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

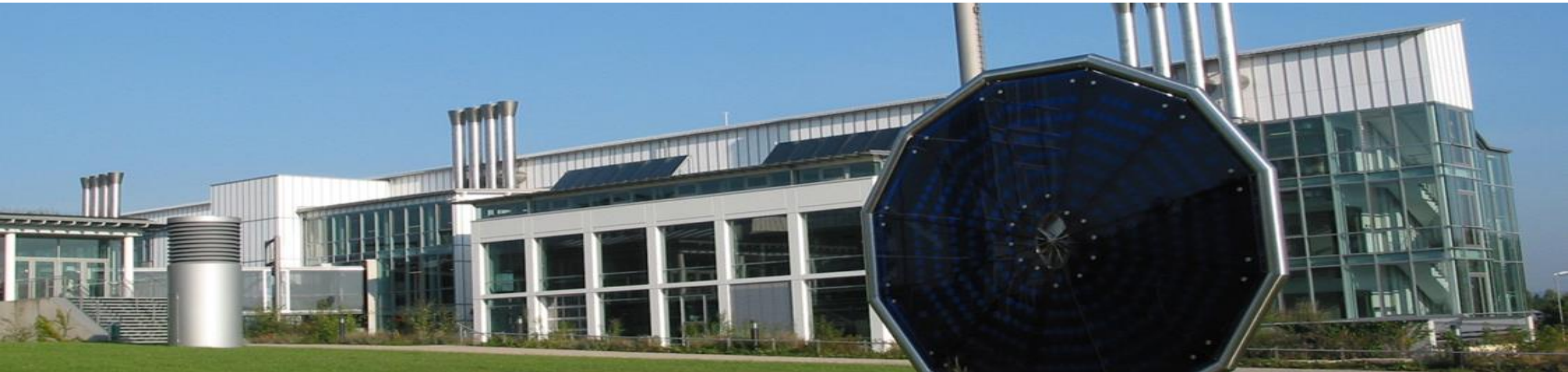
UNIVERSITÄT BAYREUTH

Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen in erneuerbare Energiesysteme

DKV-Tagung 2022, Magdeburg

Jaromir Jeßberger

18. November 2022



Agenda

- Projektvorstellung und Motivation
- Zielsetzung
- Grundlagen
  - Versuchsanlage
  - Simulation
- Ergebnisse
  - Simulation / Messungen
  - Techno-ökonomische Analyse
- Ausblick

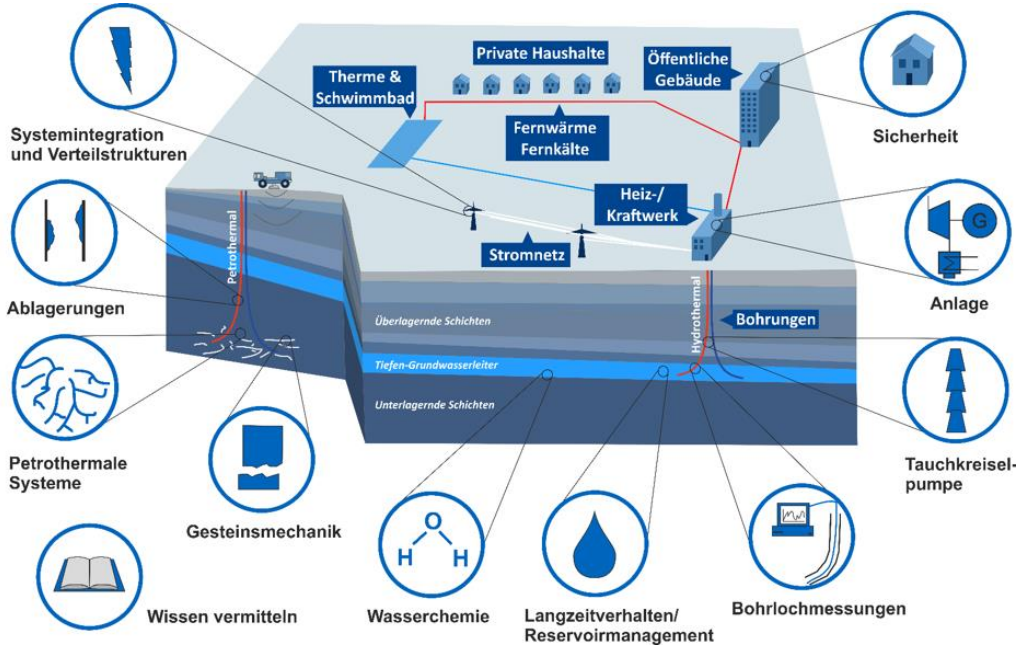
Projektvorstellung
Geothermie-Allianz Bayern

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

UNIVERSITÄT BAYREUTH

- Verbundprojekt von mehreren bayerischen Universitäten (TUM, FAU, UBT, LMU, HM)
- Gefördert vom bayerischen Wissenschaftsministerium
- Unterschiedlichste Themen im Bereich tiefer Geothermie

- Arbeitspakete LTTT:
  - Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen in Geothermie-Systeme
  - Ganzheitliche Bewertung von lokalen Strukturen zur Wärmebereitstellung auf Basis von tiefer Geothermie
  - Lebenszyklusanalyse geothermischer Projekte



Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

Geothermie-Allianz Bayern

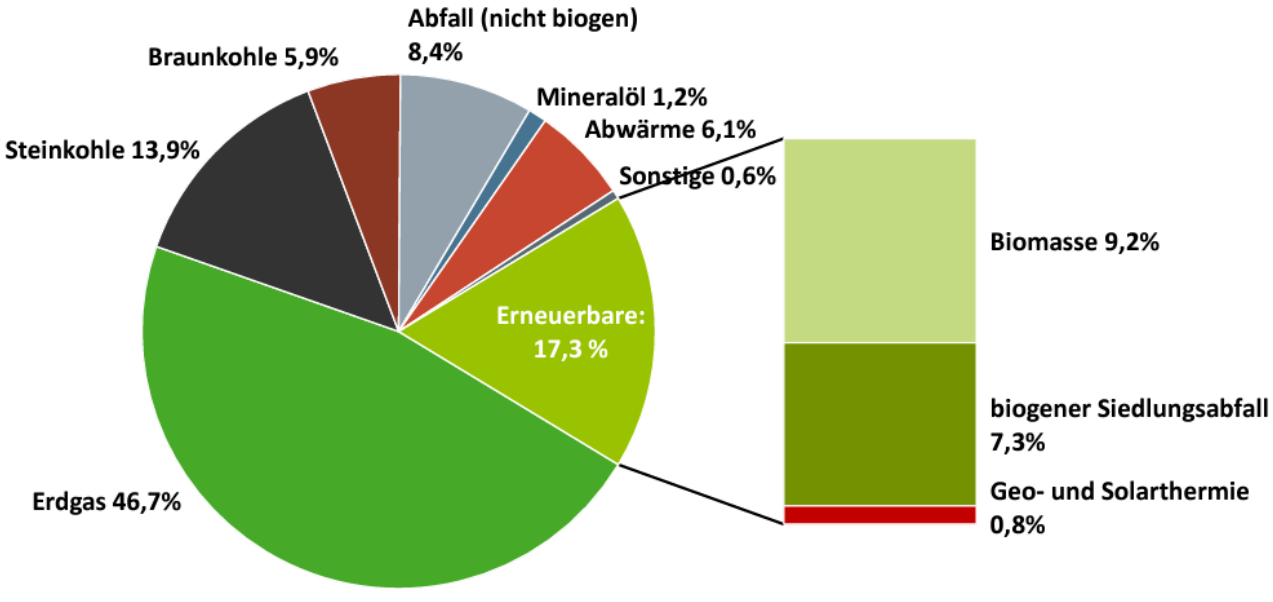
Projektvorstellung
Motivation

- > 50 % des deutschen Endenergieverbrauchs für Wärmebereitstellung [1]
- Nur 17,3 % durch Erneuerbare Energien; Stand 2022 (EU: 21 % [2])
- Ziel: 25 % des bayerischen Wärmebedarfs bis 2050 (2022: 0,8 %) [3]

