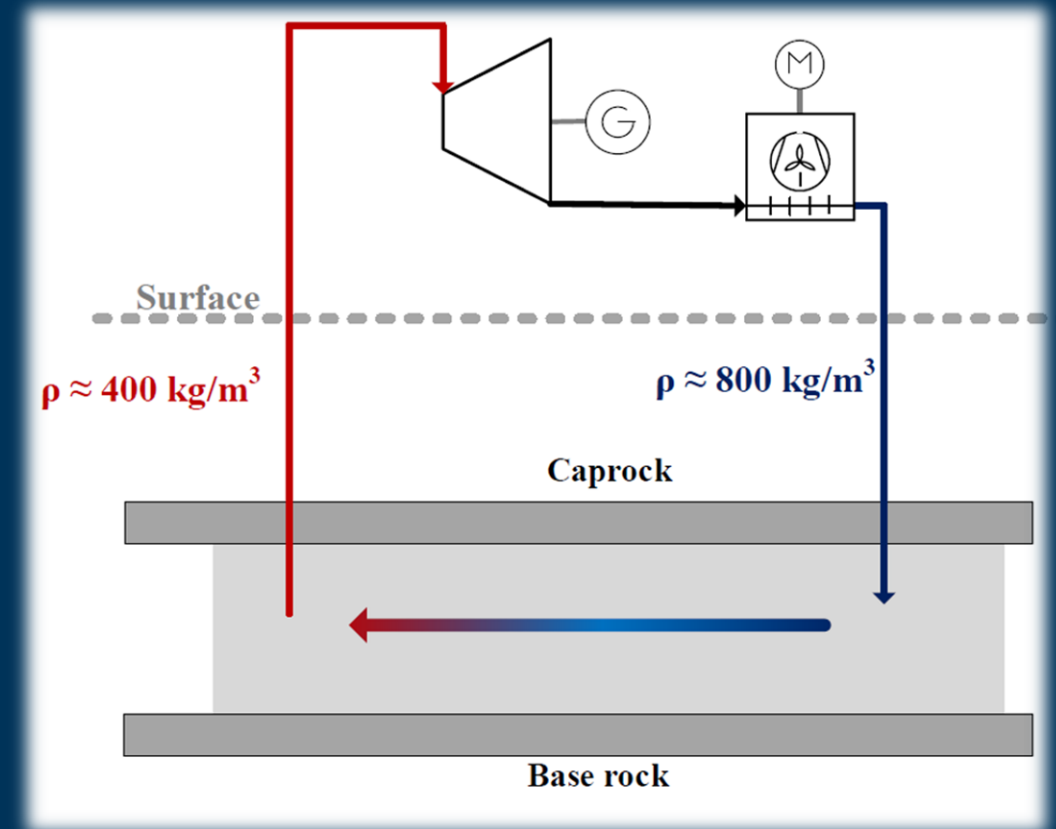


CO₂ als möglicher Wärmeträger in der petrothermalen Geothermie zur gemeinsamen Strom- und Wärmebereitstellung

Christopher Schiffler, Christoph Wieland,
Hartmut Splethoff

GAB Wissenstransfer 2022

Technische Universität München
Lehrstuhl für Energiesysteme
Garching, 31. März 2022



Agenda

- 1) Motivation & technisches Grundprinzip**
- 2) Reine Stromerzeugung
- 3) Möglichkeiten zur gemeinsamen Strom- und Wärmebereitstellung
- 4) Zusammenfassung & Ausblick

CO₂ als mögliches Wärmeträgermedium

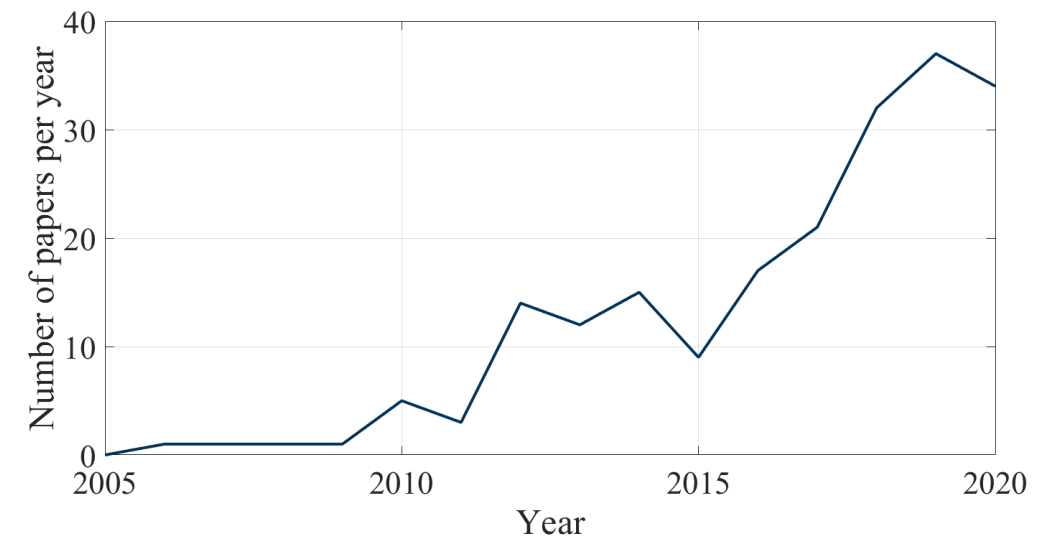
Hintergrund:

- ▶ Freie Wahl des Wärmeträgermediums bei der petrothermalen Geothermie.
- ▶ Seit Anfang der 2000er wird die mögliche Verwendung von CO₂ als Wärmeträger für die petrothermale Geothermie diskutiert.
- ▶ Zunehmendes Interesse aus Forschung und Industrie.

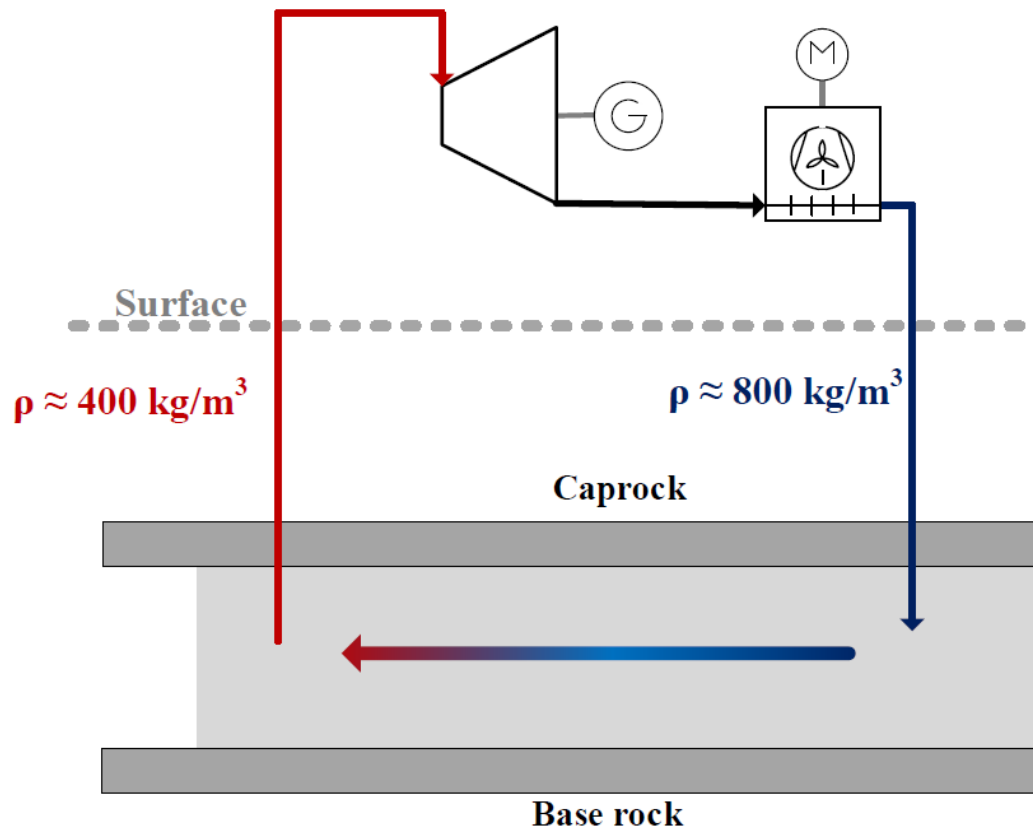
Mögliche Vorteile von CO₂ im Vergleich zu Wasser:

- ▶ Starker Thermosiphon-Effekt aufgrund hoher Dichteunterschiede.
- ▶ Direkte Nutzung in einer Turbine auch bei geringen Reservoirtemperaturen.
- ▶ Geringere Korrosionsprobleme.
- ▶ Kein zusätzlicher Wasserbedarf.
- ▶ Mögliche wirtschaftliche Attraktivität einer künftigen CCUS Wirtschaft (*Carbon capture, utilisation and storage*).

