HOCHSCHULE RUHR WEST
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SIEMENS energy

Bachelorarbeit

Thermoökonomischer Vergleich von Geothermiekonzepten für Wärmeauskopplung mit sCO_2 und Sole als Wärmeträgermedium

Studiengang: Maschinenbau dual
der Hochschule Ruhr West

Ralf Radke
MatrikelNr.: 10013319

Prüfer: Dr.-Ing. Matthias Knippel

Kooperationspartner: Siemens Energy

Betreuer: Ing. Michael Wechsung

Mülheim an der Ruhr, eingereicht am 24.04.2025

Aufgabenstellung

Thema: Thermoökonomischer Vergleich von Geothermiekonzepten für Wärmeauskopplung mit sCO2 und Sole als Wärmeträgermedium

Geothermische Kraftwerke sind eine emissionsfreie, und im Gegensatz zu Windkraft und Sonnenenergie grundlastfähige Alternative zu konventionellen Kraftwerken, da Erdwärme das ganze Jahr über schwankungsfrei zur Verfügung steht. Bei der Stromwandlung in einem Geothermie-Kraftwerk kommen üblicherweise konventionelle Methoden basierend auf Wasser/Dampf oder ORC-Kreisläufe als indirekte Systeme zum Einsatz. Eine alternative Technologie basierend auf überkritischem Kohlendioxid (sCO_2) ist seit einigen Jahren Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [1,2]. In der Literatur werden solche Systeme CO_2 Plume Geothermal (CPG) oder Next Gen Geothermal Power (NGP) genannt.

Solche (NGP-) Systeme bieten mehrere thermophysikalische Vorteile im Vergleich zu konventionellen hydrothermalen Kraftwerken. Die Vorteile resultieren in einer effektiveren geothermischen Wärmegewinnung und einem geringeren Bedarf an zusätzlicher Pumpenergie durch einen starken Thermosiphon-Effekt. Weiterhin bieten NGP-Systeme die Möglichkeit abgeschiedenes und unterirdisch gespeichertes CO_2 von fossilen Kraftwerken oder großen Industrieanlagen nachhaltig im Rahmen von CCUS zu nutzen. In vorhergehenden Arbeiten konnten für ein einfaches System bestehend aus einer Injektionsbohrung und vier Produktionsbohrung die thermodynamischen Vorteile bestätigt werden. Weiterhin wurde gezeigt, dass solche geothermischen Kraftwerke durch Skalierung hin zu größeren Systemen wirtschaftlich betrieben werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Potential von sCO_2-basierten Kreisläufen in Geothermie-Kraftwerken in Wärmeanwendungen (Fernwärme und Prozesswärme) sowie kombinierten Kraft-Wärmeanwendungen untersucht werden. Während NGP-Anlagen grundsätzlich für die gemeinsame Strom- und Wärmebereitstellung geeignet sind, stellen die verhältnismäßig geringen erzielbaren Temperaturen am Produktions-Bohrkopf (<100°C) eine Herausforderung für die Versorgung von konventionellen Fernwärmenetzen oder Industrieprozessen dar [3]. Jedoch könnte die Kombination von NGP mit direkten Wärmepumpenkonzepten zur Anhebung der Temperatur ein vielversprechender Ansatz zur Wärmeversorgung darstellen, welcher im Rahmen der Arbeit untersucht und bewertet werden soll. Für die Bewertung wird die abgeführte Wärmemenge mit der Wärmemenge verglichen, welche „Wasserbasierte Geothermiekraftwerke“ mit denselben Bedingungen liefert.

Grobe Arbeitsschritte:

- Einarbeitung & Literaturstudie
- Modellierung des geothermischen Kreislaufs mit natürlicher Kühlung
- Ergänzung des Kreislaufmodells um verschiedene Arten von Wärmepumpen.
- Thermoökonomische Bewertung

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis I
Abkürzungsverzeichnis III
Formelzeichen und Einheiten III
Griechische Formelzeichen und Einheiten IV
1 Einleitung 1
2 Zielsetzung und Vorgehensweise 2
3 Stand der Technik 3
3.1 Herkömmliche Geothermie, wasserbasiert 3
3.1.1 Randbedingungen eines geothermischen Reservoirs 4
3.2 Thermosiphoneffekt 7
3.3 Pinch Prüfung 7
3.4 Nutzung von CO_2 als Wärmeträgermedium 8
3.5 Vergleich, Vorteile und Nachteile, wärmebasiert 9
3.6 Wärmepumpenkonzepte 10
3.6.1 Klassische Wärmepumpen 10
3.6.2 Absorptionswärmepumpen 10
3.6.3 Turbo Wärmetransformer 11
4 Thermodynamische Analyse und Konzeptvergleich 14
4.1 Sole Kreislauf 15
4.1.1 Modellierung des geothermischen Kreislaufes 16
4.1.2 Stimulation des Gesteins 17
4.1.3 Berücksichtigung des Salzgehaltes 19
4.1.4 Untersuchung einer weiteren Wärmesenke 21
4.1.5 Nutzbare Wärmemenge mit Sole als Wärmeträgermedium 23
4.2 sCO_2-Kreislauf 28
4.2.1 Pumpenkreislauf 29
4.2.2 Turbinenkreislauf 31
4.2.3 Nutzbare Wärmemenge mit CO_2 als Wärmeträgermedium 32
4.3 Vergleich Sole und CO_2 33

4.3.1 Bewertung des Wärmestroms....33
4.3.2 Bewertung des Exergiestroms....34
4.4 Wärmepumpenkonzepte, Turbo Wärmetransformer....36
5 Zusammenfassung und Ausblick....39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nutzung geothermischer Wärme (Bv. Geothermie, Technologien) 4
Abbildung 2: Geothermischer Kreislauf (Quelle modifiziert nach Böhmer 2020, S. 5).5
Abbildung 3: Pinch Prüfung 8
Abbildung 4: Funktionsweise Absorptionswärmepumpe Typ 1 10
Abbildung 5: Funktionsweise Absorptionswärmepumpe Typ 2 11
Abbildung 6: Turbo Wärmetransformer 12
Abbildung 7: T-s Diagramm Turbo Wärmetransformer 13
Abbildung 8: Wärmetauscher mit Grädigkeiten 15
Abbildung 9: Wärmeschaltplan Sole 17
Abbildung 10: Stimulationsdruck (Gaaren 93, S.1305) 18
Abbildung 11: Sole, Sättigung abhängig von der Temperatur 20
Abbildung 12: Wärmestrom abhängig vom Salzgehalt 21
Abbildung 13: Wärmeschaltplan Sole mit Kühler 22
Abbildung 14: Kinematische Viskosität von Sole und sCO2 (Adam 14b, S.368) 23
Abbildung 15: Auswertung Sole Kreislauf, 0 % Salinität 24
Abbildung 16: Auswertung Sole Kreislauf, 15 % Salinität 25
Abbildung 17: Auswertung Sole Kreislauf, 30 % Salinität 26
Abbildung 18: Einfluss des maximalen Einleitungsdrucks 27
Abbildung 19: CO_2 Kreislauf 28
Abbildung 20: T-s Diagramm CO2 Kreislauf 29
Abbildung 21: T-s Diagramm, CO2 Kreislauf mit Pumpe 30
Abbildung 22: CO2 Kreislauf mit Pumpe 30
Abbildung 23: T-s Diagramm, CO2 Kreislauf mit Turbine 31
Abbildung 24: CO2 Kreislauf mit Turbine 31
Abbildung 25: Auswertung CO2 Kreislauf bei 32
Abbildung 26: Vergleich CO2 und Sole 33
Abbildung 27: Bestes Medium, "Druckverhältnis" und Salinität 34
Abbildung 28: Turbo Wärmetransformer, Wärmeverhältnis 36
Abbildung 29: Turbo Wärmetransformer, Grädigkeiten 37