Beispiel Geothermie:

- Nur bedingt teillastfähig
- Hohe Investitionskosten
- Fehlende Flexibilität

➡ Integration von HTWP



Quellen: Destatis, BDEW; Stand 05/2022

Zielsetzung
3 Betrachtungsebenen

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

UNIVERSITÄT BAYREUTH

Integration von HTWP in erneuerbare Energiesysteme

- Wie verhält sich eine HTWP und die einzelnen Komponenten im Teillastbetrieb?
- Wie kann das Teillastverhalten einer HTWP verbessert werden?
- Wie unterscheidet sich das Betriebsverhalten bei Variation des Arbeitsmediums?
- Welche Auswirkungen hat der Betrieb bei hohen Temperaturen auf Arbeitsmedium und Öl?
- Welche technischen und ökonomischen Herausforderungen bei der Integration von HTWP in erneuerbare Energiesysteme gibt es?
- Techno-ökonomischer Vergleich mit konventionellen Energiesystemen
- Identifizierung von neuen Anwendungsfällen

Experimentelle Untersuchungen

Simulationen

Techno-ökonomische Analysen

Techno-ökonomische Analysen

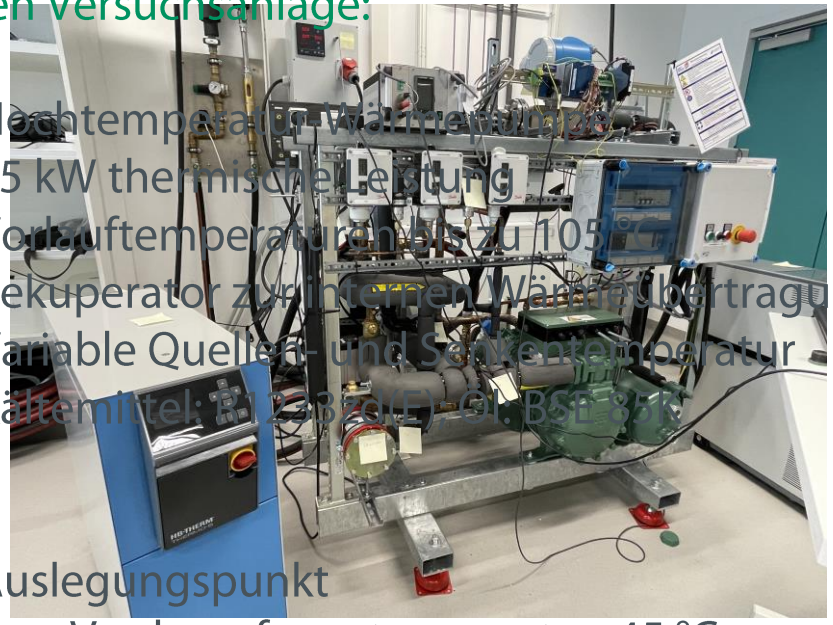
Ausgangssituation
Versuchsanlage

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

UNIVERSITÄT BAYREUTH

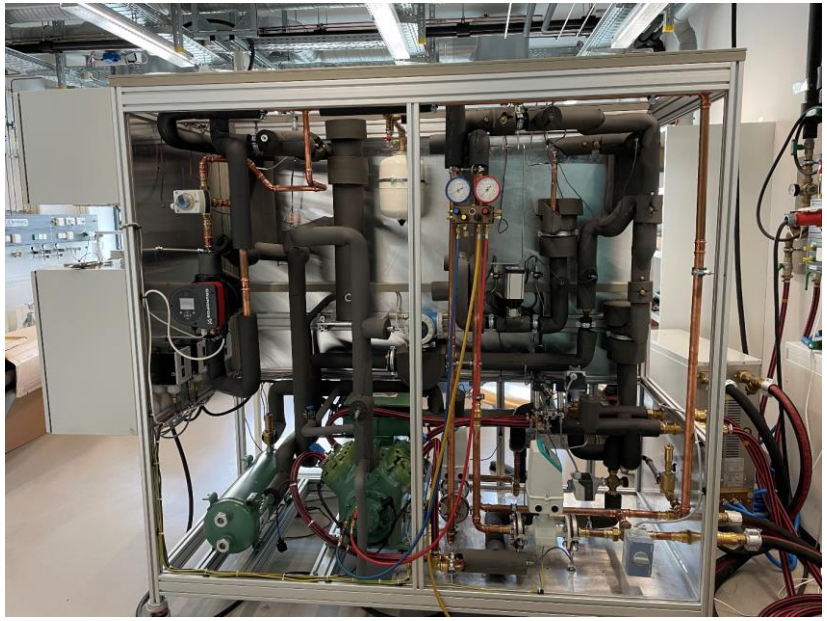
Daten Versuchsanlage:

- Hochtemperatur-Wärmepumpe
- 35 kW thermische Leistung
- Vorlauftemperaturen bis zu 105 °C
- Rekuperator zur internen Wärmeübertragung
- Variable Quellen- und Senkentemperatur
- Kältemittel: R1233zd(E), Öl: BSE 85K



- Auslegungspunkt
  - Verdampfungstemperatur: 45 °C
  - Verflüssigungstemperatur: 107 °C
  - $T_{WS,ein}$/$T_{WQ,ein}$: 60 °C / 60 °C

