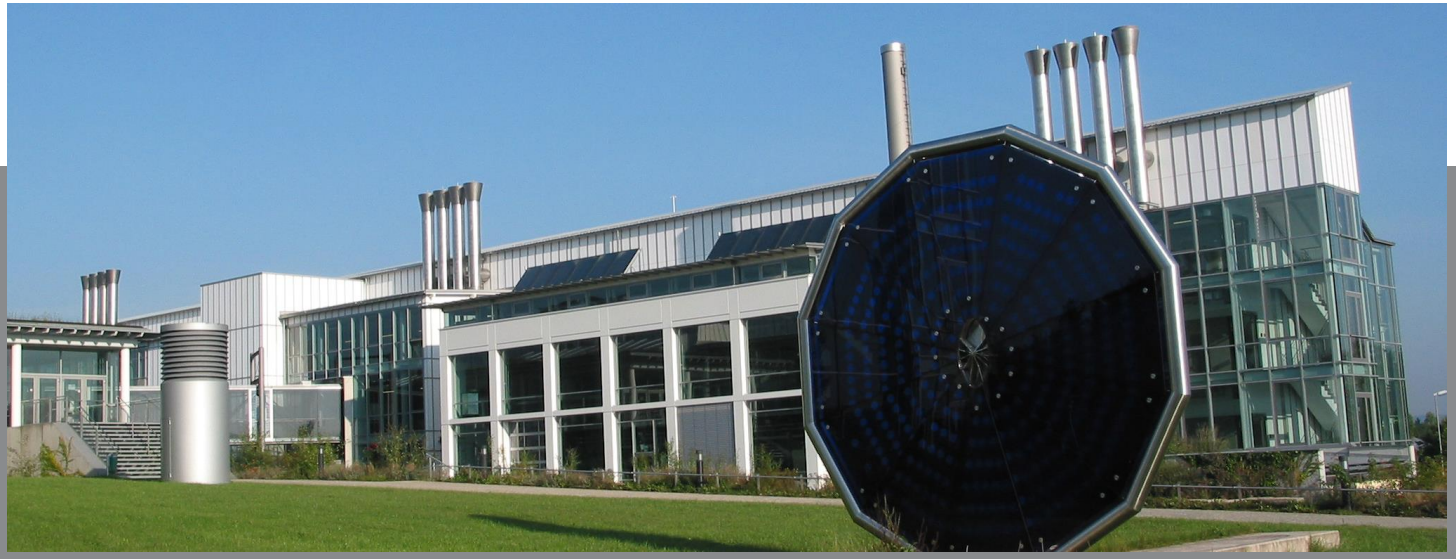


Transiente Simulation der geothermischen Kraft-Wärme-Kopplung für eine belastbare energetische und wirtschaftliche Bewertung

4. Schweizer ORC Symposium

T. Eller, F. Heberle und D. Brüggemann

UNIVERSITÄT BAYREUTH

LEHRSTUHL FÜR TECHNISCHE THERMODYNAMIK UND TRANSPORTPROZESSE
PROF. DR.-ING. D. BRÜGGEMANN

ZET
Zentrum für Energietechnik

Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern

2) Motivation

3) Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

4) Wärmeauskopplung

5) Ergebnisse

6) Durchführung von Jahresertragssimulationen

7) Zusammenfassung und Ausblick

Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern

2) Motivation

3) Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

4) Wärmeauskopplung

5) Ergebnisse

6) Durchführung von Jahresertragssimulationen

7) Zusammenfassung und Ausblick

Geothermie-Allianz Bayern

Teilprojekt: Effiziente und flexible Kraftwerke

Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung

Thermo-dynamische Optimierung

Bewertung von ORC-Arbeitsmedien

Ziel:
Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Geothermie-Kraftwerken

Potenzial-analyse der Geothermie

Simulations-gestützte Optimierung

Experimentelle Untersuchungen

Geothermie-Allianz Bayern

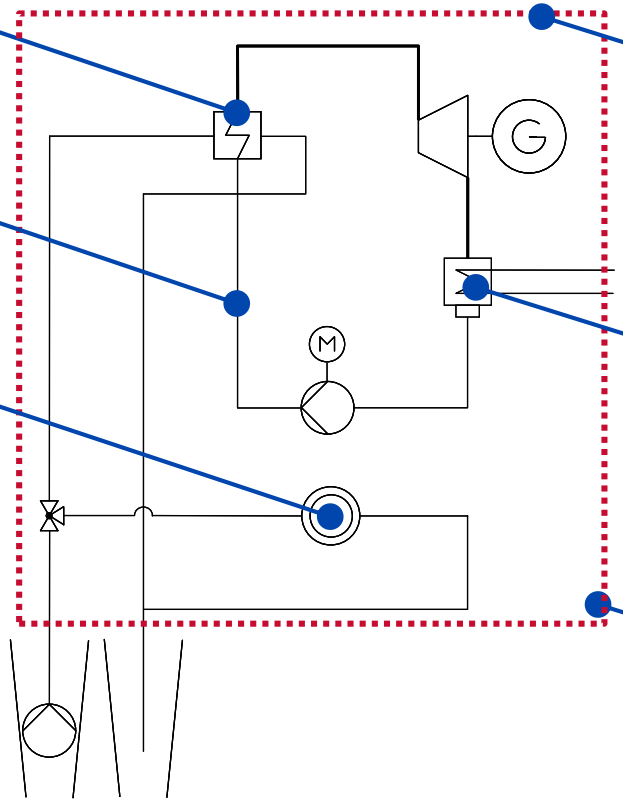
Teilprojekt: Effiziente und flexible Kraftwerke

Wärme-übergänge
LTTT

Anwendbarkeit verschiedener Arbeitsmedien
LES

Fernwärmenetz-topologien
ENS

Geothermisches Potenzial
LES, ENS



Kreislauf-Optimierung
LES

Dynamische Simulation
LTTT

Kondensations-Konzepte
LES

Wärmeübertrager-optimierung
LTTT

Flexible KWK Konzepte
LES

Geothermie-Allianz Bayern

Forschungsschwerpunkte

LES TUM

- Zukünftige Anforderungen an geothermische Kraftwerke und Potenzial der Geothermie
- Anwendbarkeit verschiedener Arbeitsmedien
- Untersuchung verschiedener Kondensationskonzepte
- Simulationsgestützte Kreislaufoptimierung; auch für Innovative Kreisläufe
- Experimentelle Untersuchung von effizienten und flexiblen ORC – KWK Konzepten

LTTT UBT

- Wärmeübergängen bei verschiedenen Arbeitsmedien
- Simulationsgestützte Wärmetauscher Optimierung
- Dynamische Modellierung von ORC-KWK Konzepten

ENS TUM

- Wärme- und Stromnutzungskonzept für geothermisches Potenzial
- Möglichkeiten der Verbundvermarktung und Marktentwicklung
- Berechnung möglicher Fernwärmenetztopologien

Geothermisches Potenzial | Arbeitsmedien

Kondensation | ORC - KWK Konzepte

Geothermie-Allianz Bayern

Arbeitsinhalte am ZET

- Projektteam am ZET:

SIM	Dynamische Modellierung von ORC-KWK Konzepten
OPT	Simulationsgestützte Wärmetauscher Optimierung
WÜ	Wärmeübergänge bei verschiedenen Arbeitsmedien

Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern

2) **Motivation**

3) Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

4) Wärmeauskopplung

5) Ergebnisse

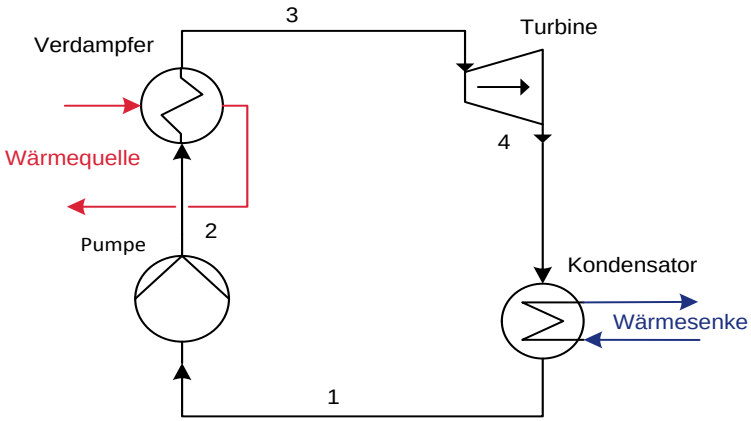
6) Durchführung von Jahresertragssimulationen

7) Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Geothermisches Potenzial

- Geothermie als erneuerbare Energiequelle zur CO_2-armen Strom- und Wärmeerzeugung
- Geschätztes erschließbares technisch-ökologisches Potenzial zur reinen Stromerzeugung: **8,5 GW bzw. 63,75 TWh/a**



Quelle: Kirchstockach

Motivation

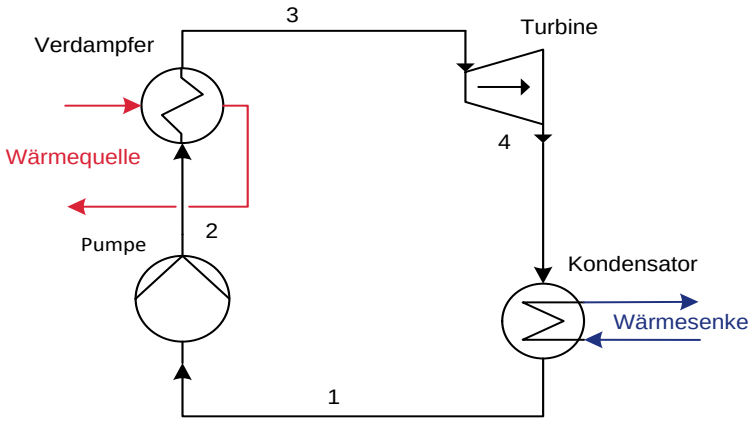
Geothermische Strom- und Wärmeerzeugung

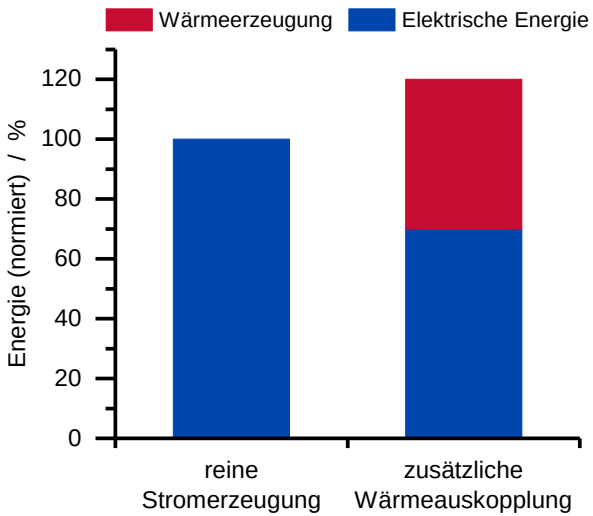
Organic Rankine Cycle (ORC) zur Umwandlung der thermischen Energie des Thermalwassers in elektrische Energie

Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit eines geothermischen Kraftwerks durch zusätzliche Wärmeauskopplung

Zeitlich fluktuierende Wärmeabnahme führt zu Betrieb in Teillastbereichen

Entwicklung eines dynamisches Modells eines Organic Rankine Cycle





Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern

2) Motivation

3) **Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells**

4) Wärmeauskopplung

5) Ergebnisse

6) Durchführung von Jahresertragssimulationen

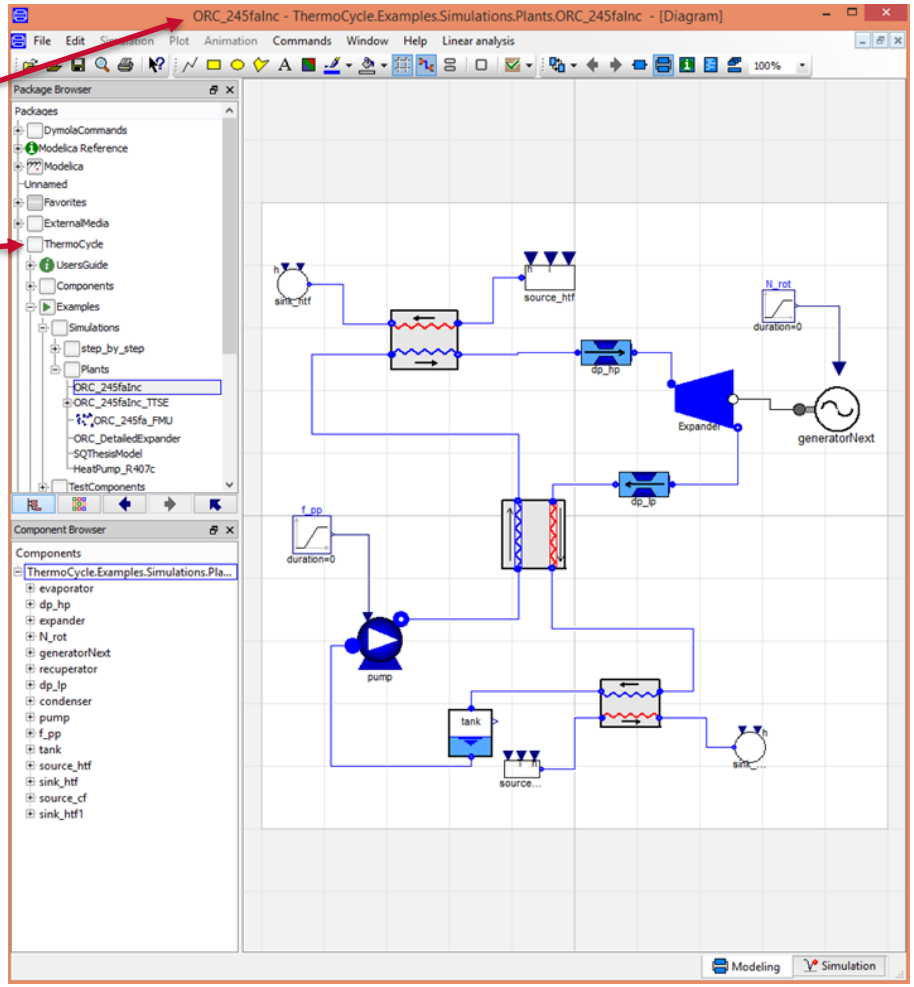
7) Zusammenfassung und Ausblick

Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Modellierung

- Zur dynamischen Simulation des thermodynamischen Kreisprozesses wird die Software **Dymola** in Verbindung mit der Bibliothek **ThermoCycle** verwendet.