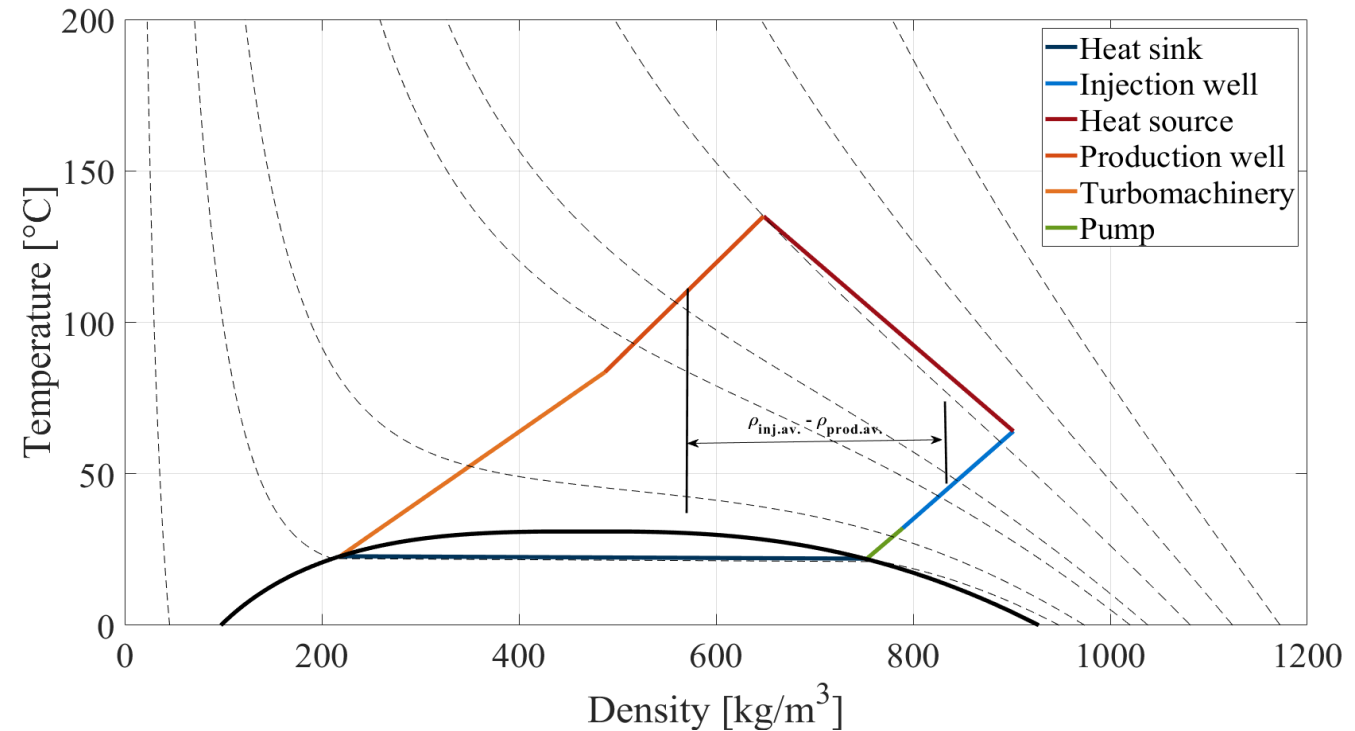
Anzahl an Publikationen in „Web of Science“ bzgl. der Anwendung von CO₂ als Wärmeträger in der Tiefengeothermie



Grundprinzip



- ▶ Hoher Dichteunterschiede zwischen der Reinjektions- und Förderbohrung ermöglicht im Betrieb eine Zirkulation ohne zusätzliche Pumpleistung.
- ▶ Stromerzeugung durch die direkte Expansion in einer Turbine.
- ▶ Notwendigkeit einer Kühlung nach dem Turbinenaustritt.

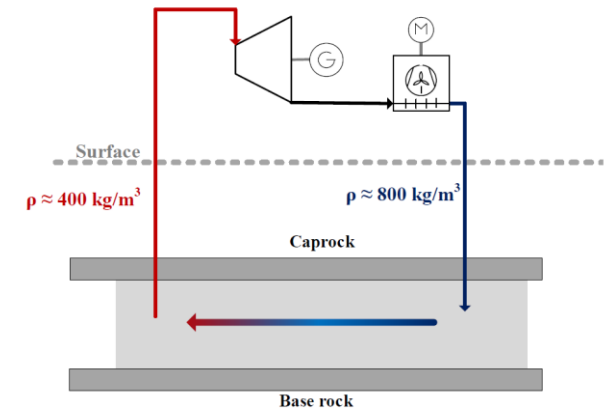


Vergleich der Bedingungen am Wellhead für Wasser und CO₂

Signifikanter Unterschied zwischen den Wellheadbedingungen von Wasser und CO₂

Annahme:

- ▶ Vorgegebene Eintrittsbedingungen für die Förderbohrung sind unabhängig von dem Wärmeträgermedium und dessen Massenstrom.



Eintrittsbedingungen an der Förderbohrung

Parameter	Wert
Tiefe	5000 m
Druck	50 MPa
Temperatur	180 °C
Massenstrom	225 kg/s

$$\Delta P = \rho g \Delta z - \Delta P_{f,well}$$

$$\Delta P_{f,well} = f \frac{\Delta z \rho V^2}{D} \frac{1}{2} = f \frac{8 \dot{m}^2 \Delta z}{\pi^2 \rho D^5}$$