Bisheriger Anlagenaufbau

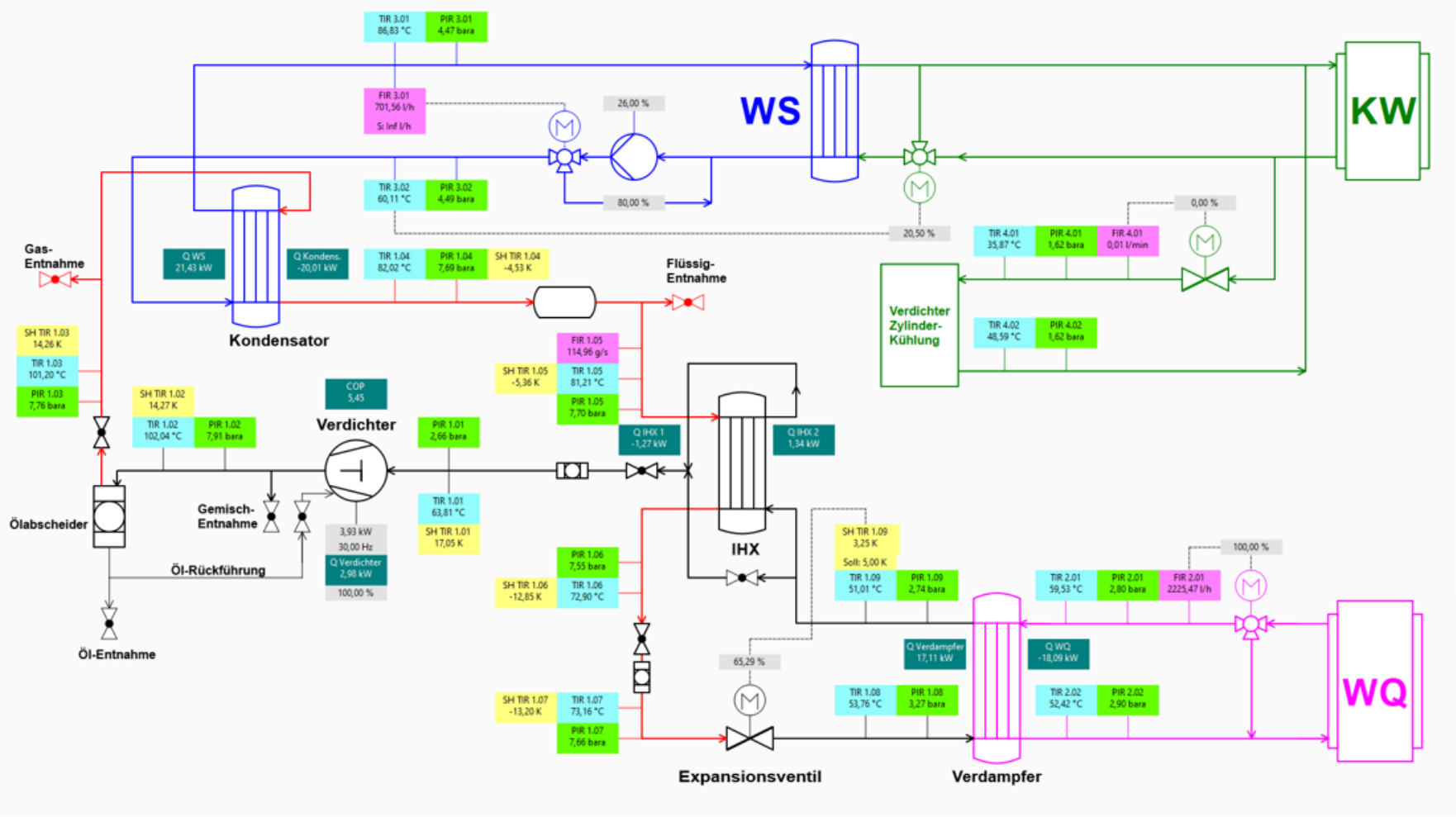


Neuer Anlagenaufbau

Ausgangssituation
Versuchsanlage

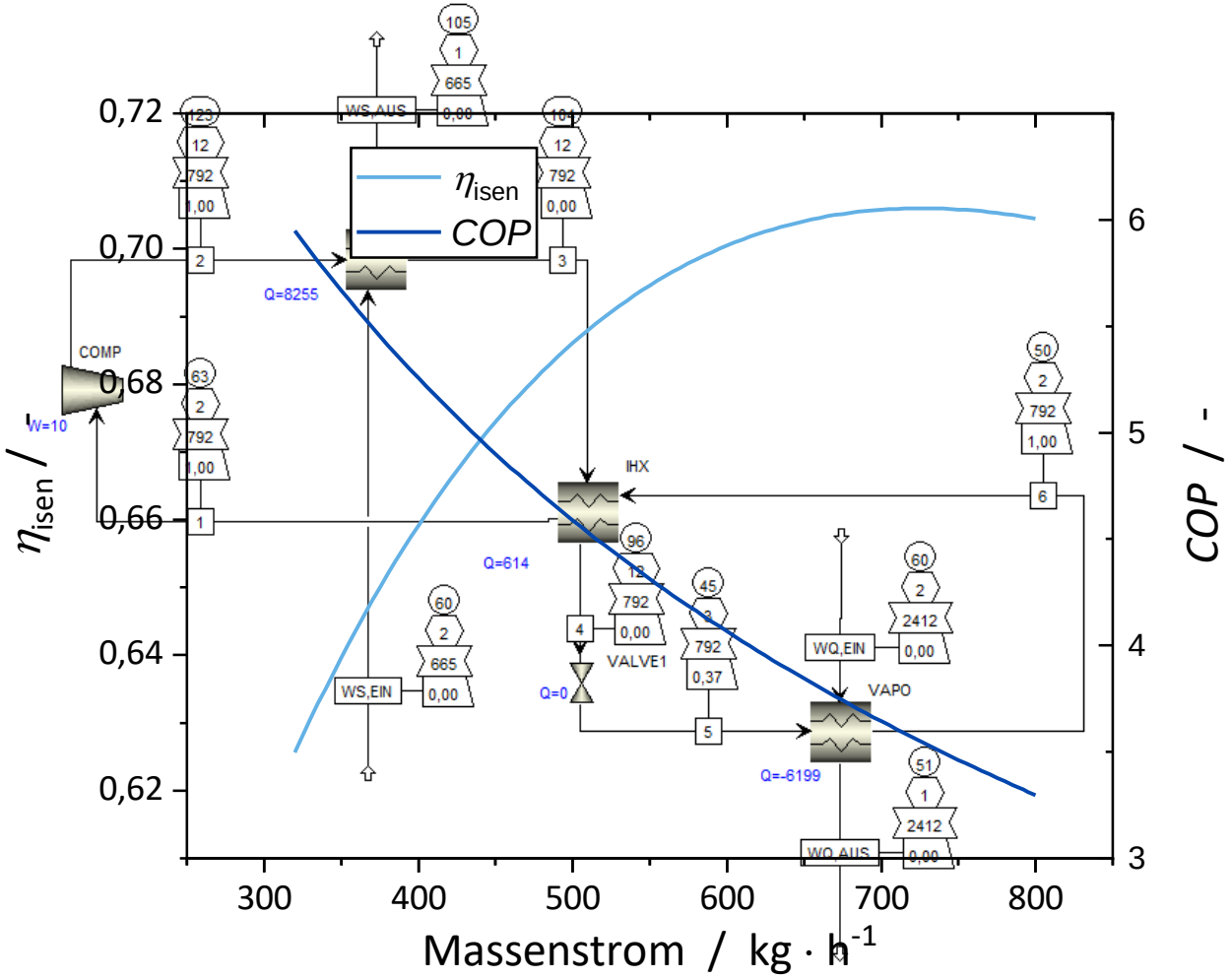
Modifikation

- Invasive T
- Softwareg
  Massenstr
  Wasserkre
- Drucksens
  Kompone
- Softwareg
- Stufenlose
- Ölmanage
- Zylinderko
- Entnahme
  Stoffdater