Abbildung 30: Turbo Wärmetransformer, Optimierung 38

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
HRW	Hochschule Ruhr West
sCO2	Überkritisches Kohlenstoffdioxid

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Strömungsquerschnitt im Reservoir
c_p	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}$	Spezifische Wärmekapazität
c_{pSole}	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}$	Spezifische Wärmekapazität, Sole
$c_{pWasser}$	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}$	Spezifische Wärmekapazität, Wasser
E_x	$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$	Exergiestrom
E_{xSole}	$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$	Exergiestrom im Solekreislauf
E_{xCO2}	$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$	Exergiestrom im Wasserkreislauf
g	$\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$	Erdbeschleunigung
h	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$	Spezifische Enthalpie
m	kg	Masse
$\dot{m}$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	Massenstrom
P	W	Leistung
p	bar	Druck
$p_{Einleitung}$	bar	Druck, Injektionsbohrung

$p_{Hydrostatisch}$	bar	Druck, Reservoir
Q	J	Wärme
$\dot{Q}$	$W = \frac{J}{s}$	Wärmestrom
$\dot{Q}_{ab}$	$W = \frac{J}{s}$	Abgeführter Wärmestrom
$\dot{Q}_{nutz}$	$W = \frac{J}{s}$	Nutzbarer Wärmestrom
$\dot{Q}_S$	$W = \frac{J}{s}$	Nutzbarer Wärmestrom mit Sole
$\dot{Q}_W$	$W = \frac{J}{s}$	Nutzbarer Wärmestrom mit CO_2
s	$\frac{J}{kgK}$	Spezifische Entropie
T	K	Temperatur
z	m	Reservoir Tiefe

Griechische Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
Δ	-	Differenz
κ	D	Permeabilität
η	-	Wirkungsgrad
η_P	-	Wirkungsgrad Pumpe
η_T	-	Wirkungsgrad Turbine
η_{TW}	-	Wirkungsgrad Turbo Wärmetransformer
μ	$Pa\ s$	Dynamische Viskosität
ν	$\frac{m^2}{s}$	Kinematische Viskosität
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte

1 Einleitung

Die Bearbeitung dieser Bachelorarbeit findet bei der „Siemens Energy AG“ statt. Der Hauptgeschäftszweig dieses Unternehmens am Standort Mülheim ist die Produktion von Dampfturbinen in verschiedenen Ausführungen. Die größten Turbinen mit dem höchsten Fertigungsaufwand werden für Atomkraftwerke hergestellt.

Der Klimawandel ist in unserer modernen Gesellschaft ein großes Problem. Um die Folgen des Klimawandels zu minimieren, ist es essenziell, dass Energie ohne Treibhausgase als Nebenprodukt erzeugt werden kann. Auch der klimaneutrale Betrieb von Atomkraftwerken ist aufgrund des Endlagerproblems von radioaktivem Müll keine langfristige Alternative. Für die Energiewende ist die Nutzung von erneuerbaren Energien nötig. Eine Möglichkeit dafür ist der Betrieb von Geothermiekraftwerken. Üblicherweise wird hier Sole, also Wasser mit gelösten Salzen, als Wärmeträgermedium verwendet. Eine vielversprechende Alternative zur Sole ist CO_2. Dieses Fluid kann in einem geothermischen Kreislauf aufgrund physikalischer Eigenschaften mehr Leistung nutzbar machen als Sole.

Beim Betrieb von Geothermiekraftwerken wird mechanische Leistung und Wärme nutzbar. Mechanische Leistung wird in elektrische Leistung umgewandelt. Wärme kann für diverse Anwendungen genutzt werden, beispielsweise Fernwärme.

Es stellt sich die Frage, welches Wärmeträgermedium für auf Fernwärme optimierte Geothermiekraftwerke einen höheren Wärmestrom nutzbar machen und wie sich die Kraftwerkskonzepte wirtschaftlich unterscheiden.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Thema der vorliegenden Arbeit wird es sein, Geothermiekraftwerke mit CO_2 und Sole als Wärmeträgermedium bei gleichen Randbedingungen hinsichtlich abgegebener Wärme zu optimieren. Die optimierten Kraftwerke werden thermoökonomisch bewertet.

Für die Bewertung wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein geothermisches Kraftwerk mit dem Wärmeträgermedium Sole ausgelegt. Hierfür wird das Kraftwerk unter Berücksichtigung diverser physikalischer Einflussfaktoren und des Salzgehaltes hinsichtlich des Massestroms und der verwendeten Bauteile optimiert. Dann wird ein geothermisches Kraftwerk mit CO_2 als Wärmeträger ausgelegt und hinsichtlich der verwendeten Bauteile und des Massenstroms optimiert. Die beiden Kraftwerksdesigns werden aufgrund des nutzbaren Wärmestroms und des Exergiestroms in Bezug auf Fernwärmewasser verglichen.

Aufgrund des für Fernwärmewasser nötigen Temperaturniveaus wird für das Kraftwerk mit CO_2 als Wärmeträgermedium ein Wärmepumpenkonzept verwendet. Somit kann verglichen werden, wie sich die nutzbaren Wärmeströme und der Exergiestrom der Wärmeträgermedien unterscheiden, wenn das Temperaturniveau der Wärmeauskopplung dasselbe ist.

3 Stand der Technik

Geothermie ist eine nachhaltige Methode der Energiegewinnung mit zahlreichen Vorteilen. Im Gegensatz zur Stromerzeugung mit Windenergie und Sonnenenergie ist die Nutzung von Erdwärme flächensparend. Aufgrund der dauerhaften Verfügbarkeit ist die Technologie grundlastfähig und gewährleistet somit eine hohe Versorgungssicherheit. (Bauer 14, S.726)

Die Energiegewinnung mithilfe von geothermischen Anlagen hängt von Randbedingungen des Reservoirs und verschiedener physikalischer Faktoren ab. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.1 Herkömmliche Geothermie, wasserbasiert

Geothermiekraftwerke können in offene und geschlossene Systeme eingeteilt werden. Bei offenen Systemen hat das Wärmeträgermedium Kontakt zum Erdmaterial, hohe thermische Leistungen sind umsetzbar. Bei geschlossenen Systemen, wie beispielsweise bei der Nutzung von Erdwärmesonden, hat das Wärmeträgermedium keinen Kontakt zum Erdmaterial. Es ist unabhängig von der Tiefe, ob ein System offen oder geschlossen ist.