$$\Delta h = g \Delta z - \frac{\Delta(V^2)}{2}$$

Wellheadbedingungen

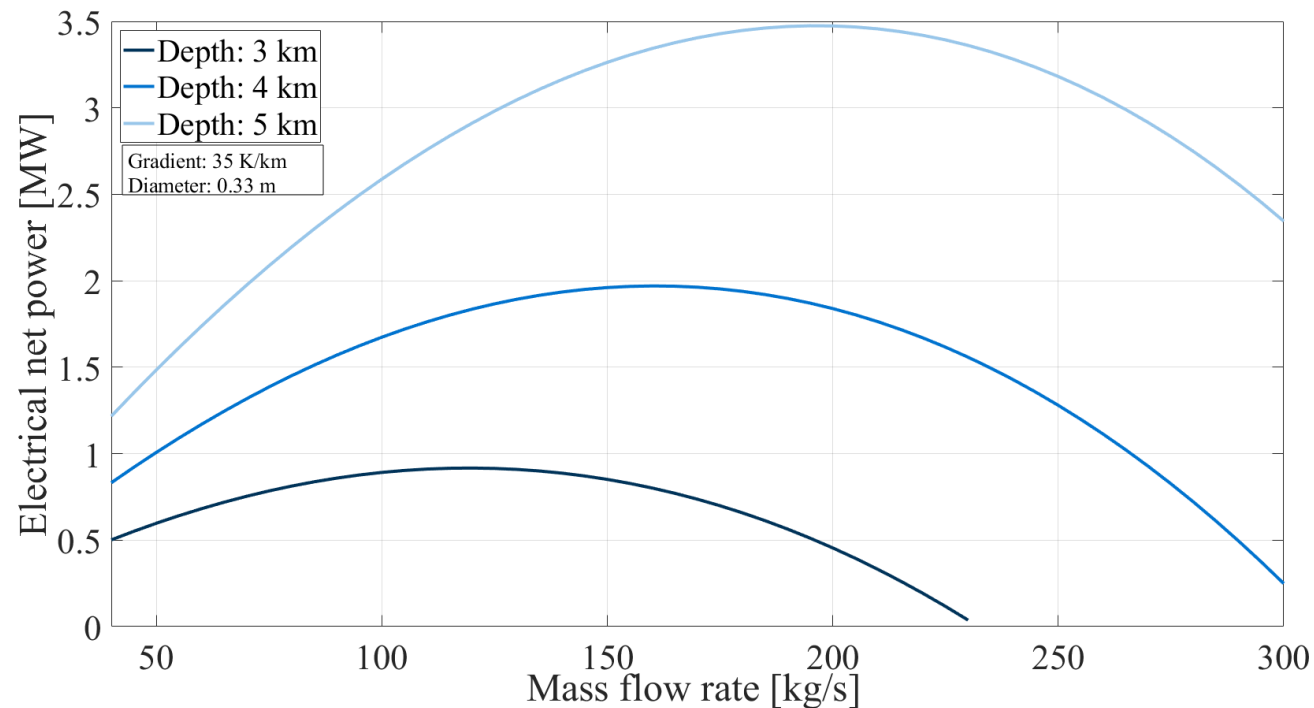
	Temperatur	Druck
CO ₂	123 °C	20,5 MPa
Wasser	173 °C	3,0 MPa

Agenda

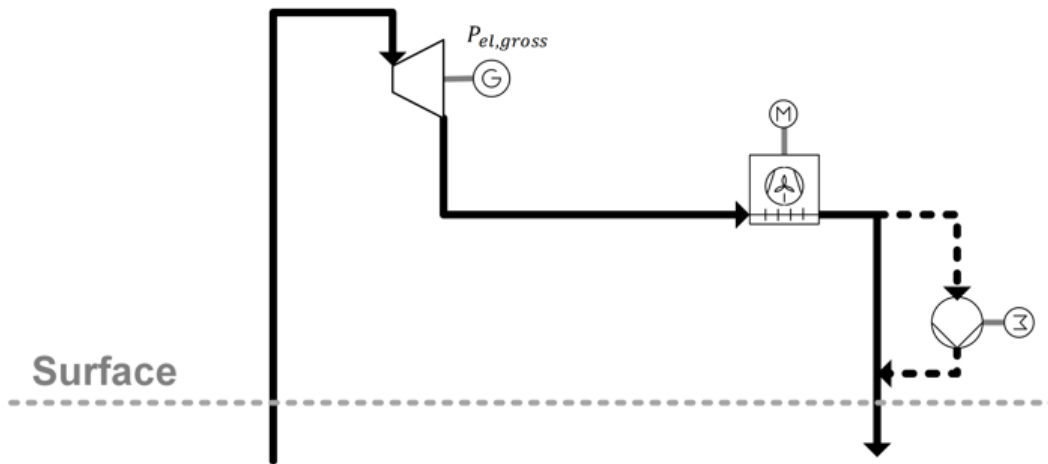
- 1) Motivation & technisches Grundprinzip
- 2) Reine Stromerzeugung**
- 3) Möglichkeiten zur gemeinsamen Strom- und Wärmebereitstellung
- 4) Zusammenfassung & Ausblick

Einfluss der Tiefe und des geothermischen Gradienten

- ▶ Der optimaler Massenstrom mit maximaler erzielbare Nettoleistung unterscheidet sich je nach Systemeigenschaften.
- ▶ Zunahme Tiefe erhöht die massenspezifische Nettoleistung und den optimalen Massenstrom.
- ▶ Stromerzeugung auch bei bereits geringen Reservoirtiefen möglichen.



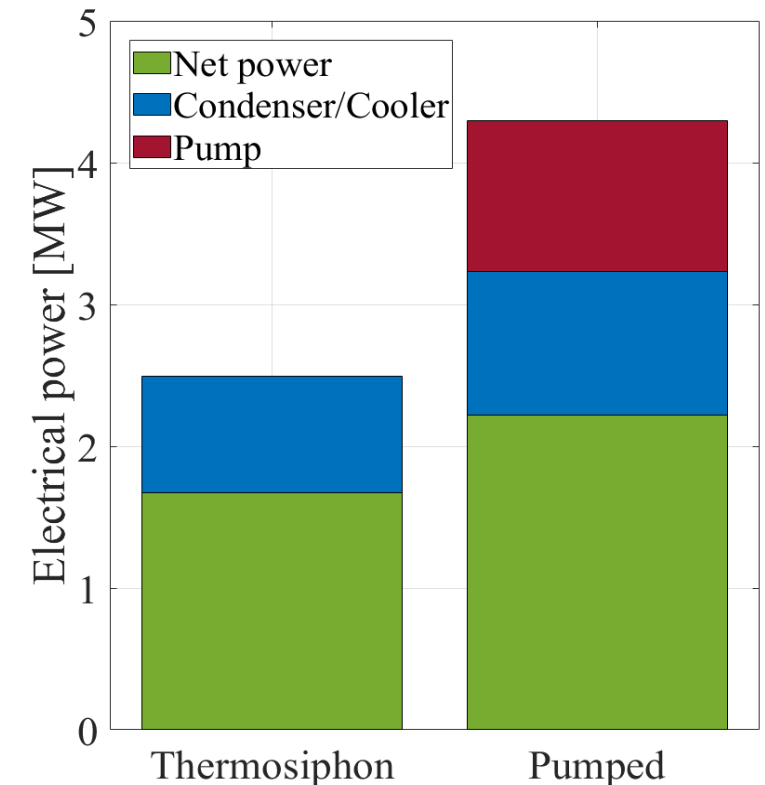
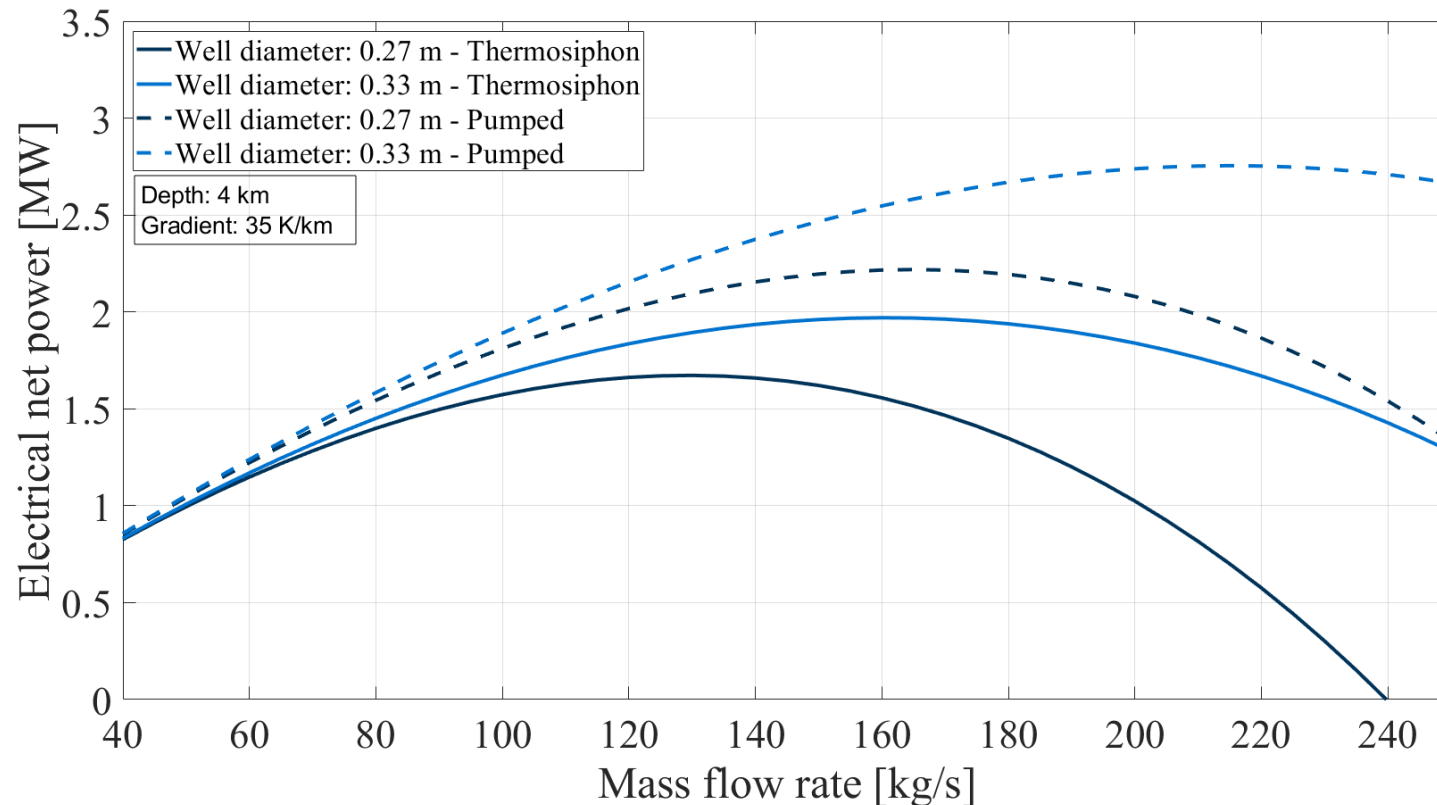
Thermosiphon vs. „Pumped CO₂ System“