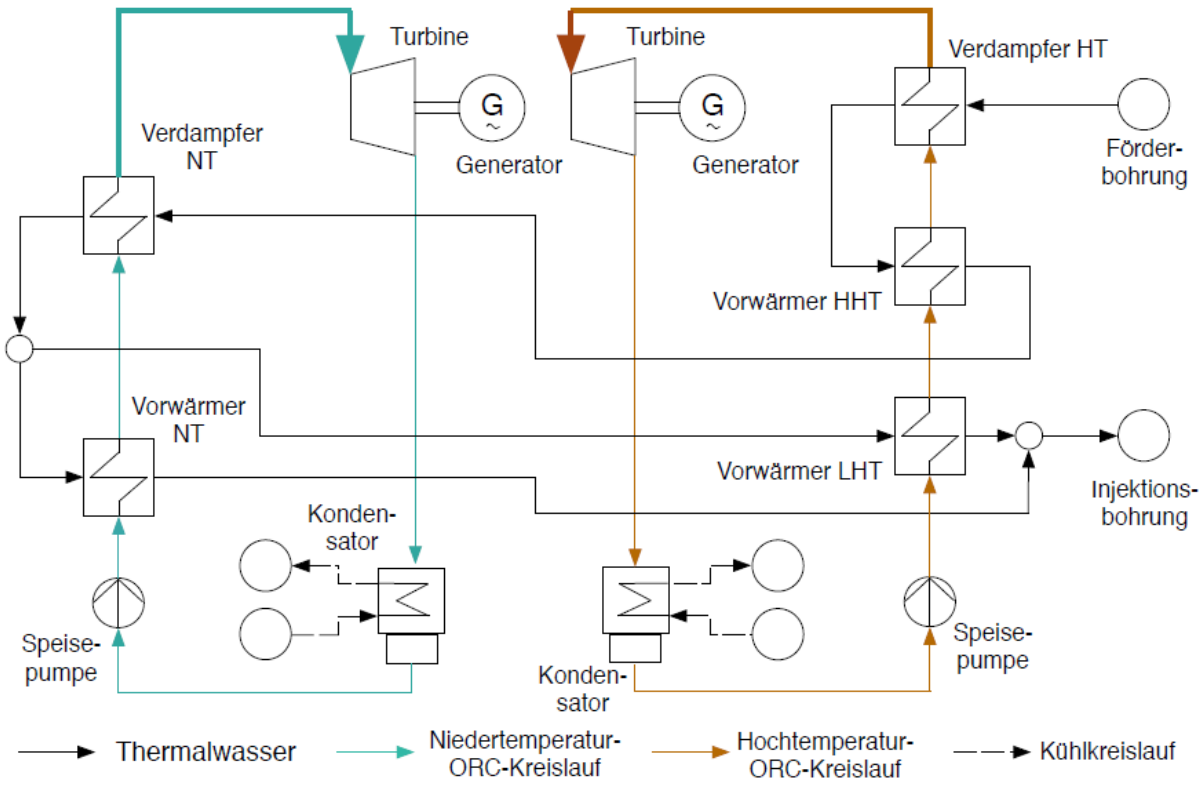
- Für die Berechnung der benötigten Stoffdaten wird die Software Coolprop eingesetzt.



Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Modellierung

Zweistufiger Organic Rankine Cycle eines Kraftwerks im süddeutschen Molassebecken



Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Dynamische Modellierung

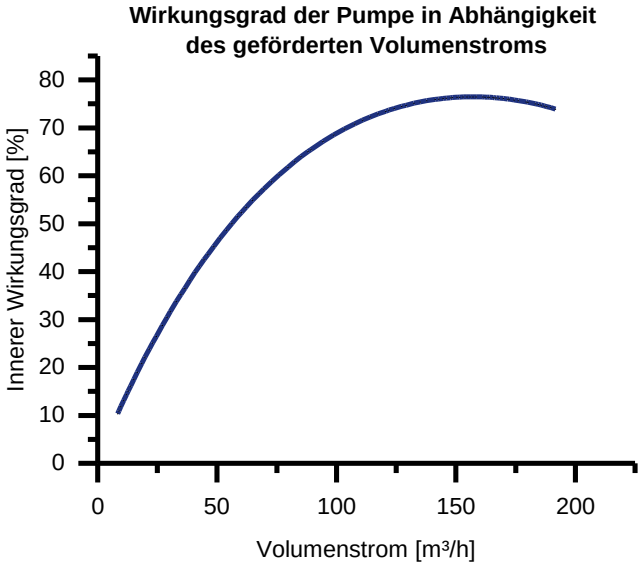
Pumpe/Turbine

- Modellierung als quasistationäre Modelle (Anhäufung von Masse, Impuls und Energie ist vernachlässigbar) [1,2]

Am Beispiel der Pumpe:

$$h_{ex} = h_{su} + \frac{p_{ex} - p_{su}}{\eta \rho_{su}}$$

Kennlinie für inneren Wirkungsgrad *η=f(Volumenstrom)* aus Datenblatt



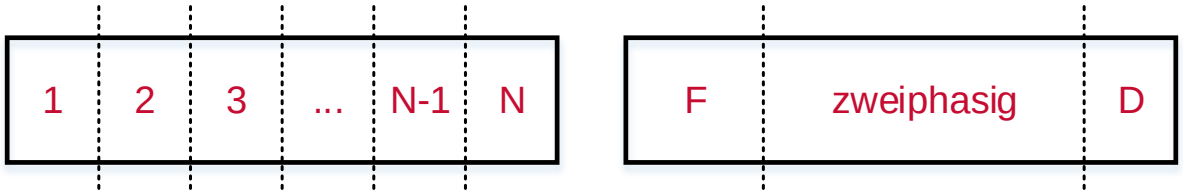
[1] van Putten H, Colonna P. Dynamic modeling of steam power cycles: Part II – Simulation of a small simple Rankine cycle system. Applied Thermal Engineering 2007;27(14-15):2566–82.
[2] Wei D, Lu X, Lu Z, Gu J. Dynamic modeling and simulation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system for waste heat recovery. Applied Thermal Engineering 2008;28(10):1216–24.

Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Dynamische Modellierung

Wärmeübertrager

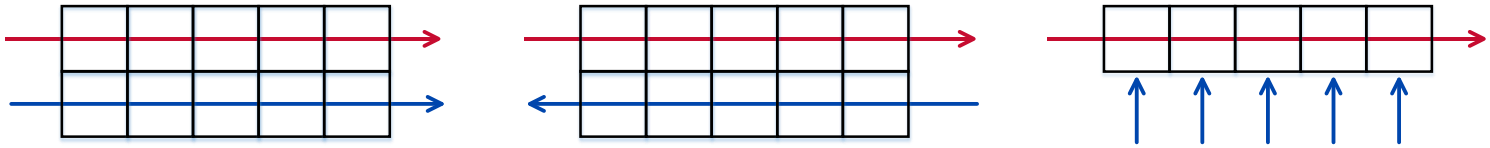
- Modellierung als Finite-Volume Modelle (vs. Moving-Boundary Modelle)



- Energiebilanz:

$$V_i \rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = \dot{M}_{su}(h_{su} - h) - \dot{M}_{ex}(h_{ex} - h) + \dot{Q}_i + V_i \frac{dp}{dt}$$

- Anpassung der Zellenmodelle an jeweilige Strömungsform (Parallel-, Gegen- oder Kreuzstrom)



- Implementierung von im Hinblick auf die Strömungsführung passenden Korrelationen für den Wärmeübergang

Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Dynamische Modellierung

Wärmeübertrager

- Dynamische Modellierung [3]:

1) Entwicklung eines stationären Models mit passenden Korrelationen für den Wärmeübergangskoeffizienten

2) Berechnung eines Wärmeübergangskoeffizienten für den Auslegungsfall α_{nom}

3) Vereinfachung der Korrelationen und Berechnung eines dynamischen Wärmeübergangskoeffizienten ausgehend vom Auslegungsfall

$$\alpha = \alpha_{nom} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{k_i}{k_{i,nom}}\right)^{b_i}$$

[3] Quoilin S. Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications. PhD Thesis, University of Liège, 2011.