Der Bereich der „oberflächennahen Geothermie“ beschreibt die Nutzung von Erdwärme bis 400 m Tiefe. Als „mitteltiefe Geothermie“ werden Anlagen bis 2500 m bezeichnet. Der „tiefen Geotherme“ sind geothermische Systeme bis 5000 m zuzuordnen. Die geothermischen Technologien können abhängig von der Tiefe, in welcher sie verwendet werden, der Abbildung 1 entnommen werden.

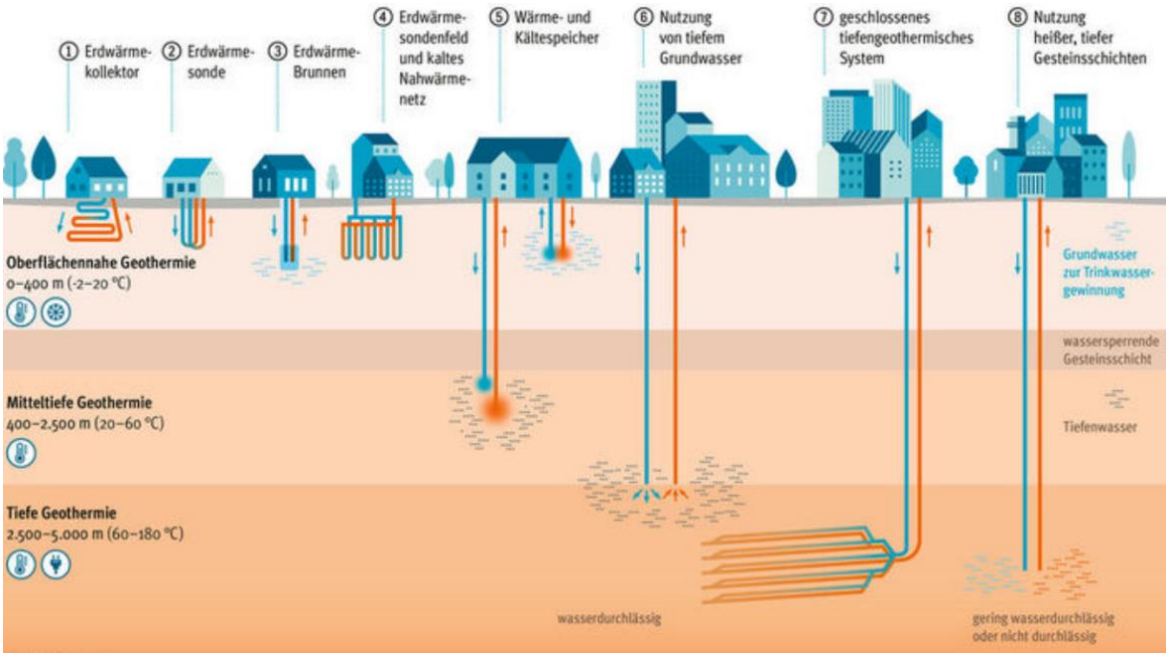

Abbildung 1: Nutzung geothermischer Wärme (Bv. Geothermie, Technologien)

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Nutzung heißer, tiefer Gesteinsschichten im Rahmen eines offenen Systems. (Hansper 18, S. 7)

3.1.1 Randbedingungen eines geothermischen Reservoirs

Bei der offenen Geothermie müssen für die Nutzung eines Reservoirs zur Energiegewinnung einige Randbedingungen erfüllt sein. Das Reservoir muss über eine Deckschicht verfügen, welche das Arbeitsmedium am Austreten hindert (siehe Abbildung 2). Diese Deckschicht kann aus einer dichten Tonschicht oder Salzschicht bestehen und muss eine ausreichende Mächtigkeit vorweisen.

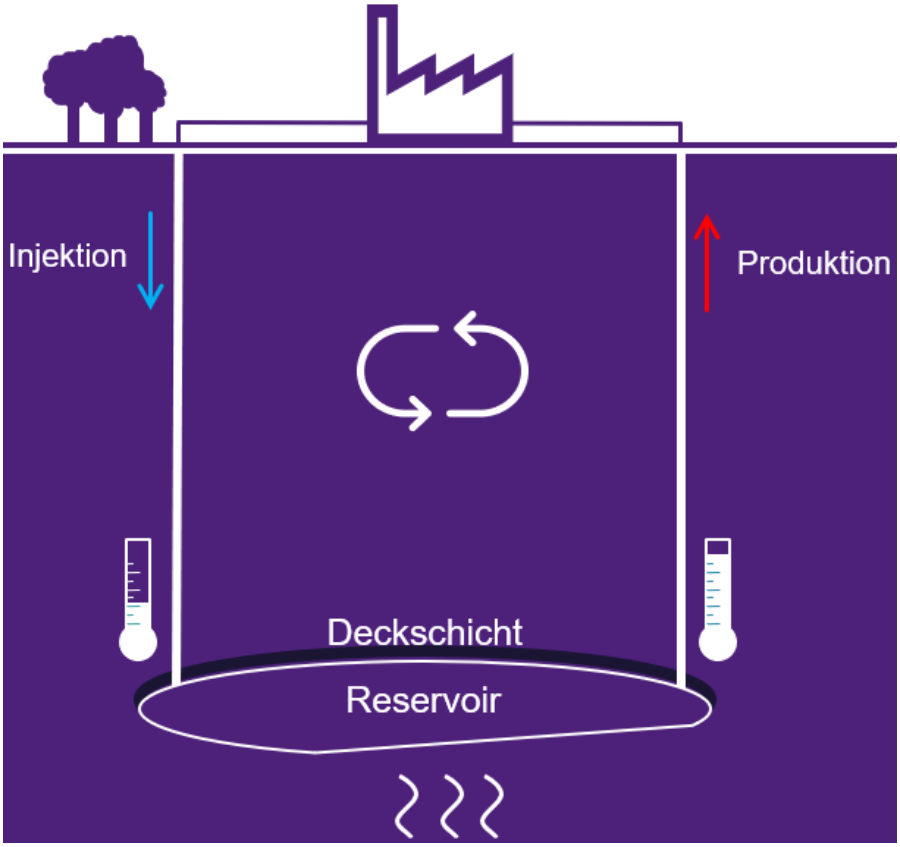

Abbildung 2: Geothermischer Kreislauf (Quelle modifiziert nach Böhmer 2020, S. 5)

Auch hydraulische Eigenschaften sind für den Betrieb eines Geothermiekraftwerkes von Bedeutung. Die Permeabilität κ [mD $\approx$ 10^{-9} m^2] beschreibt die Durchlässigkeit des Reservoirs (Speicherschicht) für das Medium. Sie wird durch hydraulische Tests an der Injektionsbohrung und Produktionsbohrung ermittelt. Ein Gestein mit guter Durchlässigkeit ist beispielsweise Sandstein. (Schnorr 21, S.6)

Der Umgebungsdruck im Reservoir wird auch als hydrostatischer Druck bezeichnet. Die Druckerhöhung des Mediums Δp zwischen Kraftwerk und Reservoir setzt sich gemäß der Formel 3-1 aus der Reservoirtiefe z, der mittleren Dichte von Wasser ρ und der Erdbeschleunigung g zusammen.

$$\Delta p = z \cdot \rho \cdot g \qquad (3\text{-}1)$$

Der hydrostatische Druck hat zusammen mit der Temperatur im Reservoir einen direkten Einfluss auf die Leistung, welche dem geothermischen Reservoir entnommen werden kann. (Hansper 18, S.5f.)