- ▶ Verwendung einer Pumpe ist während der „Formation Phase“ des Thermosiphons notwendig.
- ▶ Erste experimentellen Ergebnisse einer Testanlage in den USA (Tiefe 3,2 km) zeigen, dass sich zwar erfolgreich ein Massenstrom im Thermosiphon Modus einstellt, jedoch der vereinzelt Einsatz einer Pumpe für eine dauerhafte Aufrechterhaltung des Thermosiphons notwendig sein könnte.
- ▶ Mögliche Steigerung der Nettoleistung durch die zusätzliche Installation einer Pumpe.

Thermosiphon vs. „Pumped CO₂ System“

- ▶ Steigerung der Bruttoleistung um mehr als 65 %.
- ▶ Steigerung der Nettoleistung um 33 % (0,27 m Ø) und 40 % (0,33 m Ø).

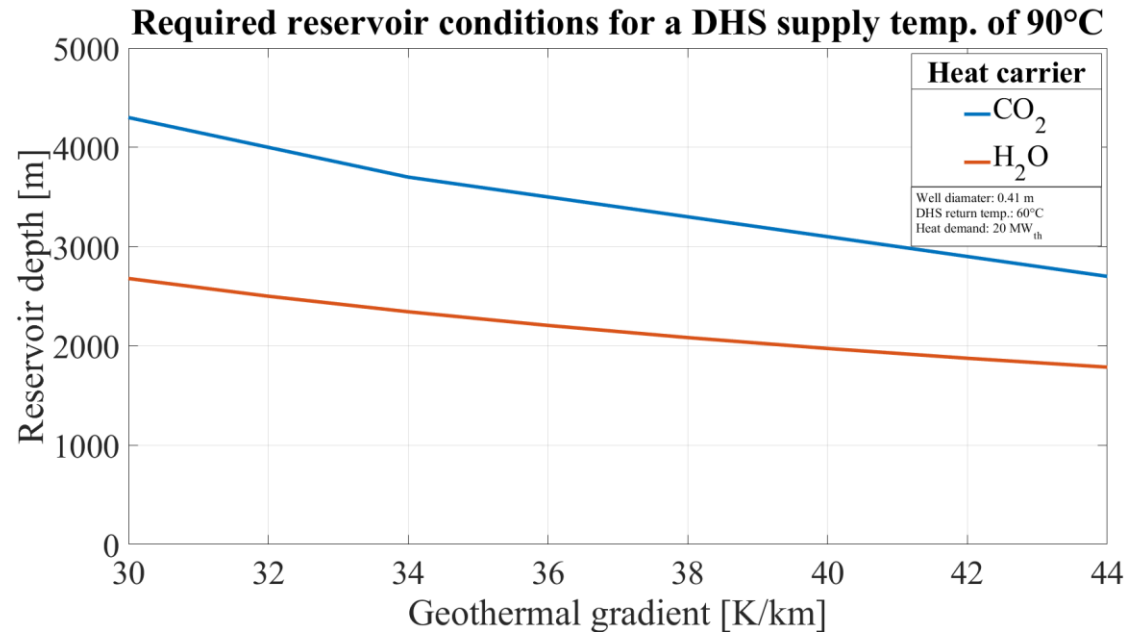


Agenda

- 1) Motivation & technisches Grundprinzip
- 2) Reine Stromerzeugung
- 3) Möglichkeiten zur gemeinsamen Strom- und Wärmebereitstellung**
- 4) Zusammenfassung & Ausblick

Ist CO₂ zur Wärmebereitstellung geeignet?

Signifikanter Unterschied zwischen den Wellhead Bedingungen von Wasser und CO₂



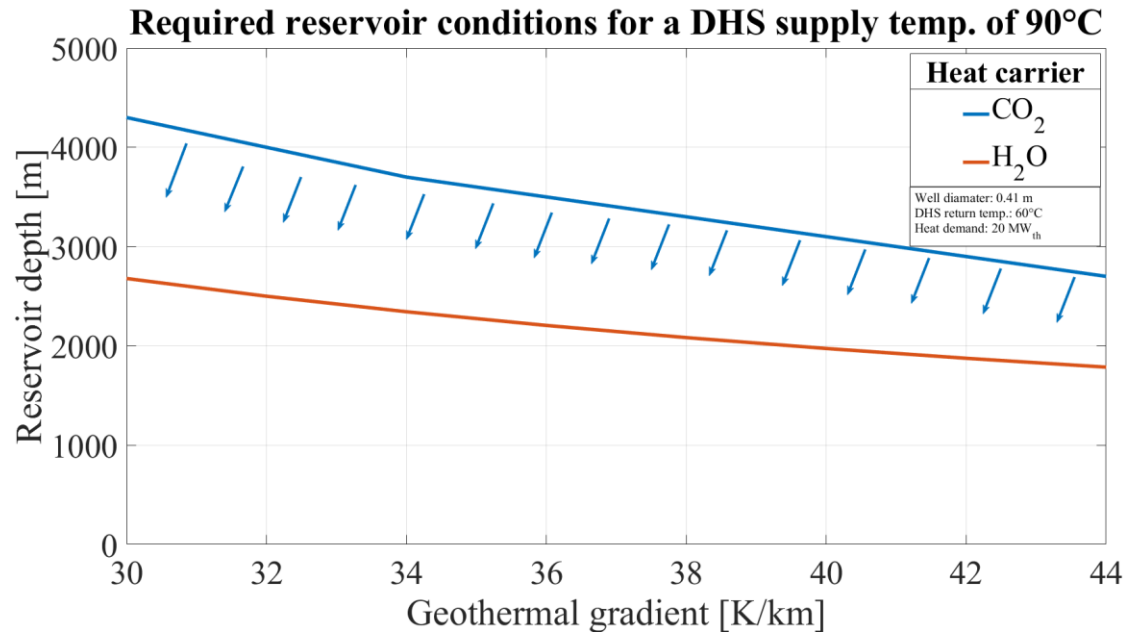
Wellhead Bedingungen

Fluid	Temperatur	Druck
CO ₂	123 °C	20,5 MPa
Wasser	173 °C	3,0 MPa

- ▶ Die Anwendung von reinem CO₂ zur Wärmebereitstellung erfordert deutlich größere Bohrtiefen.