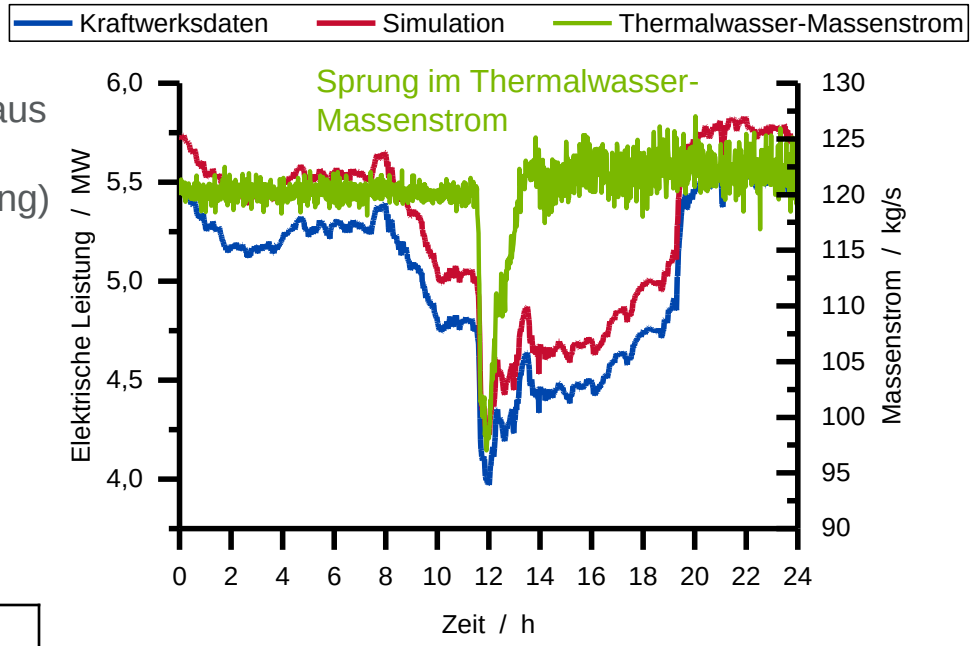
Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Validierung

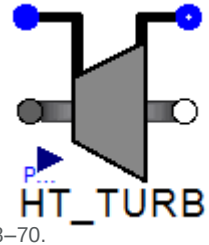
Turbine

- Input:
  - Kennlinie für isentropen Wirkungsgrad aus Literatur: [4]
    η_{is} =f(Volumenstrom, Enthalpie-Änderung)
  - Zustandsvektor am Eintritt ($\dot{m}$,p,T)
  - Auslassdruck (p_{out})
  - Netzfrequenz (f_{el})

- Output:
  - Elektrische Leistung P_{el}



Ergebnisse	Relative Abweichung	[%]
	Mittel	5,0
	Maximal	6,5
	Minimal	4,4



[4] Ghasemi H, Sheu E, Tizzanini A, Paci M, Mitsos A. Hybrid solar–geothermal power generation: Optimal retrofitting. Applied Energy 2014;131:158–70.

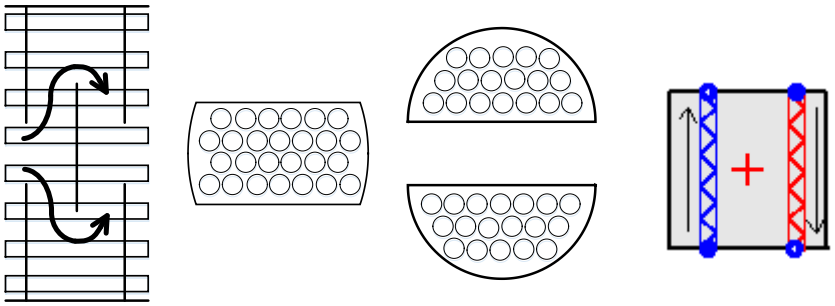
Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Validierung

Vorwärmer – Auslegungsfall Arbeitsmedium

- Input:
  - Korrelation Bell-Delaware (angepasst)
  - Geometrie des Wärmeübertragers
  - Zustandsvektor am Eintritt ($\dot{m}$,p,T)
- Output:
  - Austrittstemperatur T_{out}
  - Nominalwerte:
    - Wärmeübergangskoeffizient α_{nom}
    - Druckverlust Δp_{nom}
    - Massenstrom $\dot{m}_{nom}$

Ergebnisse			
	Austrittstemperatur (Messdaten)	[°C]	98,0
	Austrittstemperatur (Simulation)	[°C]	98,14
	Absolute Abweichung	[K]	0,14
	Relative Abweichung	[%]	0,04



Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

Validierung

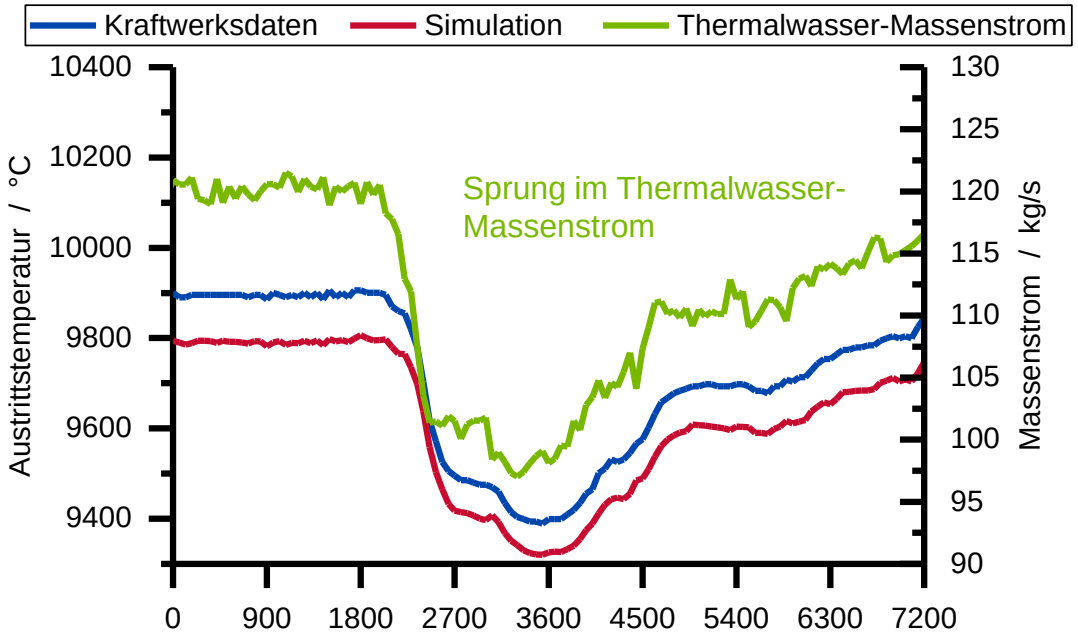
Vorwärmer – dynamischer Lastfall
Arbeitsmedium

- Input:

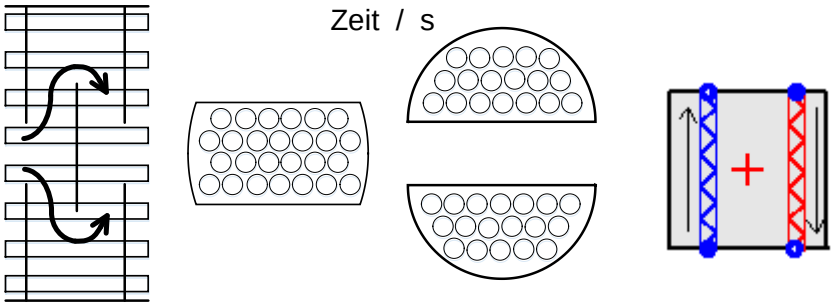
$$\alpha = \alpha_{nom}\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{nom}}\right)^{0,6} = 1455,84\frac{W}{m^2K}\left(\frac{\dot{m}}{117,7\frac{kg}{s}}\right)^{0,6}$$

$$\Delta p = \Delta p_{nom}\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{nom}}\right)^{2} = 66,17kPa\left(\frac{\dot{m}}{117,7\frac{kg}{s}}\right)^{2}$$