Wie stark die Temperatur bei zunehmender Tiefe ansteigt, hängt vom geothermischen Gradienten ab. Dieser ist standortspezifisch und liegt in Deutschland durchschnittlich bei 3 K / 100 m Tiefe. In Gebieten mit thermischen Anomalien treten für den geothermischen Gradient auch Maximalwerte von > 20 K / 100 m auf. Diese

Anomalien können durch vulkanische Aktivität erzeugt werden. Die Tiefe hat somit aufgrund der Abhängigkeit zur Temperatur im Reservoir, dem hydrostatischen Druck und den Bohrkosten einen zentralen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Geothermiekraftwerkes. (Bv. Geothermie, Gradient)

Geeignete geologische Randbedingungen können in erschöpften Erdöllagerstätten oder Erdgaslagerstätten zu finden sein. Ein Vorteil ist, dass Bohrungen für den Betrieb eines Geothermiekraftwerkes hier schon vorhanden sein können. Das kann für die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerks entscheidend sein, weil die Bohrkosten den größten Teil der Investitionskosten ausmachen. (Heuter, 2023, S.40)

Es wird zwischen Produktionsbohrung und Injektionsbohrung unterschieden. Die Flussrichtung des Fluids kann der Abbildung 2 entnommen werden. Wie viele der Bohrungen bei einem Geothermiekraftwerk für die maximale Wirtschaftlichkeit nötig sind, ist von den Randbedingungen des Reservoirs abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit werden für eine vereinfachte Betrachtung nur eine Produktionsbohrung und eine Injektionsbohrung für jeden Kreislauf angenommen. Wenn mehrere Bohrungen für die Injektion oder Produktion vorhanden sind, müssen Rechenergebnisse auf die entsprechende Anzahl umgerechnet werden. (Heuter 2023, S.5)

3.2 Thermosiphoneffekt

Die Dichte von Fluiden ist temperaturabhängig. Wenn sich aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen Kraftwerk und Reservoir Dichteunterschiede im Medium bilden, hat dies eine Bewegung im System zur Folge. Diese basiert auf der freien Konvektion, und wird in diesem geothermischen Rahmen als Thermosiphon-Effekt bezeichnet.

In der Geothermie lässt sich der Thermosiphoneffekt nutzen, um das Wärmeträgermedium CO_2 ohne den Einsatz von Pumpen kontinuierlich zirkulieren zu lassen. Eine stark variable Dichte und eine gasähnliche Viskosität beeinflussen den Effekt positiv. Horizontale, oder sehr lange vertikale Leitungen beeinträchtigen die Effizienz des Thermosiphoneffektes. Zudem hat die von der Tiefe abhängige Temperaturzunahme hat einen großen Einfluss auf die Stärke des Effektes.

Bei der Optimierung eines Geothermiekraftwerkes hinsichtlich nutzbarer Leistung ist es sinnvoll, die Wirkung des Thermosiphoneffekt abhängig von den gegebenen Randbedingungen zu maximieren. (Sudhoff 19, S.7f.)

3.3 Pinch Prüfung

Die “Pinch Prüfung” ist eine thermodynamische Analyse zur Optimierung der Wärmerückgewinnung in Wärmeübertragern. Diese Prüfung ist ein essenzielles Verfahren zur Reduktion des Energieverbrauchs. Wenn die Nutzung der Wärmeströme optimiert wird, kann eine signifikante Menge Energie eingespart werden. Die damit verbundenen Emissionen tragen zur Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit bei. Deshalb ist die Pinch Prüfung in verschiedenen Industriezweigen von großer Bedeutung, besonders in Systemen mit verschiedenen Temperaturniveaus und komplizierten Wärmeübergängen.

Vorerst werden die Wärme abgebenden Prozessströme und die Wärme aufnehmenden Prozessströme im Wärmetauscher erfasst. Aufgrund dieser Daten können Verbundkurven in einem T-Q Diagramm erzeugt werden, welche dann die Wärmeströme der heißen und kalten Fluiden in Abhängigkeit von der Temperatur darstellen. Der „Pinch”, Englisch für „Engpass”, bezieht sich auf den Punkt, bei welchem die Temperaturdifferenz zwischen den heißen und kalten Strömen am niedrigsten ist. Wenn die Kurven sich schneiden, ist eine Wärmeübertragung an dem Punkt nur mit signifikanten Effizienzeinbußen möglich. Am Pinch Punkt können die

Wärmeströme optimiert werden, um die Wärmerückgewinnung zu maximieren (siehe Abbildung 3).

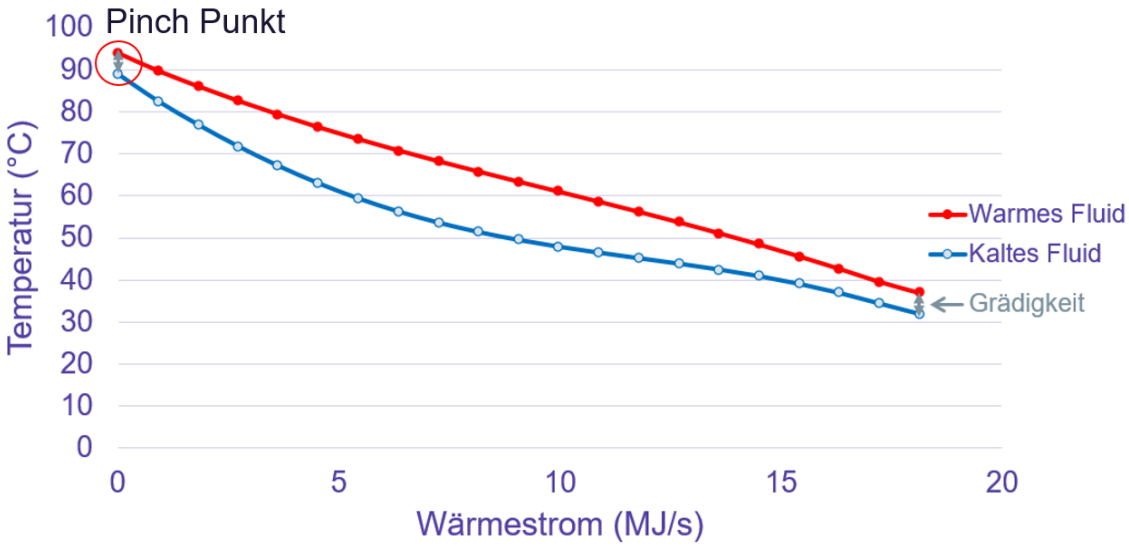

Abbildung 3: Pinch Prüfung

Die Pinch Prüfung wird bei jedem Kreislauf mit jedem relevanten Wärmetauscher durchgeführt. Aufgrund des vorhandenen Drucks und der Temperatur beim Medium CO_2, der konservativen Grädigkeiten an den Wärmetauschern von 5 K und der Vermeidung von Wärmeübergängen im Nassdampfgebiet von Wasser sind keine Pinch Verletzungen in den betrachteten Kreisläufen zu erwarten. (Sudhoff 19, S.26f.)