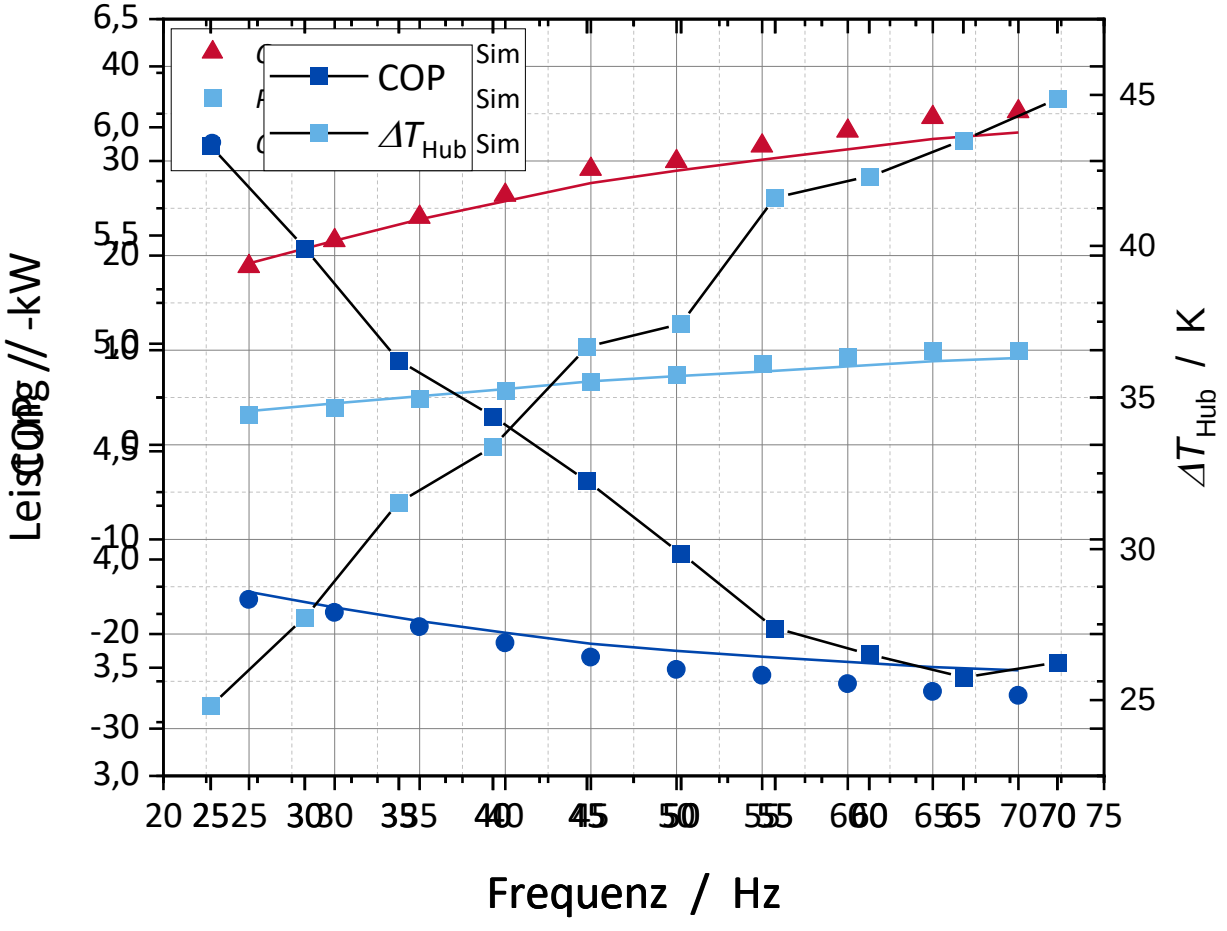
Ausgangssituation
Simulation

- Vereinfachende Designpunkt-Simulation durchgeführt und validiert; $\dot{Q}_{th}$ =35 kW; T_{VL} =105 °C
- Off-Design Simulation in ASPEN Plus® durchgeführt
- Erste Teillastkennlinien werden für Jahresertragssimulationen verwendet
- Wärmeübertrager-Korrelation nach Toffolo et al. [4]
- Theoretisch ermittelte Verdichter Kennlinien
    - Sollen in Zukunft durch Messdaten ersetzt werden



Ergebnisse
Messungen

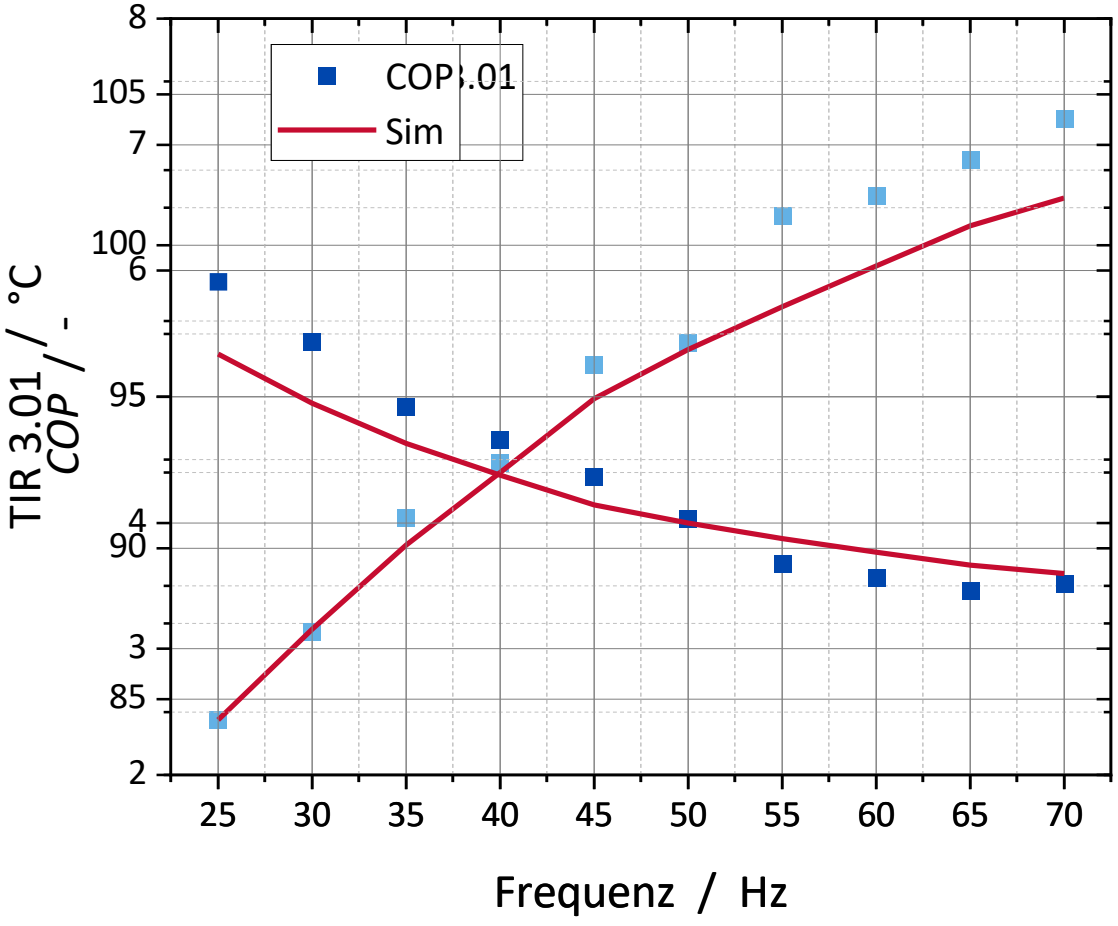
- 10 Betriebspunkte vermessen
  - 5 Hz-Schritte von 25 Hz bis 70 Hz
- Konstante WQ- und WS-Bedingungen
- Max. *COP* : 5,92 bei ΔT_{Hub} von 24,8 K
- Max. ΔT_{Hub}: 44,86 K bei *COP* von 3,52
- Maximale thermische Leistung: 35,22 kW