- Output:
  - Austrittstemperatur T_{out}



Ergebnisse	Relative Abweichung	[%]
	Mittel	- 0,28
	Maximal	0,16
	Minimal	-0,32

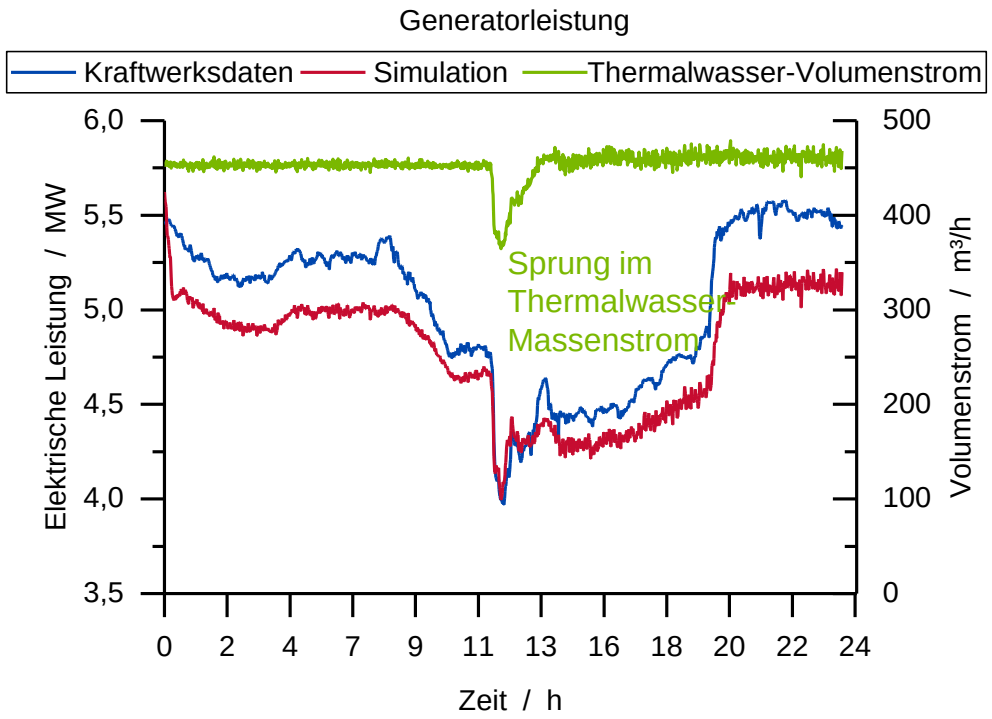


Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

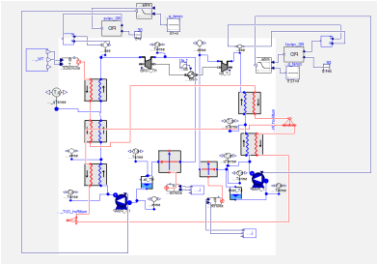
Validierung des Gesamtsystems

Zweistufiger ORC – Generatorleistung

- Input:
  - Thermalwasser-Volumenstrom
  - Thermalwasser-Temperatur
  - Elektrische Leistung der Lüfter (HT und LT)
  - Umgebungstemperatur
- Output:
  - Elektrische Leistung P_{el}



Ergebnisse	Relative Abweichung	[%]
	Mittel	-5,4
	Maximal	2,8
	Minimal	-11,1



Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern

2) Motivation

3) Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

4) **Wärmeauskopplung**

5) Ergebnisse

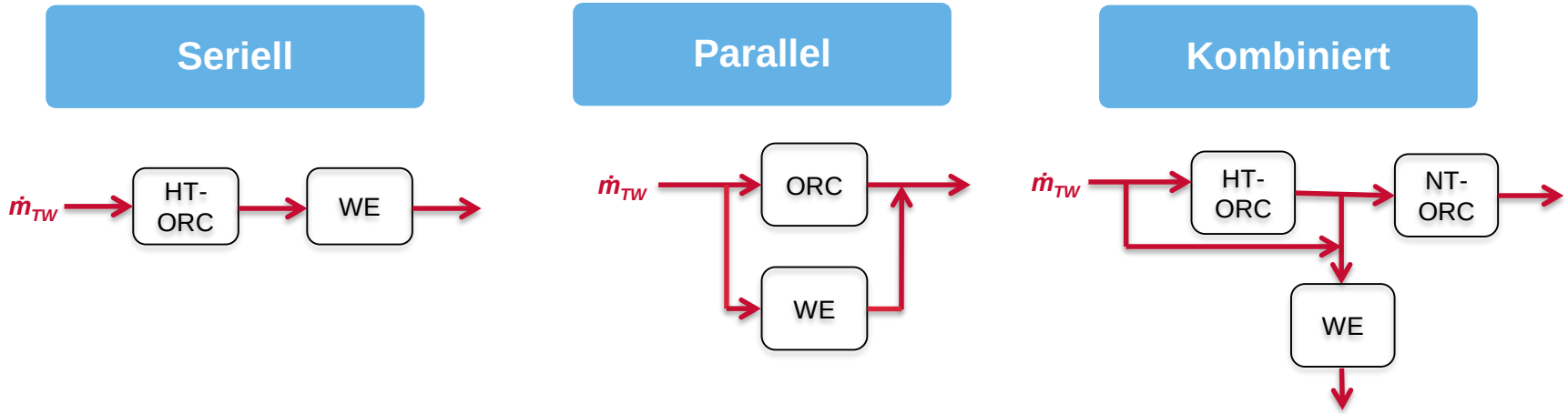
6) Durchführung von Jahresertragssimulationen

7) Zusammenfassung und Ausblick

Wärmeauskopplung

Parallele Wärmeauskopplung am Beispiel eines Wintertages

- Möglichkeiten der geothermischen Wärmeauskopplung:

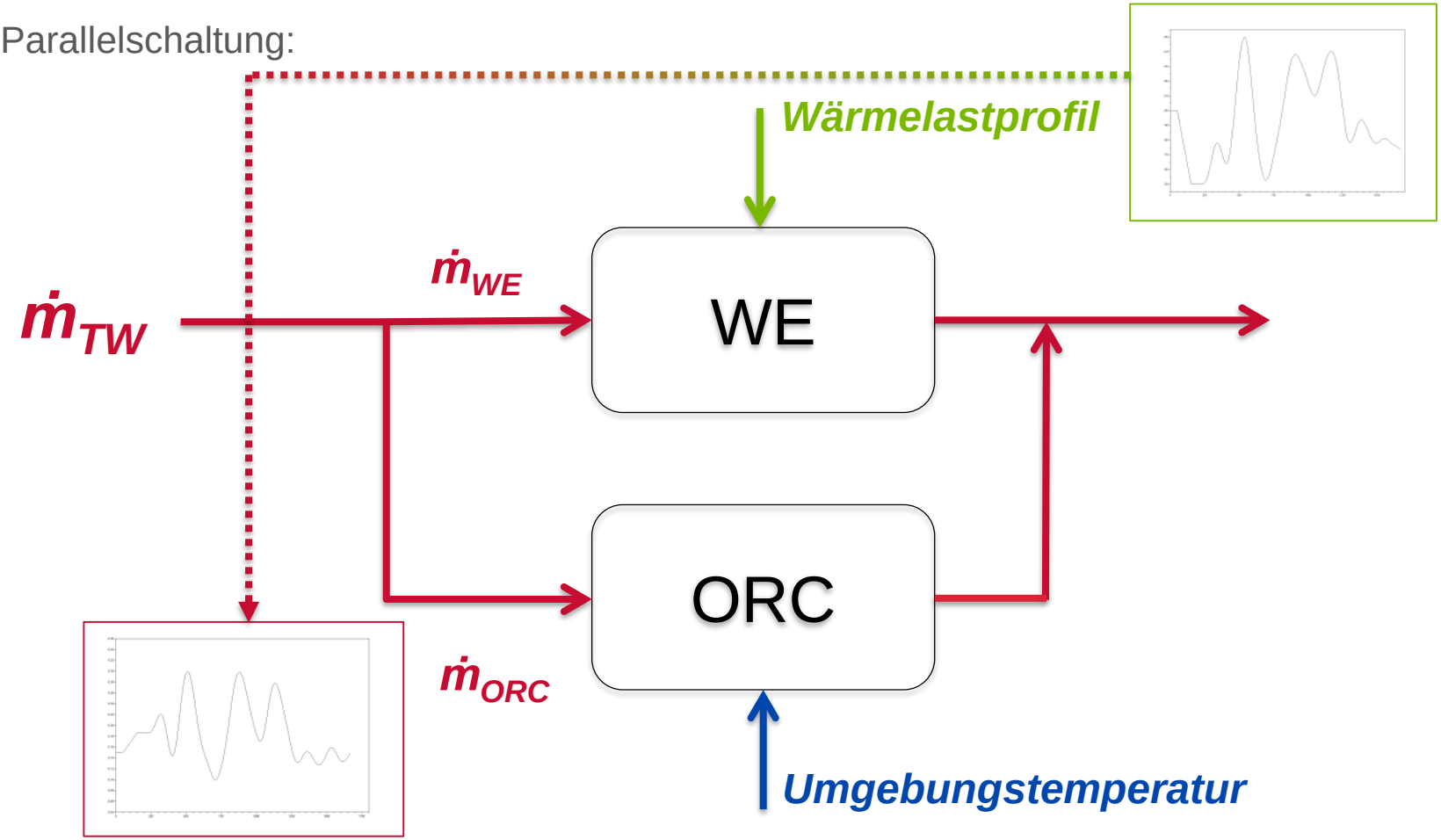


Vergleich der reinen Stromerzeugung mit paralleler Wärmeauskopplung am Beispiel eines Wintertages

Wärmeauskopplung

Parallele Wärmeauskopplung am Beispiel eines Wintertages

- Parallelschaltung:



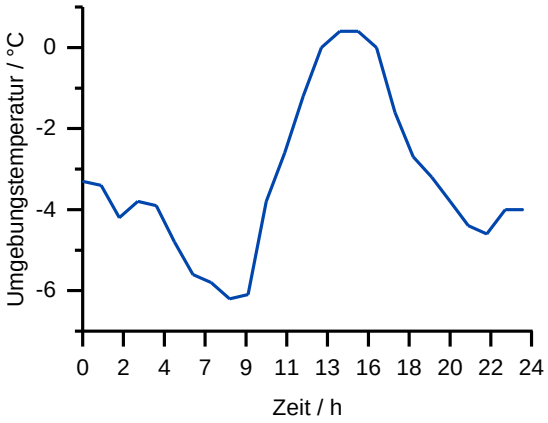
Wärmeauskopplung

Parallele Wärmeauskopplung am Beispiel eines Wintertages

Charakteristische Daten:

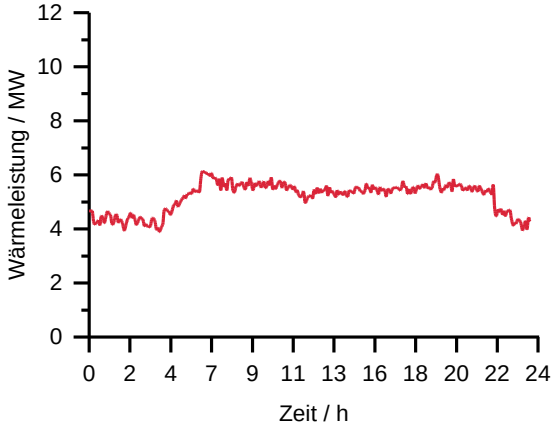
Umgebungstemperatur:

- Durchschnittliche Außentemperatur: -3,3 °C
- Maximaltemperatur: 0,4 °C
- Minimaltemperatur: -6,2 °C.



Wärmebedarf:

- Durchschnittliche Wärmebedarf: 5,2 MW
- Maximaler Wärmebedarf: 6,1 MW
- Minimaler Wärmebedarf: 3,9 MW



Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern

2) Motivation

3) Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

4) Wärmeauskopplung

5) **Ergebnisse**

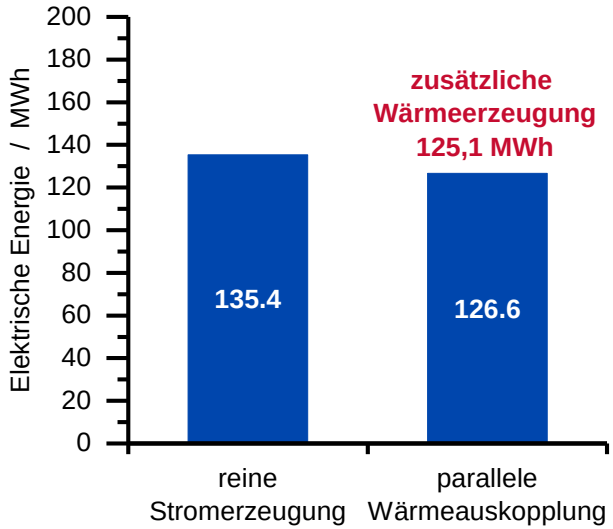
6) Durchführung von Jahresertragssimulationen

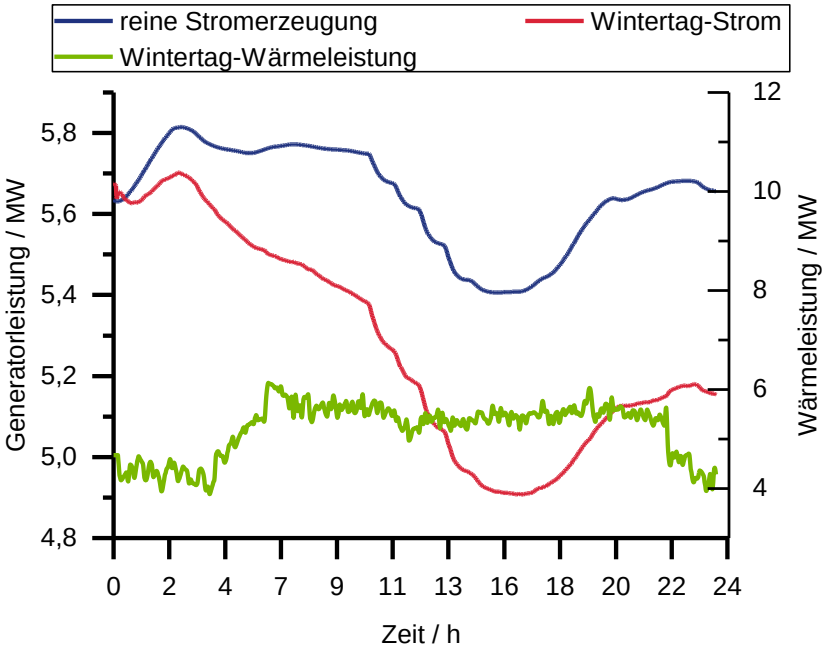
7) Zusammenfassung und Ausblick

Ergebnisse

Parallele Wärmeauskopplung am Beispiel eines Wintertages

Betrachtung der erzeugten elektrischen Energie bei reiner Stromerzeugung und Wärmauskopplung:





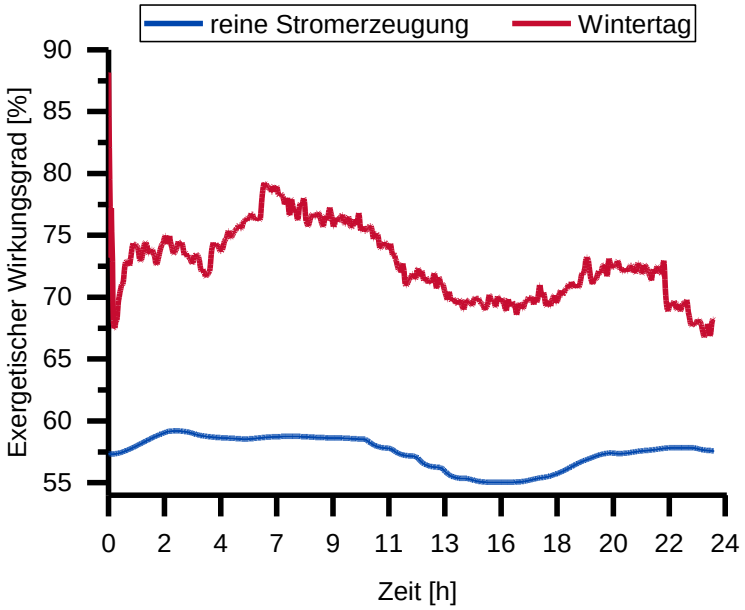
- **Abnahme der elektrischen Energieerzeugung von 6,5 %**
- **Zusätzlich bei der Kraft-Wärme-Kopplung bereitgestellte Wärme: 125,1 MWh**

Ergebnisse

Parallele Wärmeauskopplung am Beispiel eines Wintertages

Betrachtung des exergetischen Wirkungsgrades bei reiner Stromerzeugung und paralleler Wärmauskopplung:

- Reine Stromerzeugung:
  maximaler Wirkungsgrad: 59,2 %
- Paralleler Wärmeauskopplung:
  maximaler Wirkungsgrad: 79,2 %



Erhöhung der Effizienz des geothermischen Kraftwerks durch zusätzliche (parallele) Wärmeauskopplung

Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern

2) Motivation

3) Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells

4) Wärmeauskopplung

5) Ergebnisse

6) **Durchführung von Jahresertragssimulationen**

7) Zusammenfassung und Ausblick

Durchführung von Jahresertragssimulation

Entwicklung von Wärmelastprofilen nach VDI 4655

- Typtage nach VDI 4655:

Jahreszeit	Werktag W		Sonntag S	
	Heiter H	Bewölkt B	Heiter H	Bewölkt B
Übergang Ü	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
Sommer S	SWX		SSX	
Winter W	WWH	WWB	WSH	WSB

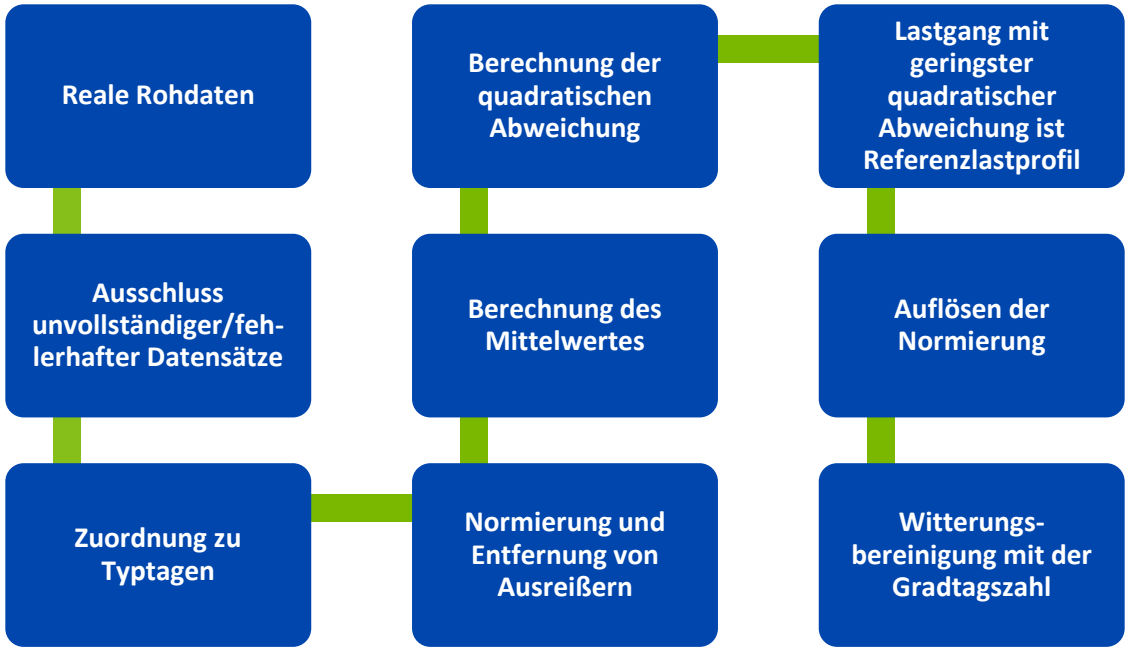
- Einteilung Deutschlands in Klimazonen und entsprechende Testreferenzjahre (TRY):

	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB	SWX	SSX	WWH	WWB	WSH	WSB
…										
TRY12	27	91	8	18	104	19	23	57	2	16
TRY13	37	72	15	10	73	13	29	91	6	19
TRY14	42	81	11	15	42	7	22	115	5	25
…										

Durchführung von Jahresertragssimulation

Entwicklung von Wärmelastprofilen nach VDI 4655

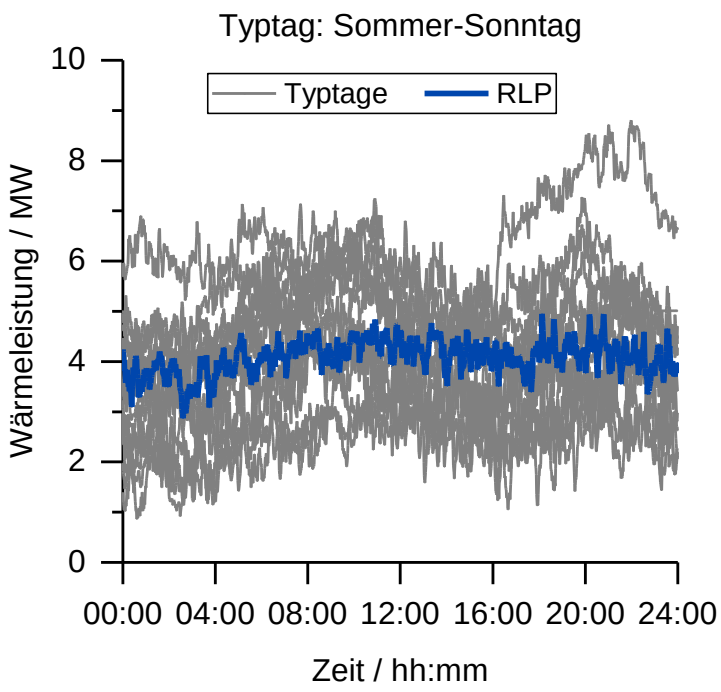
- Entwicklung von Wärmelastprofilen auf Basis realer Kraftwerksdaten:

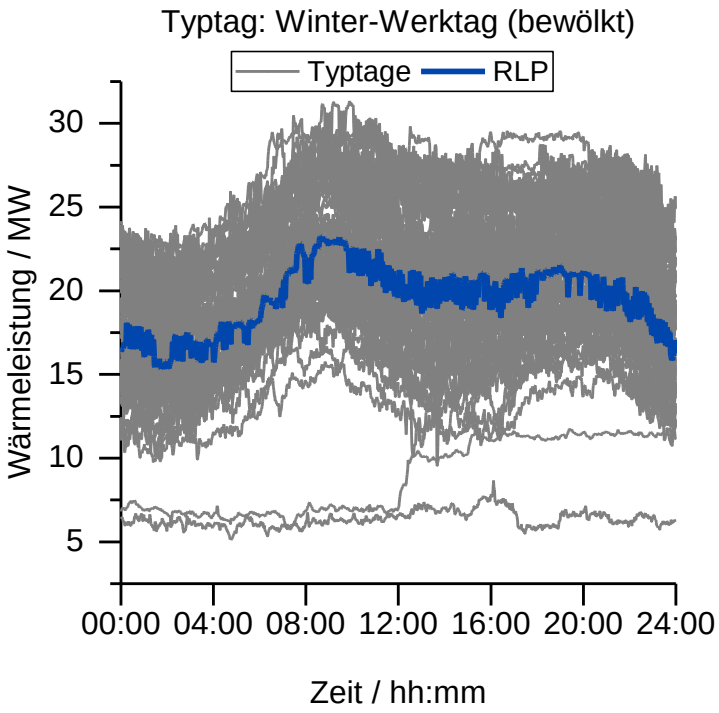


Durchführung von Jahresertragssimulation

Entwicklung von Wärmelastprofilen nach VDI 4655

- Beispiele:





Agenda

1) Geothermie-Allianz Bayern
2) Motivation
3) Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells
4) Wärmeauskopplung
5) Ergebnisse
6) Durchführung von Jahresertragssimulationen
7) **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Ziel:

  Transiente Simulation der geothermischen Kraft-Wärme-Kopplung für eine belastbare energetische und wirtschaftliche Bewertung

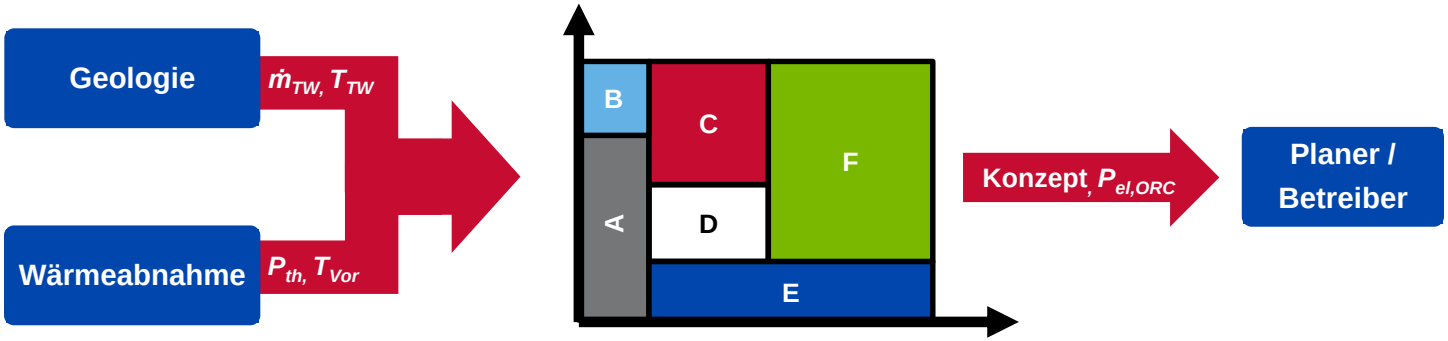
- Entwicklung und Validierung eines dynamischen Simulationsmodells eines zweistufigen ORC

- Vergleich der reinen Stromerzeugung mit der Kraft-Wärme-Kopplung an einem Wintertag durch parallele Wärmeauskopplung

- **Abnahme der elektrischen Energieerzeugung von 6,5 %**
- **Zusätzlich bei der Kraft-Wärme-Kopplung bereitgestellte Wärme: 125,1 MWh**
- **Erhöhung der Effizienz des geothermischen Kraftwerks durch zusätzliche (parallele) Wärmeauskopplung**

Zusammenfassung
Ausblick

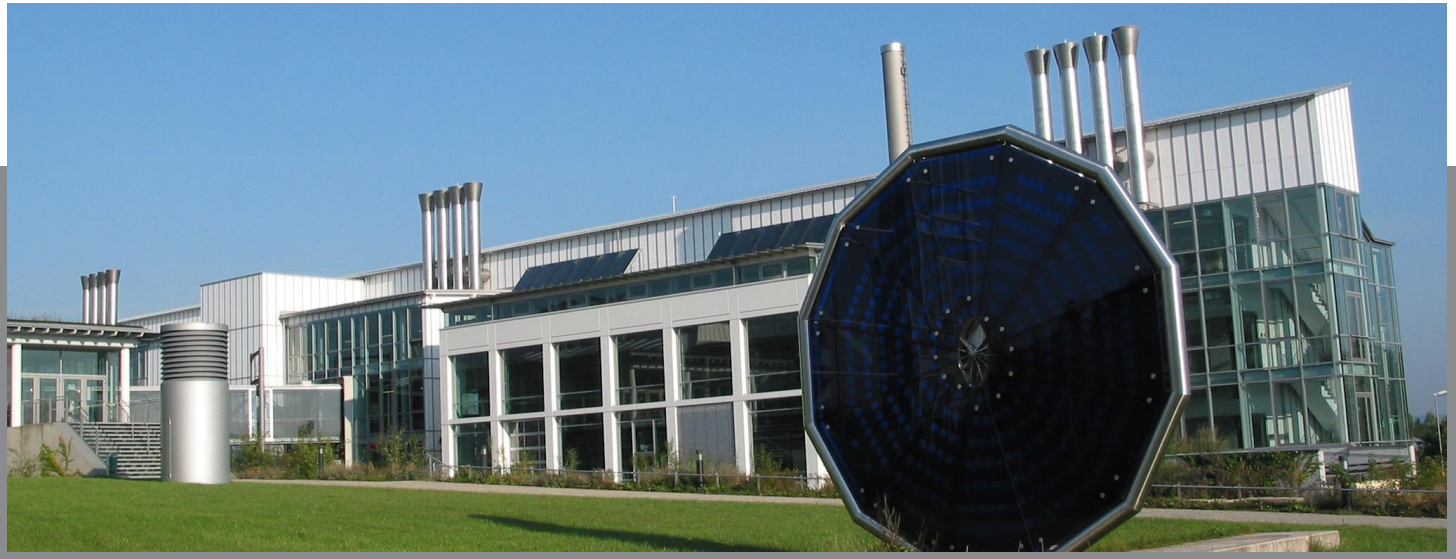
- Verfeinerung des Simulationsmodells
- Durchführung von Jahresertragssimulationen zur belastbaren energetischen und wirtschaftlichen Bewertung
- Datenbank für Kraftwerksplaner und -betreiber



Danksagung

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

Bayerisches Staatsministerium für
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



Vielen Dank

www.zet.uni-bayreuth.de

T. Eller, F. Heberle und D. Brüggemann

UNIVERSITÄT BAYREUTH

LEHRSTUHL FÜR TECHNISCHE THERMODYNAMIK UND TRANSPORTPROZESSE
PROF. DR.-ING. D. BRÜGGEMANN

ZET
Zentrum für Energietechnik