3.4 Nutzung von CO_2 als Wärmeträgermedium

Ein Nachteil bei der Nutzung von CO_2 im geothermischen Kreislauf ist, dass das Reservoir in einer Tiefe von > 800 m liegen muss. Das hängt mit dem überkritischen Zustand zusammen, in welchen das CO_2 ab dieser Tiefe aufgrund des hydrostatischen Druckunterschiedes übergeht. Weil die Dichte in diesem Zustand signifikant höher ist, kann eine größere Wärmemenge gespeichert werden.

Außerdem müssen aufwändigere Sicherheitsmaßnahmen gegen das Austreten des Mediums getroffen werden. CO_2 ist ein geruchs- und geschmackloses Gas, welches schwerer als Luft ist. Wenn dieses aus dem Reservoir entweichen und sich an der Erdoberfläche sammeln sollte, besteht Erstickungsgefahr. Ebenfalls können Nutzungskonflikte mit lokalen Grundwasservorkommen entstehen. Eine regelmäßige Überwachung des Reservoirs auf Leckagen ist nötig.

Aufgrund der Einbringung von CO_2 in das Erdreich bei der Nutzung von CO_2 als Wärmeträgermedium eine negative CO_2 Bilanz für den Aufbau eines Geothermiekraftwerkes möglich. Dies ist im Hinblick auf den Klimawandel und den Handel mit CO_2 Zertifikaten ein nützlicher Nebeneffekt. (Hansper 18, S.14f.)

3.5 Vergleich, Vorteile und Nachteile, wärmebasiert

Die Wärmeträger Sole und CO_2 unterscheiden sich aufgrund diverser physikalischer Eigenschaften. Sole hat als näherungsweise inkompressibles Medium am Ausgang der Produktionsbohrung aufgrund des fehlenden hydrostatischen Drucks einen signifikant niedrigeren Druck als CO_2. Die Temperaturverluste zwischen Reservoir und Produktionsbohrung sind ebenfalls gering.

Aufgrund der Kompressibilität des Wärmeträgers CO_2 sinkt die Temperatur des Fluids, wenn der Umgebungsdruck sinkt. Ein starker Thermosiphoneffekt und die Dekompression zwischen Reservoir und Kraftwerk erklären einen hohen nutzbaren Druck des Mediums. Somit ist bei der Nutzung von CO_2 anstelle von Sole als Wärmeträger die nutzbare Temperatur geringer und der nutzbare Druck größer.

Die Medien Sole und CO_2 haben bei der Berechnung des Wärmestroms Eingangsvariablen, welche sich stark unterscheiden. Die spezifische Wärmekapazität c_p ist bei CO_2 mit einem Wert von 0,846 $\frac{kJ}{kgK}$ deutlich geringer als bei Sole mit einem Wert von $4{,}187\ \frac{kJ}{kgK}$ (Chemie, Wärmek.).

Weil sCO_2 eine gasähnliche dynamische Viskosität und eine flüssigkeitsähnliche Dichte hat, kann es das poröse Gestein in der Speicherschicht des Reservoirs verlustärmer durchströmen als Sole. Eine Untersuchung hinsichtlich erzeugbarer Fernwärme ist sinnvoll. (Adam 14a, S.365ff.)

3.6 Wärmepumpenkonzepte

Bei der Einspeisung von Wärme in ein Fernwärmenetz ist ein Temperaturniveau von 140 °C nötig. Mithilfe einer Wärmepumpe können Wärmeströme eines niedrigeren Temperaturniveaus für Fernwärme nutzbar gemacht werden. Bei Wärmepumpen wird zwischen verschiedenen Modellen unterschieden. Eine Wärmepumpe kann die Temperatur eines Mediums mit elektrischer Leistung oder Wärme erhöhen.

3.6.1 Klassische Wärmepumpen

Die klassische Wärmepumpe, wie sie auch zum Heizen von Haushalten verwendet wird, ist eine Kompressionswärmepumpe und wird mit elektrischer Leistung betrieben. Mithilfe der Kompression und Drosselung eines Wärmeübertragers kann Wärme von einem Fluid auf ein anderes übertragen werden. Das Temperaturniveau wird dabei erhöht.

3.6.2 Absorptionswärmepumpen

Im Gegensatz zu den klassischen Kompressionswärmepumpen nutzen Absorptionswärmepumpen Wärme als Antrieb. Sie übertragen einen Wärmestrom mit hohem Temperaturniveau und einen Wärmestrom mit niedrigem Temperaturniveau in einen Wärmestrom mittleren Temperaturniveaus (siehe Abbildung 4).

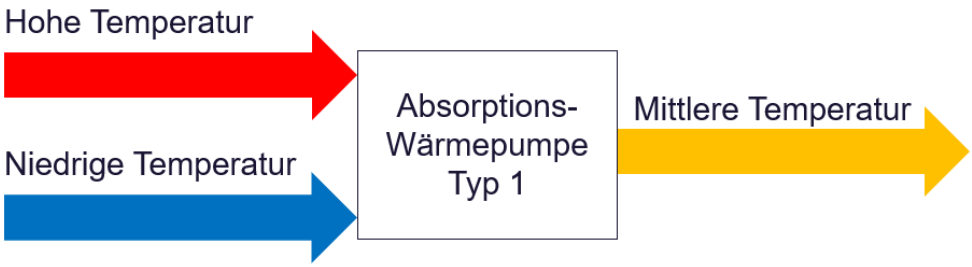

Abbildung 4: Funktionsweise Absorptionswärmepumpe Typ 1

Diese Art der Absorptionswärmepumpe kann beispielsweise an Industriestandorten betrieben werden, wo Abwärmeströme mit einem hohen Temperaturniveau nutzbar gemacht werden können und günstig oder kostenfrei verfügbar sind. Damit kann ein Wärmestrom mit niedriger Temperatur eines beispielsweise geothermischen Kraftwerkes für Wärmekunden verfügbar gemacht werden, welche ein mittleres Temperaturniveau interessiert.

Absorptionswärmepumpen des Typ 2 werden auch als Wärmetransformer bezeichnet, sie nutzen ebenfalls die verfügbare Wärme als Antrieb. Beim Typ 2 wird ein

Wärmestrom auf mittlerem Temperaturniveau auf einen hoch und niedrig temperierten Wärmestrom aufgeteilt (siehe Abbildung 5).