Ergebnisse
Simulation

- Qualitativ werden die Messergebnisse gut wiedergegeben

- Abweichungen im Teillastbereich
  - Wärmeübertrager-Korrelation nach Toffolo et al. [4] muss an das System angepasst werden
  - Verdichterkennlinie kann mit Hilfe der Messungen optimiert werden



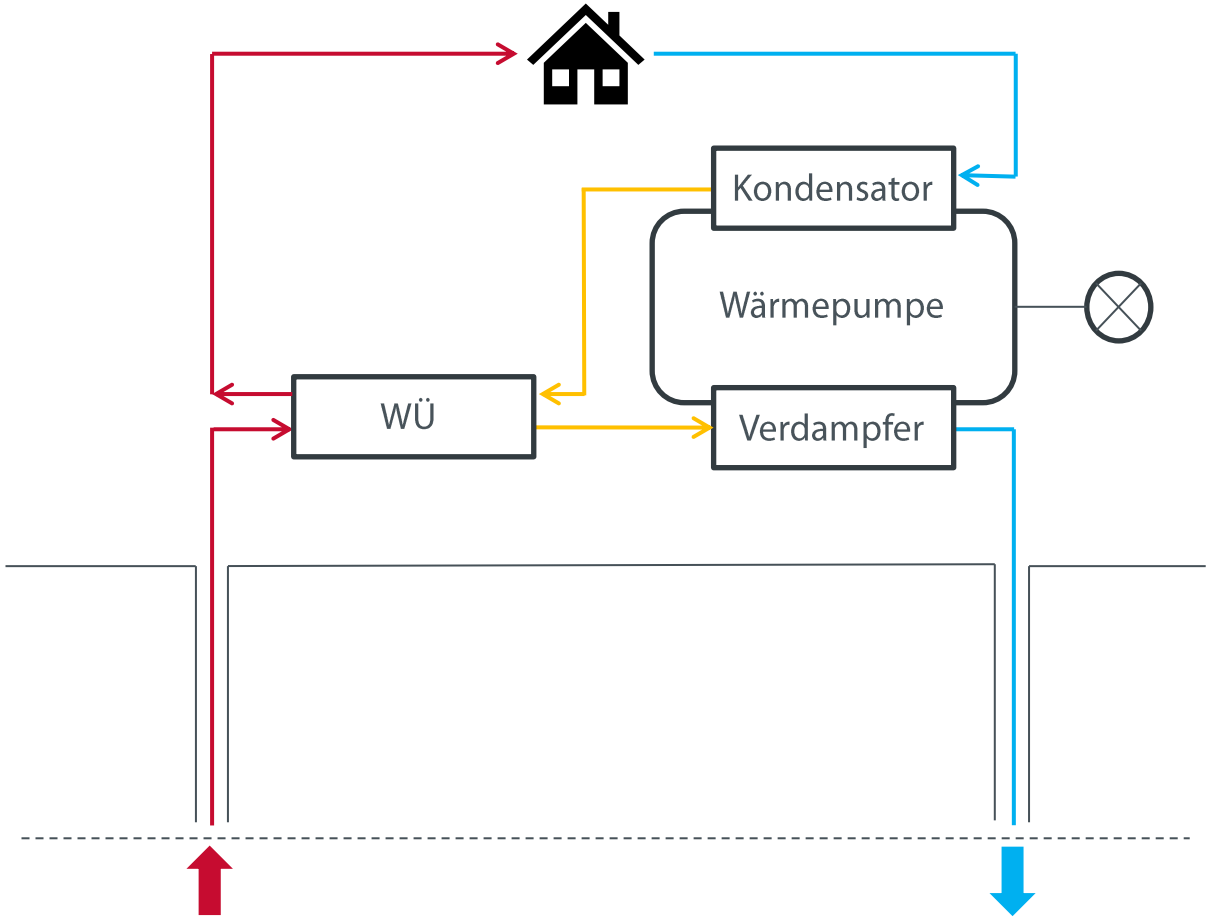
Thermo-ökonomische Analyse
Anwendungsfälle in der Geothermie

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

UNIVERSITÄT BAYREUTH

Vier Anwendungsfälle:

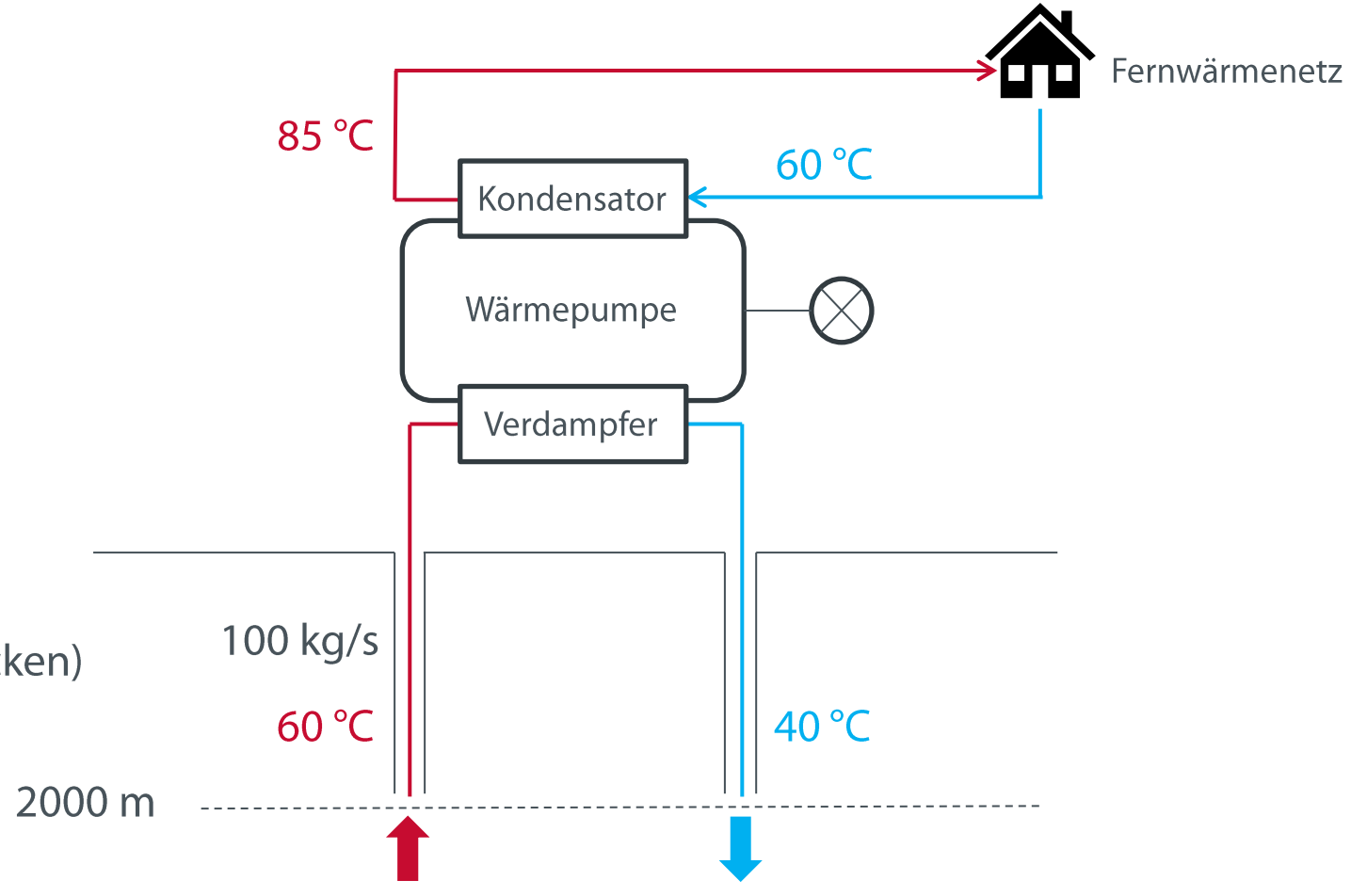
- Vorlauftemperaturanhebung bei mitteltiefer Geothermie
- Spitzenlastdeckung mit Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP)
- Vorlauftemperaturanhebung Anwendungsfall Altdorf (bestehende Bohrung)
- Leistungsanhebung mittels HTWP