Ist CO₂ zur Wärmebereitstellung geeignet?

Signifikanter Unterschied zwischen den Wellhead Bedingungen von Wasser und CO₂



Wellhead Bedingungen

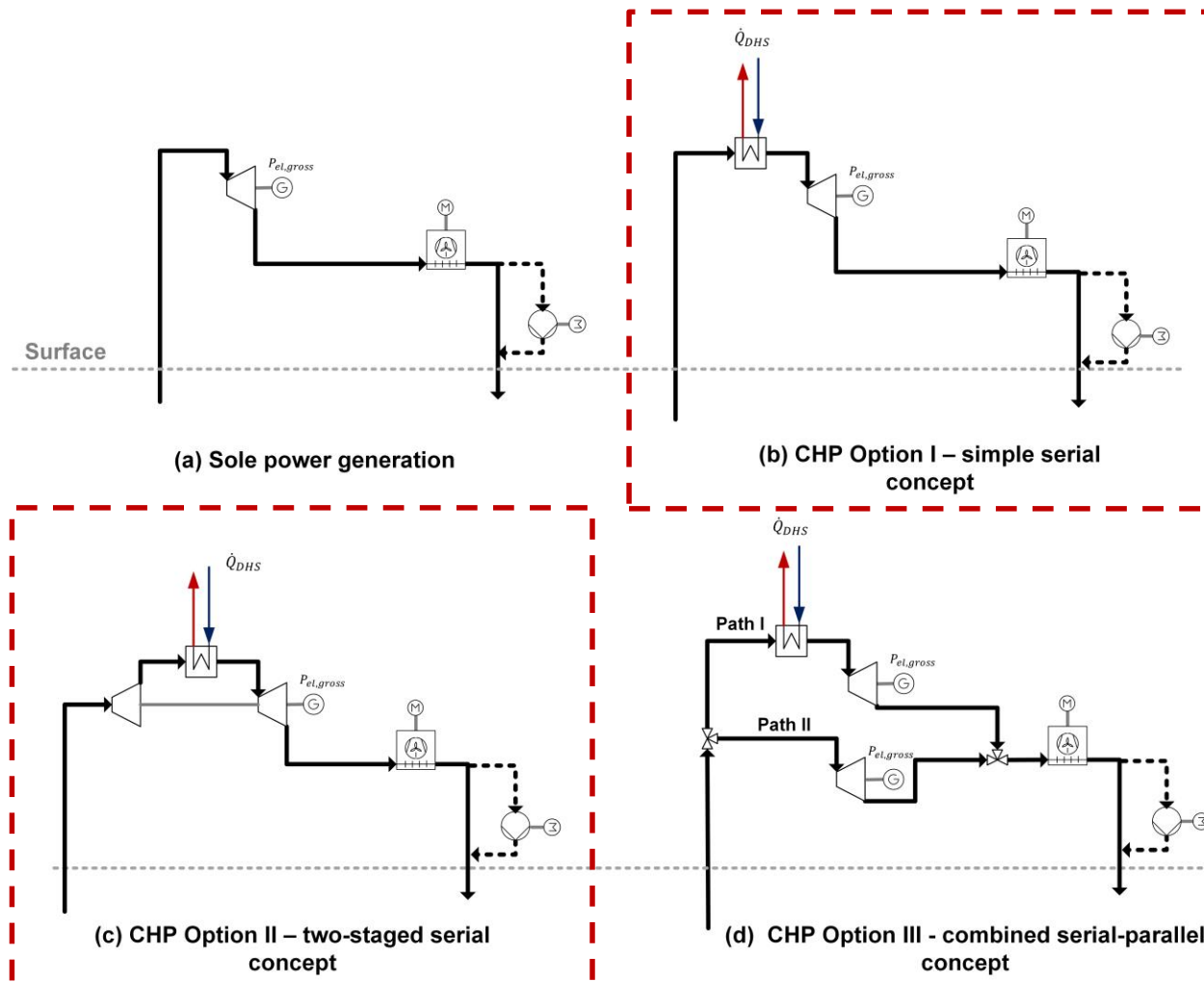
Fluid	Temperatur	Druck
CO ₂	123 °C	20,5 MPa
Wasser	173 °C	3,0 MPa

- ▶ Die Anwendung von reinem CO₂ zur Wärmebereitstellung erfordert deutlich größere Bohrtiefen.
- ▶ Bereits ein kleiner Anteil von Wasser kann den Unterschied bei der notwendigen Bohrtiefe deutlich verringern.

Auswirkung von gesättigtem gelöstem Wasser im CO₂ am Eintritt in die Förderbohrung¹

Tiefe	Reservoir Druck	Massenanteil Wasser (%)	Reservoir Temp.	Wellhead Bedingungen			
				Reines trockenes CO ₂		Mischung	
				Temperatur	Druck	Temperatur	Druck
2,5 km	25 MPa	0,42 %	102,5 °C	61,4 °C	12,3 MPa	66,8 °C	12,6 MPa
5 km	50 MPa	5,97 %	190 °C	132,5 °C	24,0 MPa	165,9 °C	25,2 MPa

Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte



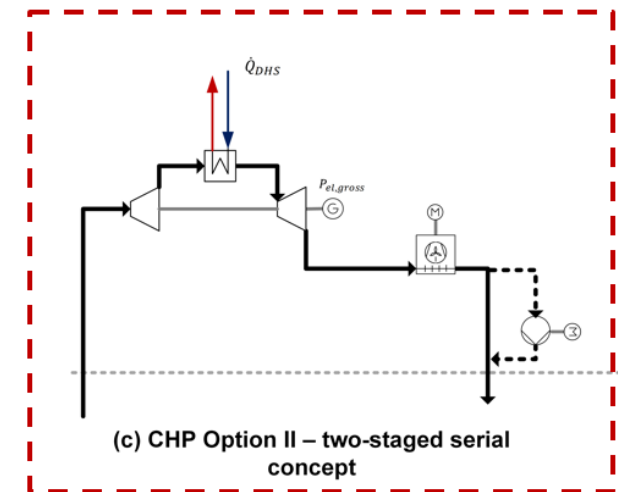
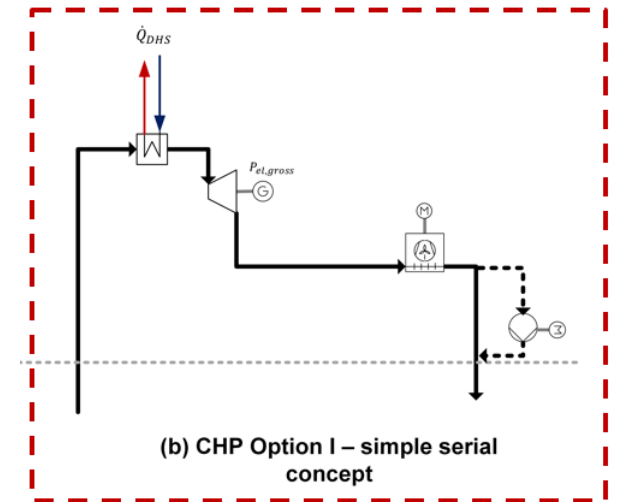
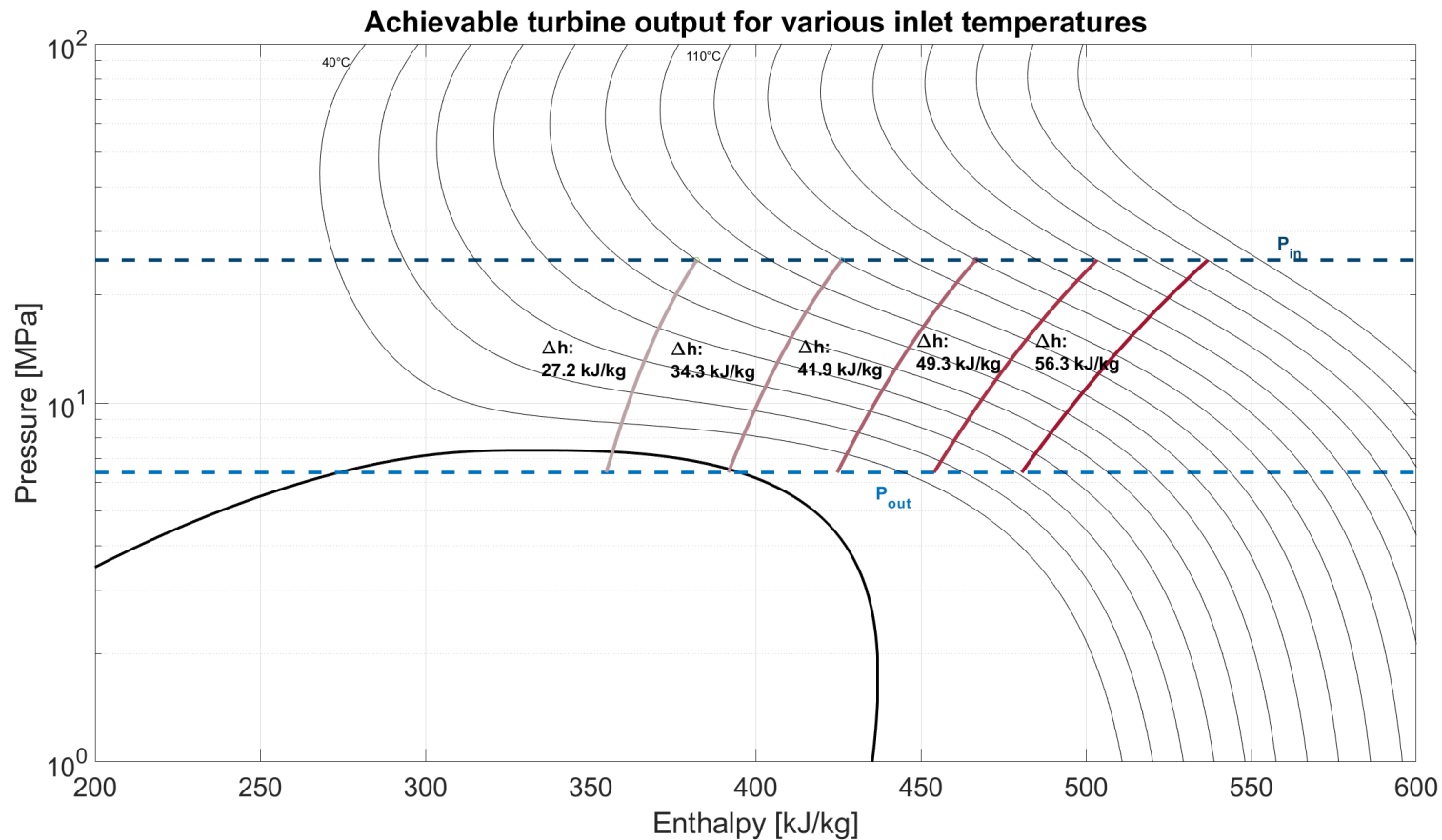
Vergleich des Thermosiphons und gepumpten Systems für vier Anlagenkonfiguration:

- ▶ Reine Stromerzeugung (Referenzszenario).
- ▶ Serielle Verschaltung mit Wärmeauskopplung vor der CO₂ Turbine.
- ▶ Serielle Verschaltung mit Wärmeauskopplung auf einem mittleren Druckniveau.
- ▶ Kombinierte serielle-parallele Verschaltung.

Analyse für unterschiedliche Reservoirbedingungen und benötigte FW-Vorlauftemperaturen.

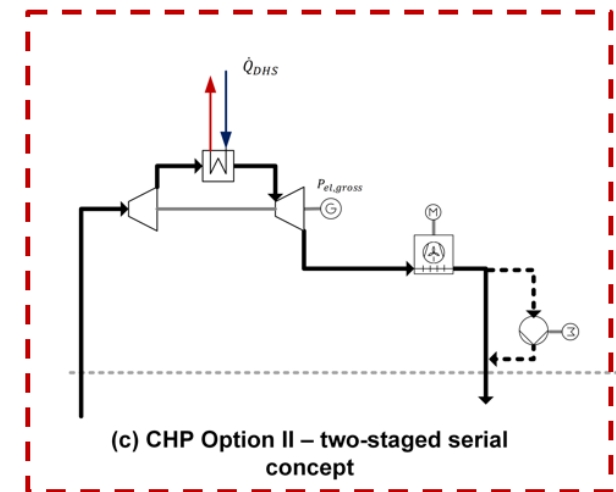
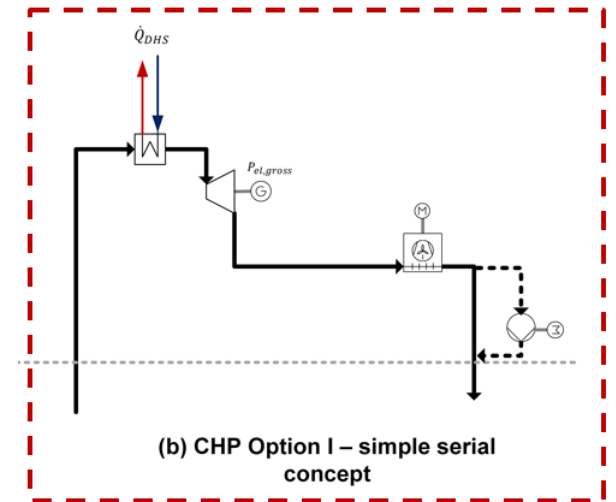
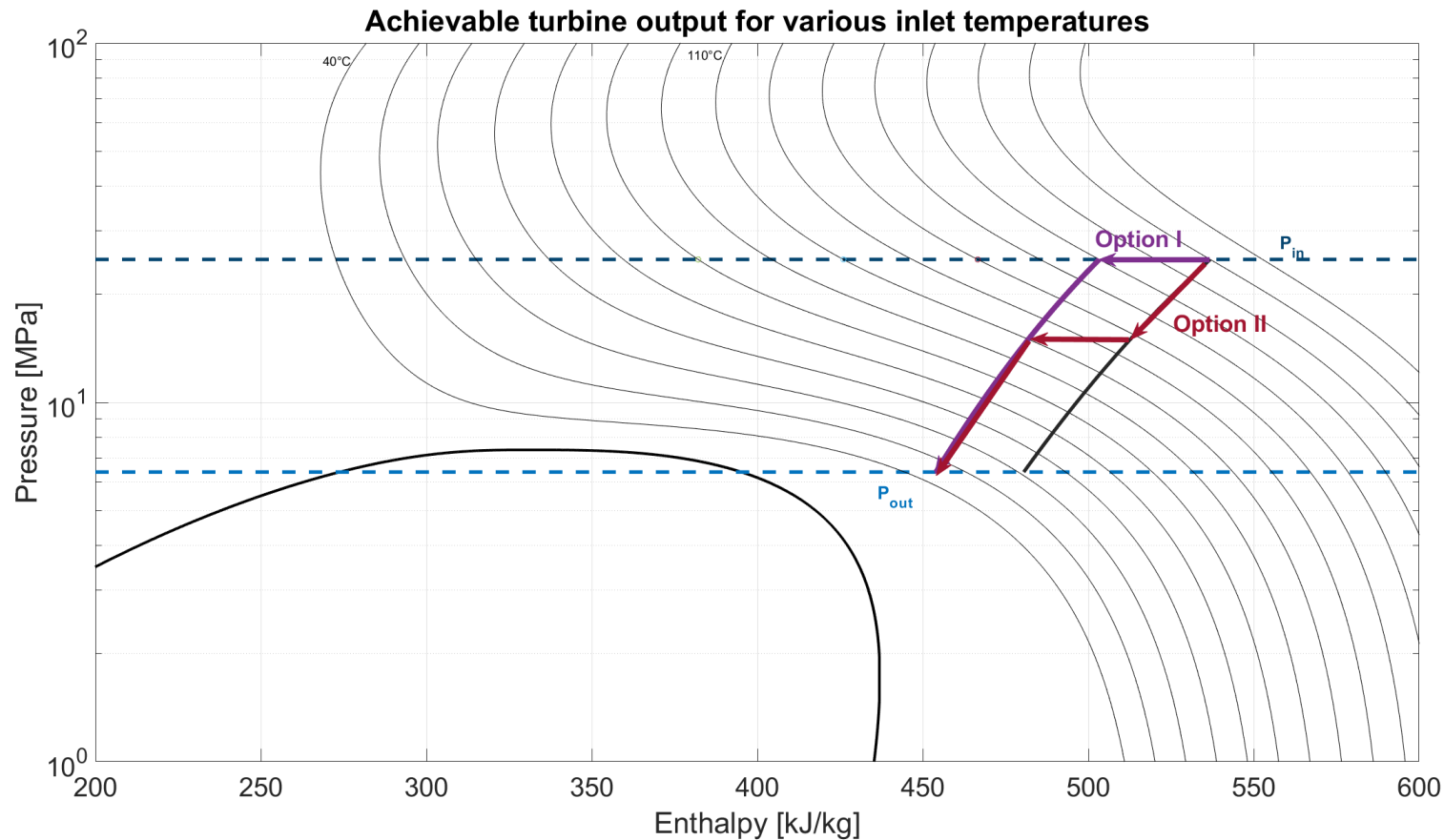
Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte

Einfluss der Turbineneintrittstemperatur auf die erzielbare Leistung



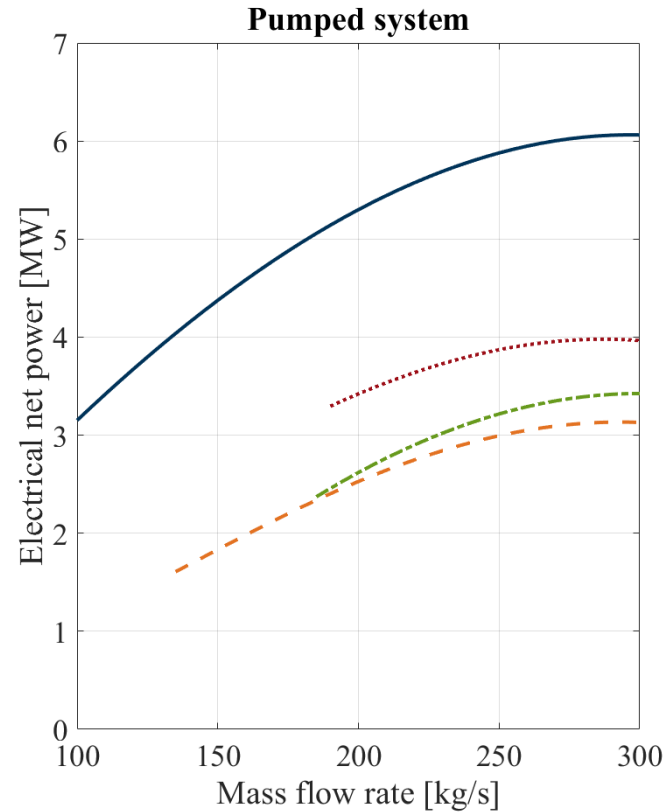
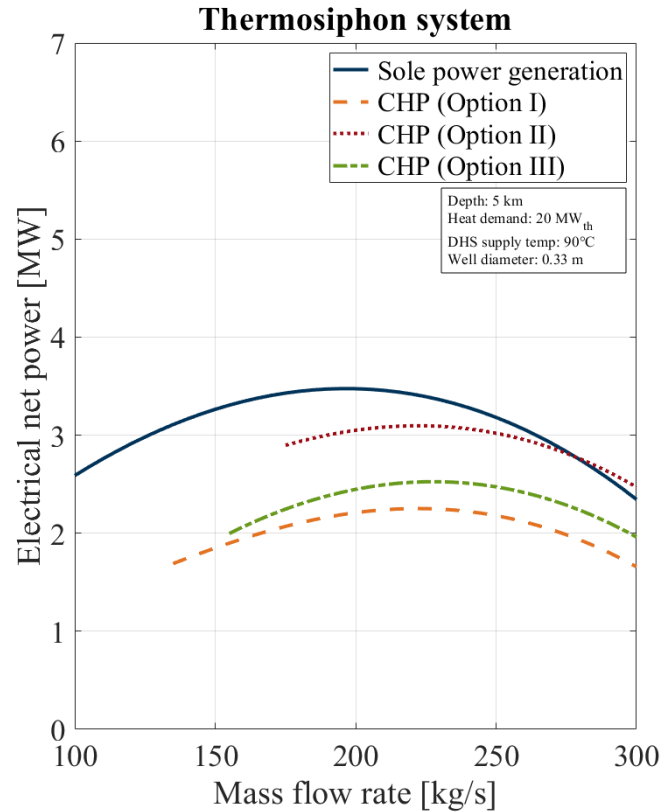
Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte

Unterschied zwischen Option I und II



Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte

Ergebnisse für eine FW-Vorlauftemperatur von 90°C



- ▶ Option II stellt das beste Strom- und Wärmekonzept dar, erfordert aber hohe Wellheadtemperaturen.
- ▶ Höhere absolute und relative Leistungseinbußen durch die Wärmebereitstellung im Fall eines gepumpten Systems.
- ▶ Die Leistungseinbußen verringern sich bei größeren Tiefen und geringeren FW-Vorlauftemperaturen.

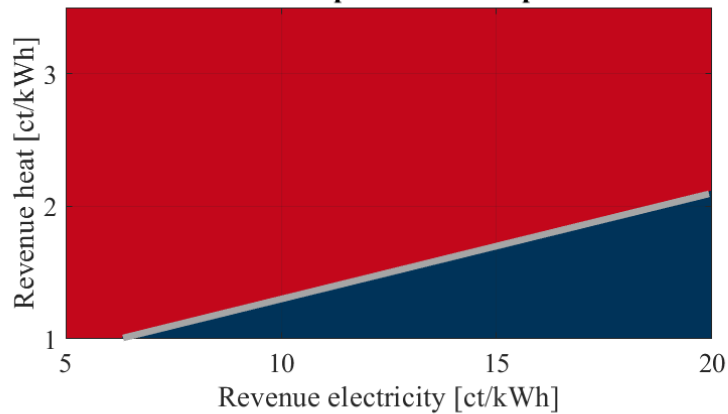
Vergleich der erzielbaren Nettoleistung im Fall reiner Stromerzeugung und dem besten Anlagenkonzept

	4 km		5 km	
	90°C Sup. Temp.	70°C Sup. Temp.	90°C Sup. Temp.	70°C Sup. Temp.
Thermosiphon	-42.1 %	- 11.2 %	-10.7 %	+9.3 %
Pumped	-62.6 %	- 43.4 %	-34.5 %	- 22.9 %