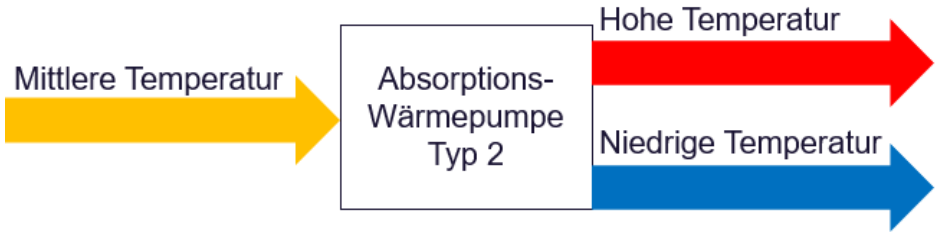

Abbildung 5: Funktionsweise Absorptionswärmepumpe Typ 2

Wärmetransformer sind aufgrund einiger Vorteile für den Einsatz in einem geothermischen Kraftwerk interessant. Der Wärmestrom mit niedriger Temperatur kann für die Kühlung des Wärmeträgermediums im geothermischen Kreislauf verwendet werden (siehe Kapitel 4.2). Diese Kühlung kann aufgrund der entstehenden Dichteunterschiede den Thermosiphoneffekt positiv beeinflussen, was die nutzbare Leistung des Kraftwerkes erhöht.

Mithilfe des hoch temperierten Wärmestroms aus dem Wärmetransformer kann die Temperatur des nutzbaren geothermischen Wärmestroms erhöht werden. Das ist interessant, wenn Wärmekunden eine höhere Temperatur benötigen, als das geothermische Reservoir liefert. Solche Wärmeströme können mithilfe des Wärmetransformers für beispielsweise Prozess- oder Fernwärme nutzbar gemacht werden.

Absorptionswärmepumpen funktionieren über ein Kältemittel, welches bei niedrigem Druck verdampft. Wenn das Kältemittel im gasförmigen Zustand im „Absorber“ von einem Lösungsmittel aufgenommen wird, wird Wärme auf einem höheren Temperaturniveau frei. (Ramming 19, S.1ff.)

3.6.3 Turbo Wärmetransformer

Mit der Nutzung eines Turbo Wärmetransformers ist es möglich, die vorhandene Temperatur eines Wärmestroms über die Nutzung von Wärmeenergie zu erhöhen. Der Turbo Wärmetransformer kann wie die Absorptionswärmepumpe Typ 2 einen Wärmestrom mittleren Temperaturniveaus auf einen Wärmestrom mit hohem Temperaturniveau und einen Wärmestrom mit niedrigem Temperaturniveau aufteilen. Der Turbo Wärmetransformator ist im Gegensatz zum klassischen Wärmetransformer eine Kompressionswärmepumpe und wird mit Turbomaschinen betrieben. Das

Arbeitsmedium bei der Übertragung von Temperaturen im geothermischen Kontext ist CO_2.

Um eine Kompressionswärmepumpe mit Wärme zu betreiben, müssen dem klassischen Wärmepumpenkreislauf Komponenten hinzugefügt werden. Durch die Nutzung einer Turbine ist es möglich, den Leistungsbedarf der Pumpe und des Kompressors im Kreislauf des Turbo Wärmetransformers zu decken. In Abbildung 6 ist dieser exemplarisch für den Anwendungsfall in einem geothermischen Kraftwerk zur Erhöhung der Temperatur für Wärmeauskopplung dargestellt.

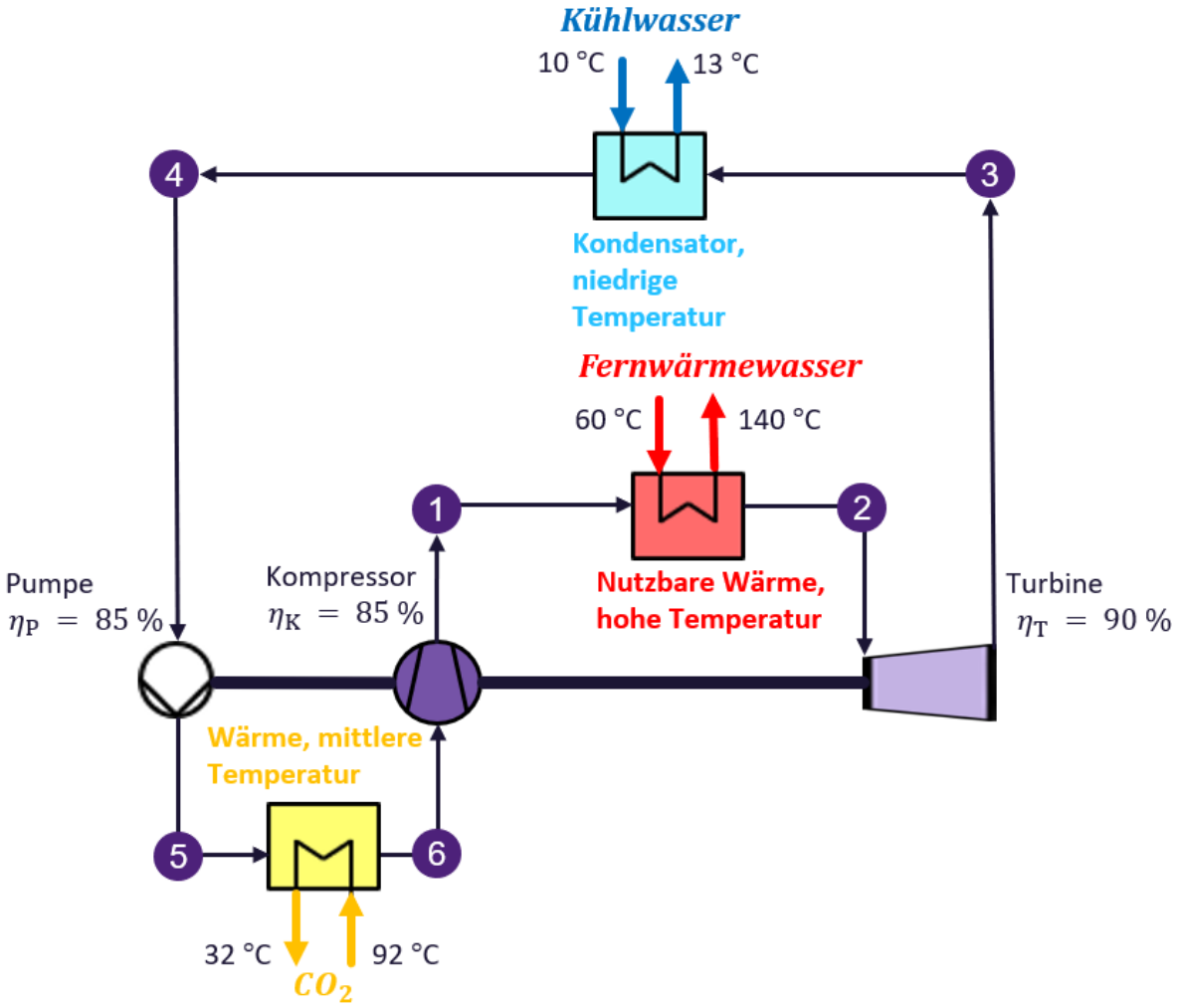

Abbildung 6: Turbo Wärmetransformer

Das T-s Diagramm des Kreisprozesses veranschaulicht die Thermodynamik des Turbo Wärmetransformers (siehe Abbildung 7). Von Punkt 1 nach Punkt 2 wird Wärme isobar an das Fernwärmewasser abgegeben (siehe Abbildung 6 und 7). Das Medium CO_2 wird von Punkt 2 nach Punkt 3 isentrop in der Turbine bis zur Taulinie entspannt. Das CO_2 beginnt an diesem Punkt zu kondensieren. Von Punkt 3 nach Punkt 4 kondensiert das Medium isobar und isotherm. Es gibt dabei Kondensationswärme an das Kühlwasser im Kondensator ab. Von der Siedelinie aus erhöht die Pumpe zwischen

