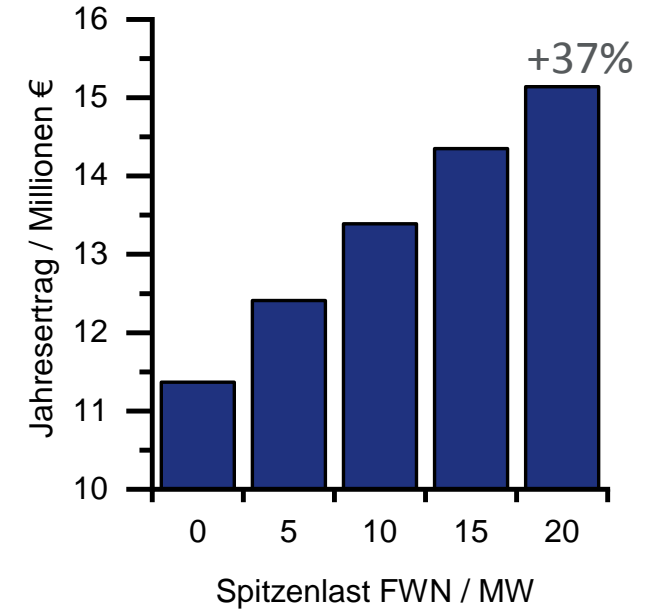
Elektrische Energieerzeugung



Exergetischer Wirkungsgrad



Jahreserträge

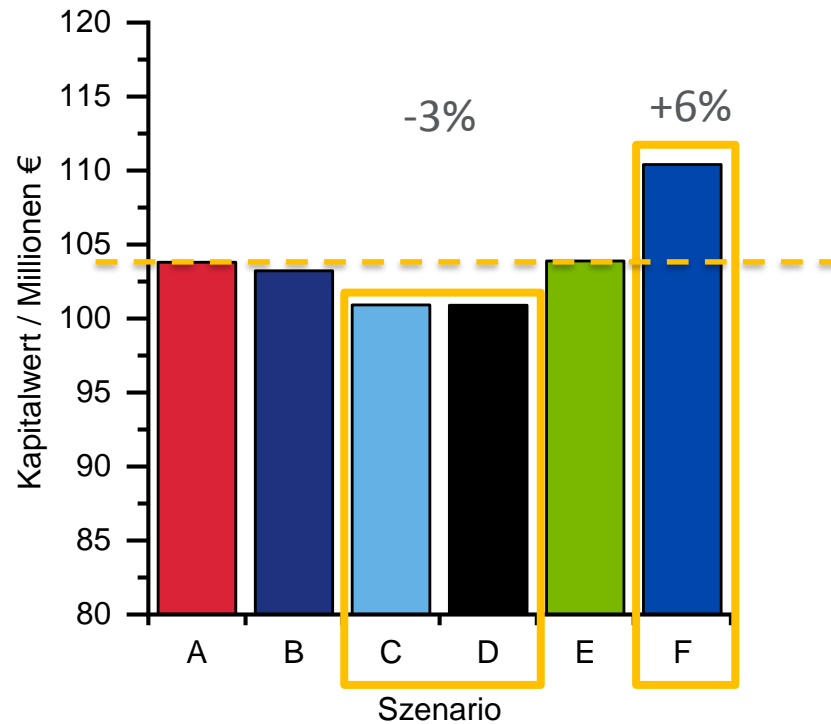


Je höher die Spitzenlast, desto geringer die elektrische Energieerzeugung und desto höher die Jahreserträge

# Ergebnisse

## Szenario-Betrachtung

### HHT-Konzept:



Szenario	EEG	nach EEG
A	Strom	Strom
B	Strom	Strom (80%)
C	Strom	Wärme
D	Strom/Strom & Wärme	Wärme
E	Strom/Strom & Wärme	Strom & Wärme
F	Strom & Wärme	Strom & Wärme



**Die Strom- und Wärmeerzeugung zeigt den höchsten Kapitalwert**

# Agenda

---

- 1) Motivation
- 2) Methodik
- 3) Ergebnisse
- 4) Zusammenfassung**

# Zusammenfassung

- Durchführung von Jahressimulationen von **geothermischen Strom- und Wärmeerzeugungskonzepten**
- Die Strom- und Wärmeerzeugung führt zu **höheren exergetischen Wirkungsgraden und Jahreserträgen** (als die reine Stromerzeugung).
- Je höher die **Vorlauftemperatur** des Fernwärmenetzes desto höher der **exergetische Wirkungsgrad**.
- Je höher die Spitzenlast des Fernwärmenetzes desto **höher die Jahreserträge** und desto geringer die **erzeugte elektrische Energiemenge**.
- Die **Strom- und Wärmeerzeugung** zeigt den **höchsten Kapitalwert** über die Lebensdauer des Kraftwerks.
- **Nächste Schritte:**
  - Untersuchung der Auswirkungen auf die Reinjektionstemperatur des Thermalwassers
  - Integration eines thermischen Speichers in das Fernwärmenetz

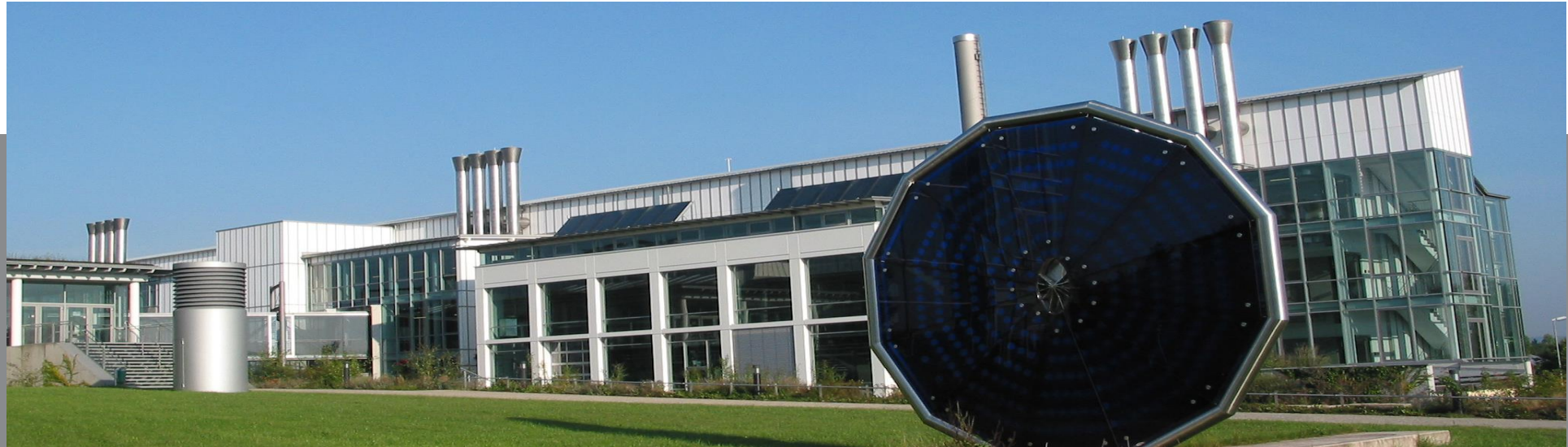
Besonderer Dank gilt dem bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst für die Förderung dieser Arbeiten im Rahmen der Geothermie-Allianz Bayern!

## Geothermie-Allianz Bayern



Bayerisches Staatsministerium für  
Wissenschaft und Kunst





Vielen Dank

[www.zet.uni-bayreuth.de](http://www.zet.uni-bayreuth.de)

T. Eller, F. Heberle und D. Brüggemann