Ergebnisse
Thermo-ökonomische Analyse

Integration einer HTWP zur Anhebung der Vorlauf-Temperatur bei Mitteltiefer-Geothermie

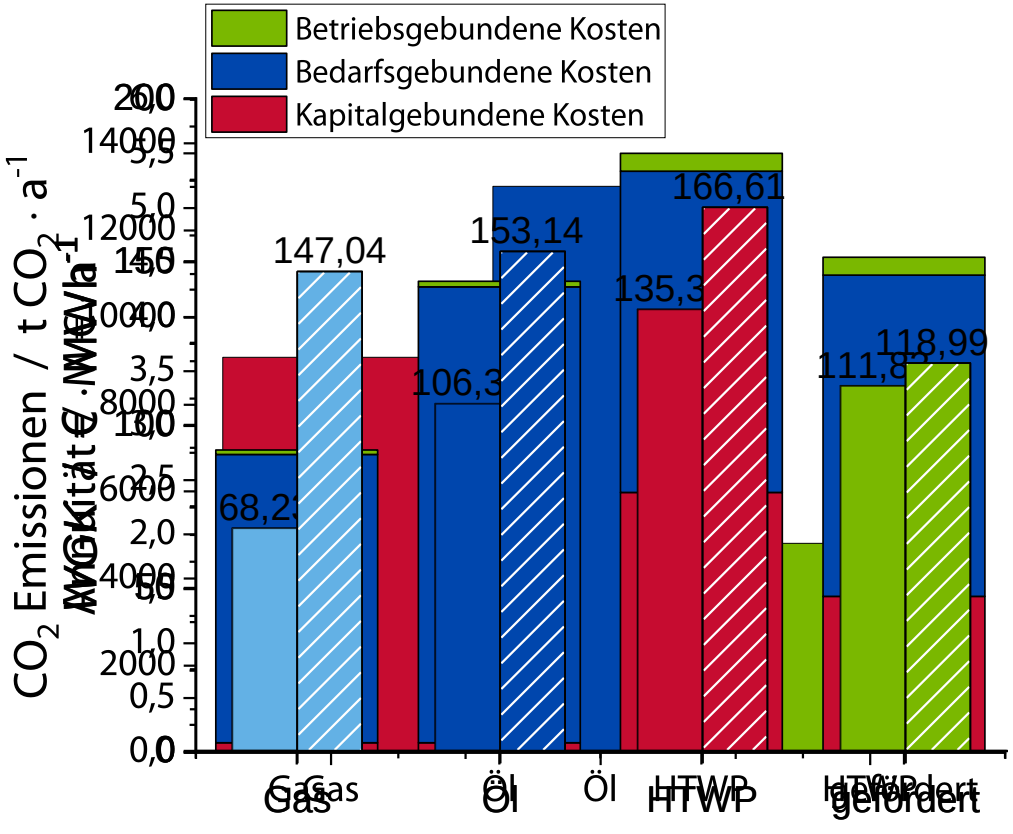
- Temperaturhub von 25 K
- *COP* = 4 (erste Labormessungen)
- Leistung HTWP: 10,17 MW
- Volllaststunden: 4000 h (vergl. mit Heizwerken im Bayerischen Molassebecken)



Ergebnisse
Thermo-ökonomische Analyse

Integration einer HTWP zur Anhebung der Vorlauf-Temperatur bei Mitteltiefer-Geothermie

- Förderung: 40 % der kapitalgebundenen Kosten (Modulvorhaben Wärmenetze 4.0)
- Investitionskosten HTWP: 500 €/kW
- Stromkosten: ~~190,8 €/MWh~~ → 230 €/MWh
- Gaskosten: ~~39,5 €/MWh~~ → 100 €/MWh
- Ölkosten: ~~64 €/MWh~~ → 100 €/MWh
- CO_2-Reduzierung verglichen mit Gas: 47 %
- CO_2-Reduzierung verglichen mit Öl: 63 %
- $r_{price} = \frac{\text{Strompreis}}{\text{Gaspreis}} = \cancel{2{,}4}$ 3,6