Punkt 4 und 5 den Druck im Kreislauf isentrop. Auf einem höheren Druckniveau nimmt das Medium des Turbo Wärmetransformers von Punkt 5 nach Punkt 6 Wärme isobar von dem geothermischen Kreislauf auf. Das mittlere Temperaturniveau wird mit einem Kompressor von Punkt 6 nach Punkt 1 auf die für Fernwärme nötige Temperatur erhöht.

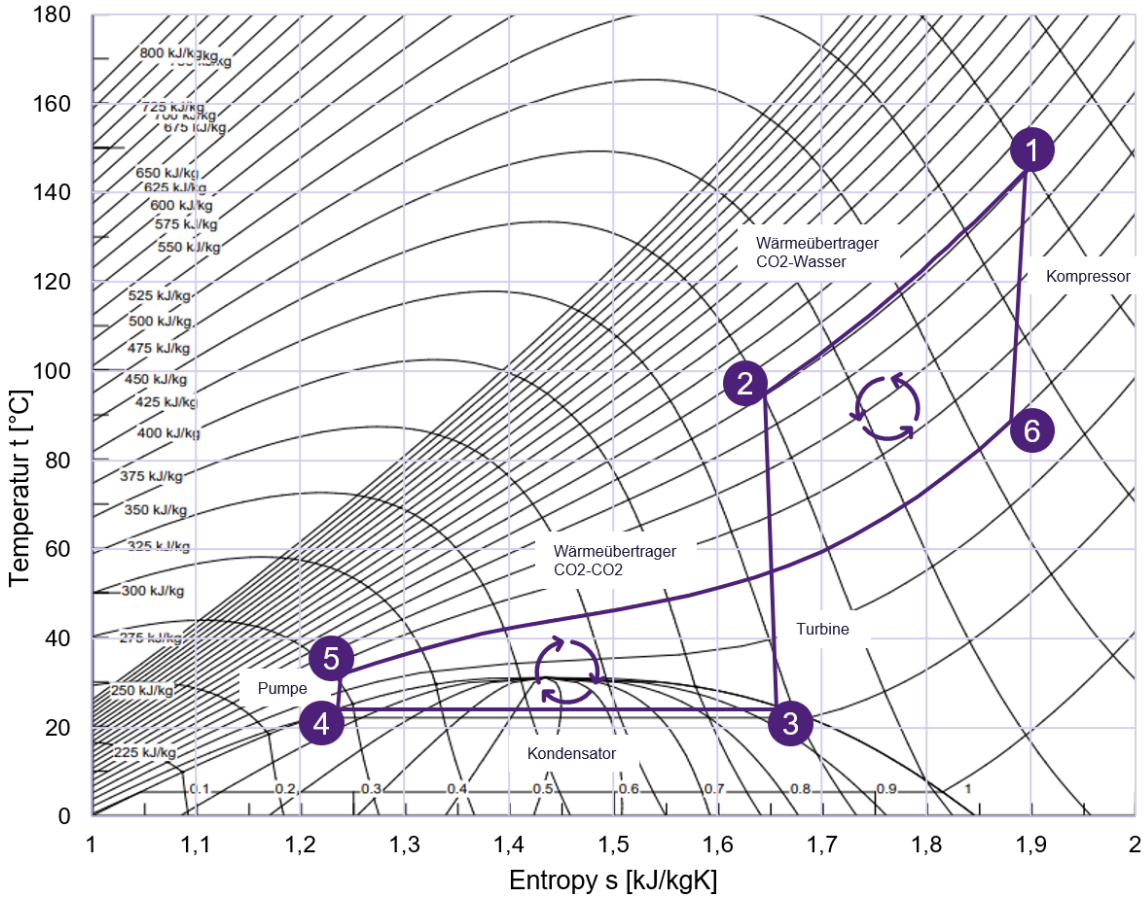

Abbildung 7: T-s Diagramm Turbo Wärmetransformer

Das T-s Diagramm des Kreislaufs besteht aus zwei kleineren Kreisläufen mit entgegengesetztem Drehsinn (siehe Abbildung 7). Dieser sagt aus, ob im System Arbeit aufgenommen oder abgegeben wird. Die Fläche eines Kreisprozesses beschreibt die Arbeit, welche im System verrichtet wurde. Wenn die Flächen dieselbe Größe haben, ist die aufgenommene und verrichtete Arbeit in Summe gleich null. Es wird keine elektrische Leistung aufgenommen oder abgegeben. Die Effizienz η_{TW} des Turbo Wärmetransformers wird mithilfe des Verhältnisses aus abgeführter Wärme $\dot{Q}_{\mathrm{ab}}$ und der nutzbaren Wärme $\dot{Q}_{\mathrm{nutz}}$ bestimmt.

$$\eta_{\mathrm{TW}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{ab}}}{\dot{Q}_{\mathrm{nutz}}} \tag{3-2}$$

Bei einer Temperaturerhöhung von ≈ 50 K ist eine Effizienz von ≈ 0,1 - 0,3 zu erwarten. (Shandilya, 24)

4 Thermodynamische Analyse und Konzeptvergleich

Die betrachteten Kraftwerksdesigns werden hinsichtlich Fernwärme optimiert. Hierbei wird sich für die Vergleichbarkeit der Wärmeträgermedien auf Randbedingungen eines Geothermischen Reservoirs in Kroatien festgelegt. Es wird eine Reservoir-Tiefe von 3200 m und eine Permeabilität von 71 mD angenommen. Des Weiteren beträgt der Druck im Reservoir 327 bar und die Temperatur 148 °C. Außerdem wird von jeweils einer Produktions- und Injektionsbohrung ausgegangen. Das Fernwärmenetz soll Wärme mit einer Temperatur von 140 °C liefern, und das zu erwärmende Fernwärmewasser hat eine Temperatur von 60 °C.