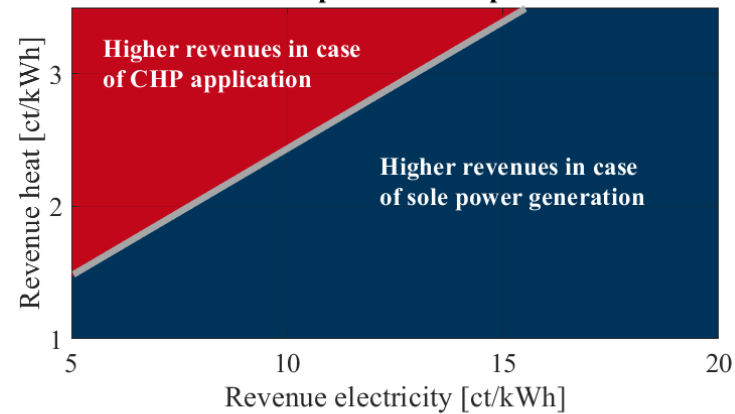
Bewertung der erzielbaren Erlöse

Ergebnisse für eine FW-Vorlauftemperatur von 90°C

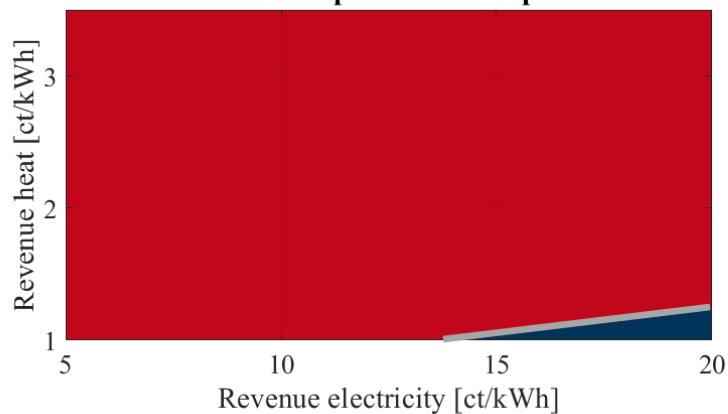
Thermosiphon - 4 km depth



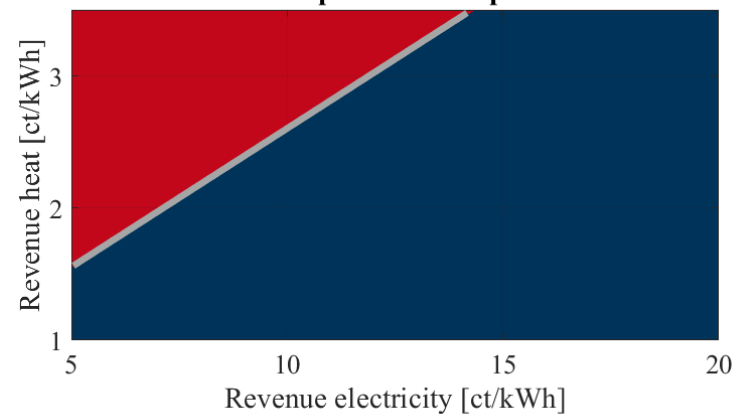
Pumped - 4 km depth



Thermosiphon - 5 km depth



Pumped - 5 km depth



$$R_{CHP\ to\ SPG} = \frac{P_{el\ net,CHP} \cdot Rev_{el} + Q_{th,CHP} \cdot Rev_{th}}{P_{el\ net,SPG} \cdot Rev_{el}}$$

if $R_{CHP\ to\ SPG} > 1$: higher revenues for the CHP case
 if $R_{CHP\ to\ SPG} < 1$: higher revenues for the SPG case

- ▶ Der Thermosiphon erzielt bei Wärmeauskopplung fast immer höhere Erlöse. Bei gepumpten Systemen sind die jeweiligen Vergütungen entscheidend.
- ▶ Für geringere FW-Vorlauftemperaturen verbessert sich die Wirtschaftlichkeit deutlich.
- ▶ Aktuell laufende Erweiterung des Modells für eine komplette thermo-ökonomische Bewertung.

Agenda

- 1) Motivation & technisches Grundprinzip
- 2) Reine Stromerzeugung
- 3) Möglichkeiten zur gemeinsamen Strom- und Wärmebereitstellung
- 4) Zusammenfassung & Ausblick**

Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung

- ▶ Die Nutzung von CO₂ als Wärmeträger stellt eine attraktive Alternative zu Wasser dar.
- ▶ Ab einer Tiefe von ca. 4 km eignet sich CO₂ auch für Projekte zur gemeinsame Strom- und Wärmebereitstellung.
- ▶ Ein leichter natürlicher Anteil von Wasser im CO₂ System könnte zu einer deutlichen Steigerung der erzielbaren Wellheadtemperaturen führen.
- ▶ Je nach Wärme- und Stromvergütungen kann die zusätzliche Wärmebereitstellung auch die erzielbaren Einnahmen steigern. Außerdem könnte die lokale Wärmebereitstellung die lokale Akzeptanz steigern.

Ausblick & künftige Forschung

- ▶ Detaillierter Thermo-ökonomische Bewertung und Optimierung und auch Vergleich mit Wasser als Wärmeträger.
 - ▶ Mittelfristig sollte eine detaillierte Berücksichtigung von möglichen Unreinheiten und den Eigenschaften möglicher CO₂-Quellen (verfügbare Menge, Qualität, Preis, etc.) erfolgen.
 - ▶ Mögliche Realisierung von ersten (kleineren) Pilot- und Demoanlagen in Europe
- **Verstärkter Bedarf für interdisziplinäre Forschung**

Fragen und Diskussion

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

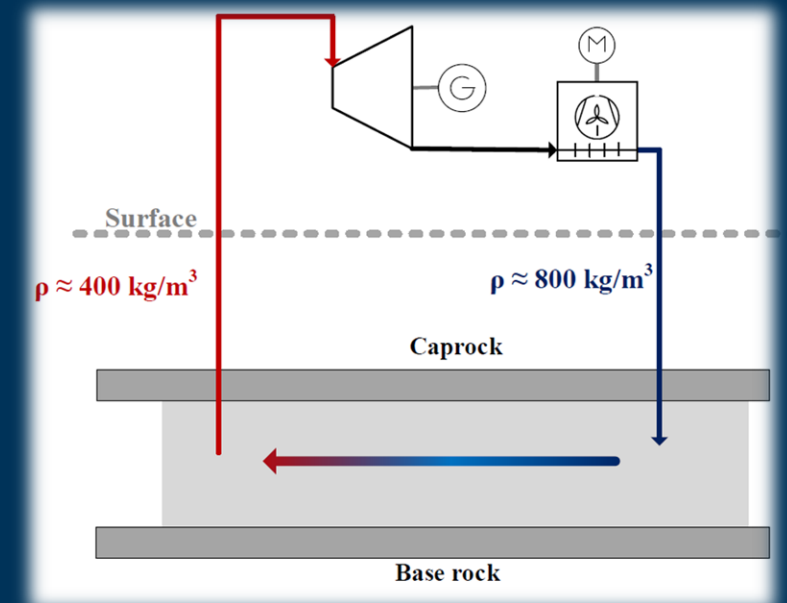
CO₂ als möglicher Wärmeträger in der petrothermalen Geothermie zur gemeinsamen Strom- und Wärmebereitstellung

Christopher Schiffler, Christoph Wieland, Hartmut Splethoff

c.schiffler@tum.de

GAB Wissenstransfer 2022

Technische Universität München
Lehrstuhl für Energiesysteme
Garching, 31. März 2022



Referenzen und weiterführende Literatur

Adams et al. (2015). A comparison of electric power output of CO₂ Plume Geothermal (CPG) and brine geothermal systems for varying reservoir conditions, Appl. Energy. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.043>

Atrens et al. (2011). Economic Optimization of a CO₂-Based EGS Power Plant. Energy & Fuels. <https://doi.org/10.1021/ef200537n>

Brown (2000) A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water, in: Proceedings of the Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University. <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2000/Brown.pdf>

Fleming et al. (2020). Increased Power Generation due to Exothermic Water Exsolution in CO₂ Plume Geothermal (CPG) Power Plants. Geothermics. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101865>

Glos et al. (2018). Assessment of CO₂ Plume Geothermal (CPG) Systems. First EAGE/IGA/DGMK Joint Workshop on Deep Geothermal Energy. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802942>

Hansper et al. (2019). Assessment of Performance and Costs of CO₂ Plume Geothermal (CPG) Systems. European Geothermal Congress 2019. <https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/305.pdf>

Schifflechner et al. (2020). Thermodynamic comparison of direct supercritical CO₂ and indirect brine-ORC concepts for geothermal combined heat and power generation. Renewable Energy. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.044>

Schifflechner et al. (2021). Thermodynamic and Economic Optimization of CO₂ Plume Geothermal Systems for Combined Heat and Power Production. ECOS 2021 Conference.

Schifflechner et al. (2022). CO₂ Plume Geothermal Systems for Combined Heat and Power Production: an Evaluation of Various Plant Configurations. Journal of Thermal Science.