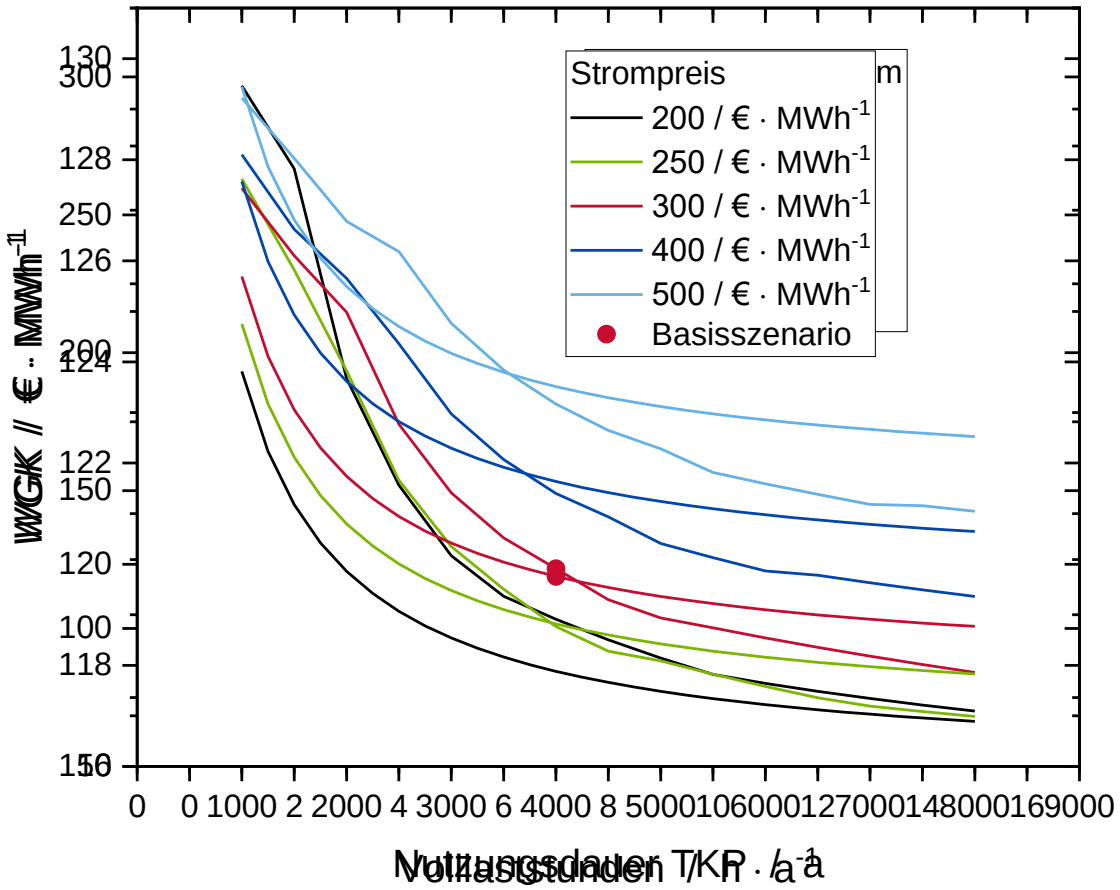


Aktuelle Preise, neue Förderung

Ergebnisse
Thermo-ökonomische Analyse

Sensitivitätsanalysen
Mitteltiefe Geothermie

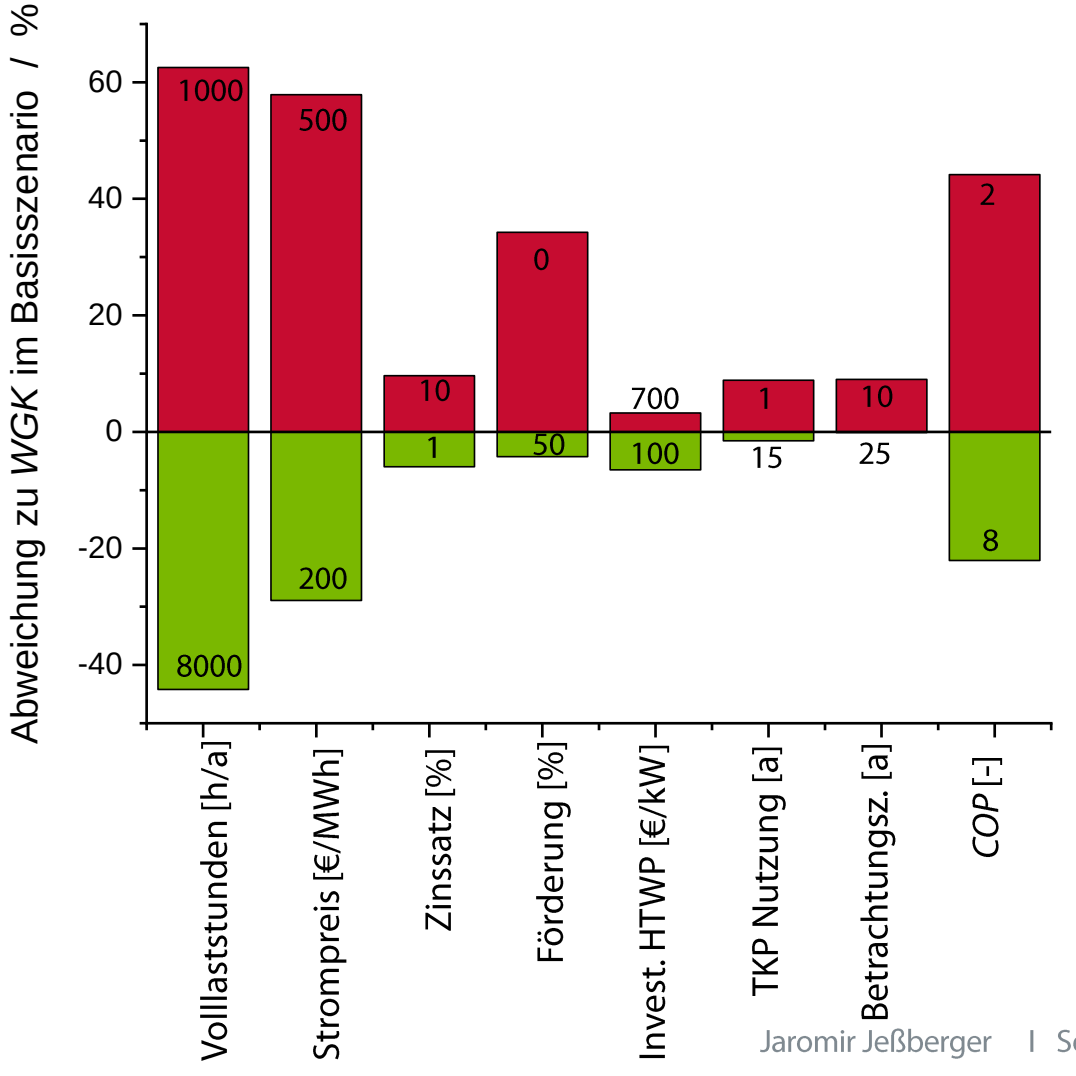
- Volllaststunden
- Strompreis
- *COP*
- Investitionskosten WP
- Zinssatz
- Förderung
- TKP Nutzungsdauer
- Betrachtungszeitraum



Ergebnisse
Thermo-ökonomische Analyse

Sensitivitätsanalysen mitteltiefe Geothermie

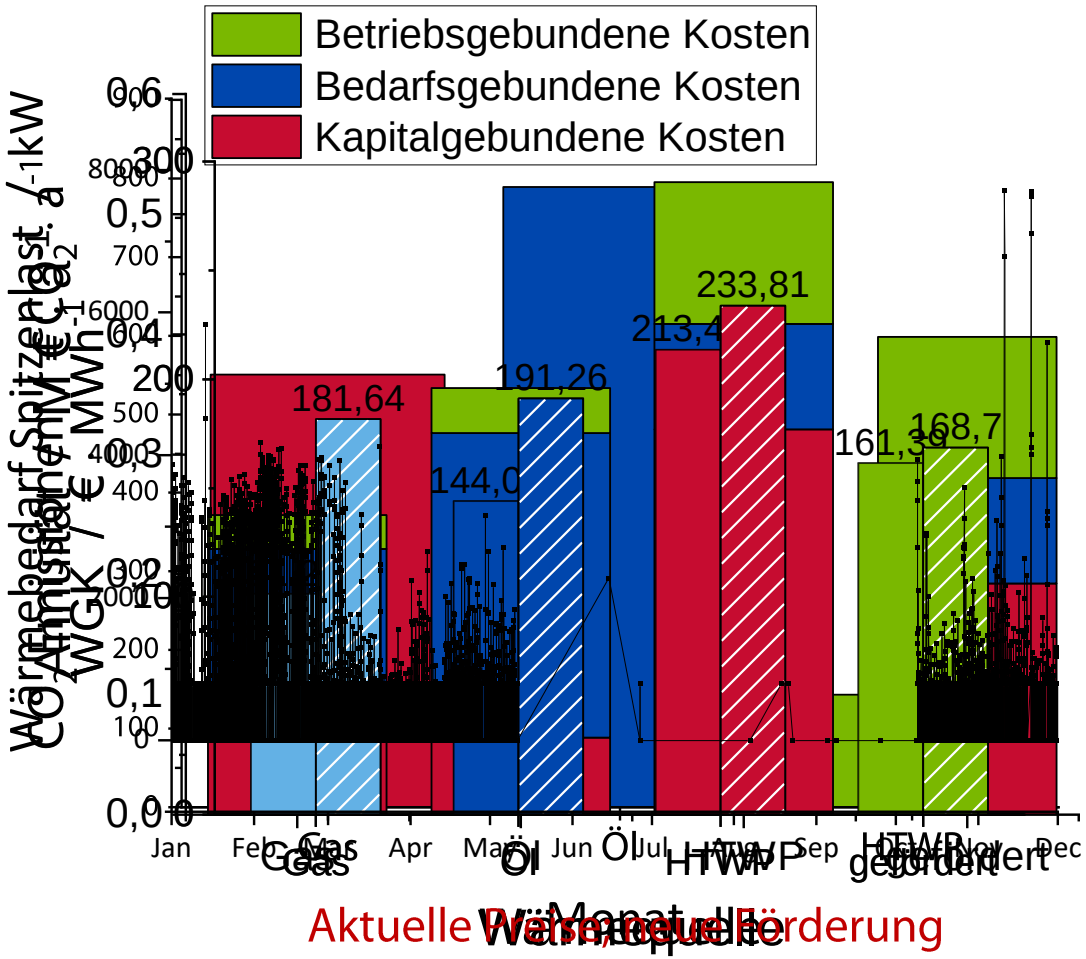
Parameter	base	best
Volllaststunden [h/a]	4000	-44 %
Strompreis [€/MWh]	300	-29 %
COP [-]	4	-22 %
Zinssatz [%]	1,05	-6 %
Förderung [%]	40	-4 %
Invest. HTWP [€/kW]	500	-3 %
TKP Nutzung [a]	7	-2 %
Betrachtungsz. [a]	20	-0,12 %



Ergebnisse
Thermo-ökonomische Analyse

Integration einer HTWP zur Spitzenlastdeckung bei tiefer Geothermie

- Teillastverhalten mit ASPEN Simulation berücksichtigt
- Leistung HTWP: 8 MW
- Volllaststunden: 380 h
- Investitionskosten HTWP: 500 €/kW
- Stromkosten: ~~190,8 €/MWh~~ → 230 €/MWh
- Gaskosten: ~~39,5 €/MWh~~ → 100 €/MWh
- Ölkosten: ~~64 €/MWh~~ → 100 €/MWh
- CO_2-Reduzierung verglichen mit Gas: 74 %
- CO_2-Reduzierung verglichen mit Öl: 82 %
- r_{price} = ~~3~~ → 3,33



Ergebnisse
Thermo-ökonomische Analyse

- Techno-ökonomischer Vergleich mit konventionellen Energiesystemen:
  - HTWP ist wirtschaftlicher als Öl oder Gas (bei Berücksichtigung der Förderung)
- Vergleich unterschiedlicher Anwendungsfälle:
  - Geringe Vollaststunden führen zu hohen *WGK* bei der Spitzenlast

    ➡ Haben auch den größten Einfluss in den Sensitivitätsanalysen gezeigt
- Technische und ökonomische Herausforderungen bei der Modellierung des Systems
  - Die schwankenden Energiekosten ➡ Sensitivitätsanalysen
  - Verbesserung der Effizienz
  - Kenntnisse über das Teillastverhalten müssen verbessert werden ➡ Labormessungen

Ausblick

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

UNIVERSITÄT BAYREUTH

Experimentelle Untersuchungen

- Wie verhält sich eine HTWP und die einzelnen Komponenten im Teillastbetrieb?
- Wie kann das Teillastverhalten einer HTWP verbessert werden?
- Wie unterscheidet sich das Betriebsverhalten bei Variation des Arbeitsmediums?
- Welche Auswirkungen hat der Betrieb bei hohen Temperaturen auf Arbeitsmedium und Öl?

Techno-ökonomische Betrachtung

- Welche technischen und ökonomischen Herausforderungen bei der Integration von HTWP in erneuerbare Energiesysteme gibt es?
- Techno-ökonomischer Vergleich mit konventionellen Energiesystemen
- Identifizierung von neuen Anwendungsfällen

Förderhinweise

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

UNIVERSITÄT BAYREUTH

Für die Förderung durch das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst im Rahmen des Projekts "Geothermie-Allianz Bayern" wird herzlich gedankt.

Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

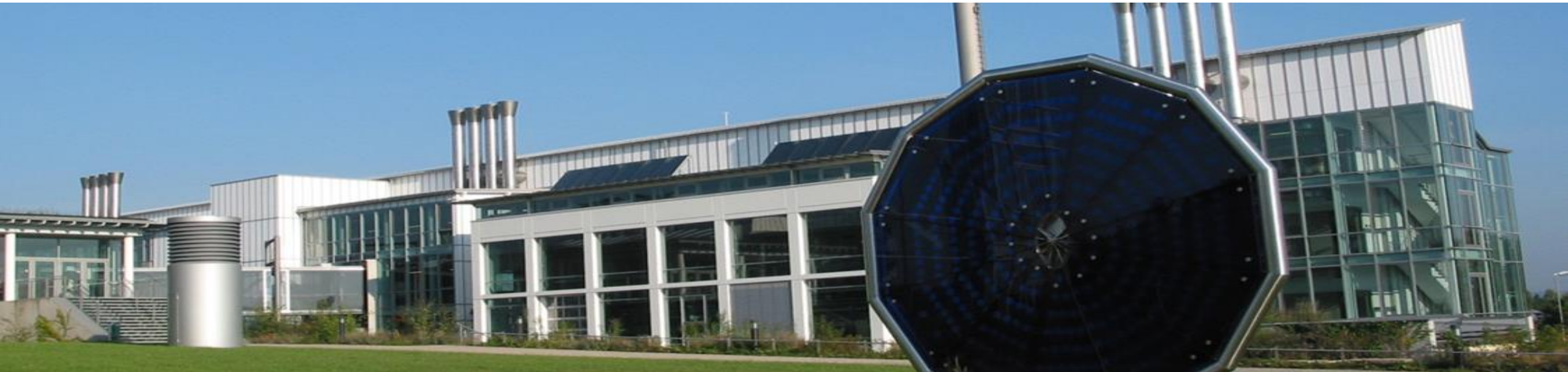
Geothermie-Allianz Bayern

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

DKV-Tagung 2022, Magdeburg

Jaromir Jeßberger

18. November 2022



Quellen

1. Umwelt Bundesamt, Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme (2021). Accessed 25 August 2021.
2. https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200211-1
3. https://www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/soeder-geothermie-soll-25-des-waermebedarfes-fuer-bayern-absichern.html
4. Klimaneutrale Wärme aus Geothermie 2030 / 2050, Bundesverband Geothermie e.V.
5. A. Toffolo, A. Lazzaretto, G. Manente, and M. Paci, in *THE 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS*, vol. 295, 1–14 .

Simulation des Teillastverhaltens

- Notwendig für OFF-Design:
  - Verdichterkennlinie
  - Korrelation zur Beschreibung der WÜ
- Korrelation nach Toffolo et. al [5]:

$$\frac{UA}{UA_{DP}} = \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{DP}}\right)^n$$

Wärmeübertrager	Exponent *n*
Luftgekühlter Kondensator	0,4
Vorheizer + Verdampfer (unterkritisch)	0,15
Verdampfer (überkritisch)	0,66
Rekuperator	0,67