Der Marktpreis von Wärme und Leistung entscheidet, ob ein geothermisches Reservoir hinsichtlich Nutzung von Wärme oder elektrischer Leistung optimiert wird. Am Markt ist der Preis für Strom um ein dreifache höher als dieselbe Leistung als Wärme. Aufgrund dessen wird in der folgenden Arbeit die Energiemenge vereinfacht mit folgender Formel bilanziert. (Zackariat 25, S.25)

$$Korrigierte\ Wärme\ = \dot{Q}_{\mathrm{nutz}} + 3 \cdot P \tag{4-1}$$

Die korrigierte Wärme ist eine „ökonomische Hilfsgröße“, welche keine thermodynamische Aussagekraft hat.

Für den Vergleich der Wärmeträgermedien werden Vereinfachungen angenommen. Eine Erschöpfung der Wärmequelle und Komplikationen durch eine Versalzung der Anlage werden nicht berücksichtigt. Außerdem werden höhere Instandhaltungskosten einer geothermischen Anlage aufgrund der hohen Korrosivität von Sole, insbesondere bei Temperaturen von über 100 °C, nicht berücksichtigt. (Herf 15)

Die Berechnungen für das Auslegen und Optimieren der verschiedenen Geothermischen Kraftwerksdesigns werden von dem Programm „KRAWAL“ durchgeführt. Dieses Programm ist von der Siemens AG zur Simulation und thermodynamischen Berechnung von Dampfkraftwerken entwickelt worden. Diverse technische Bauteile lassen sich abhängig von ihren Eigenschaften wie Wirkungsgrad in einem zusammenhängenden System darstellen.

Das Programm KRAWAL greift auf die Datenbank des Programms Refprop (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database) zu. Diese wurde vom US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelt und beinhaltet die physikalischen Eigenschaften von Stoffen abhängig von den Umgebungsbedingungen. Die Ergebnisse von stoffabhängigen Berechnungen in den

von KRAWAL modellierten Bauteilen lassen sich über eine Schnittstelle in Microsoft Excel darstellen.

Für die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen geothermischen Kreisläufen und Wärmeträgermedien ist es wichtig, bei der Simulation technischer Bauteile dieselben Randbedingungen anzunehmen. Für Wärmeübertrager wird vereinfacht ein Druckverlust von 1 % zwischen Eingang und Ausgang festgelegt. Außerdem werden für die Temperaturübertragung Temperaturdifferenzen von 5 K zwischen den Massenströmen angenommen (siehe Abbildung 8). Diese Differenz wird auch „Grädigkeit“ bezeichnet. Sie definiert die vom ersten Wärmeträgermedium übertragbare Temperatur und die resultierende Rückkühlung.

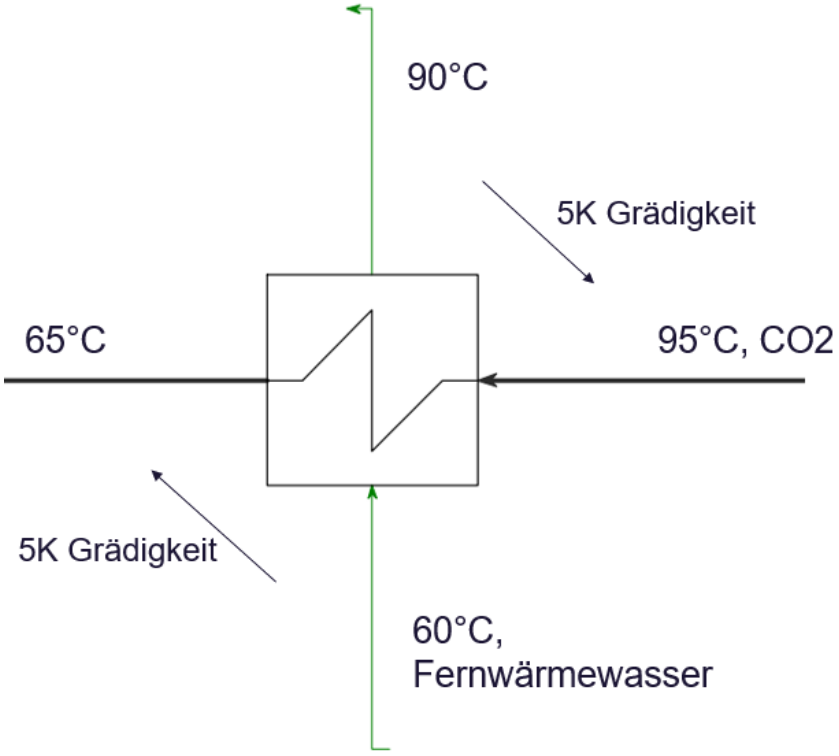

Abbildung 8: Wärmetauscher mit Grädigkeiten

Für Pumpen und Kompressoren wird ein Wirkungsgrad von 85 %, und für Turbinen ein Wirkungsgrad von 90 % angenommen. Die Drehzahl der Turbomaschinen beträgt aufgrund der Frequenz im Stromnetz 3000 $\frac{1}{min}$.

4.1 Sole Kreislauf

Für den Vergleich der Wärmeträgermedien müssen geothermische Kraftwerkskonzepte entwickelt werden, welche die Randbedingungen optimal

ausnutzen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auslegung eines hinsichtlich Fernwärmeauskopplung optimierten geothermischen Kraftwerkes mit dem Wärmeträger Sole.

4.1.1 Modellierung des geothermischen Kreislaufes

Für die Wärmeauskopplung wird ein Wärmeübertrager zwischen der Injektionsbohrung und der Produktionsbohrung verwendet (siehe Abbildung 9). Dieser überträgt den Wärmestrom des Wärmeträgers Sole an das Fernwärmewasser. Das Wasser im Fernwärmekreislauf wird mit einer Temperatur am Zulauf des Wärmeübertragers von 60 °C und einem Rücklauftemperatur von 140 °C angenommen. Des Weiteren wird ein Druck von 5 bar auf der Leitung angenommen. Dieser verhindert einen Wechsel des Aggregatzustandes bei der Übertragung einer Temperatur von 140 °C.

Die Pumpe im Kreislauf ist nötig, um die Sole in das Reservoir zurückzuführen (siehe Abbildung 9). Ohne die Verwendung einer Pumpe und der daraus folgenden Druckerhöhung wäre der Thermosiphoneffekt nicht stark genug, das Wärmeträgermedium zirkulieren zu lassen. Die Druckerhöhung durch die Pumpe muss in einigen hundert Metern Tiefe erfolgen. Bei Verwendung der Pumpe nach dem Ausgang der Produktionsbohrung oder vor der Reinjektion des Mediums entstehen aufgrund des erzeugten Unterdruckes bei der Zuleitung „Dampfbläschen“ im Medium. Diese beschädigen die Pumpe stark, was auch als Kavitation bezeichnet wird. Beim Betrieb der Pumpe unter der Erdoberfläche verhindert der hydrostatische Druck das Sieden der Sole, was die Kavitation verhindert. Die Tiefe der Pumpe hat dabei keinen Einfluss auf die Thermodynamik des Kraftwerkes. Mit einer größeren Pumpenleistung sind auch höhere Massenströme umsetzbar, was wiederum den nutzbaren Wärmestrom für die Wärmeauskopplung erhöht.

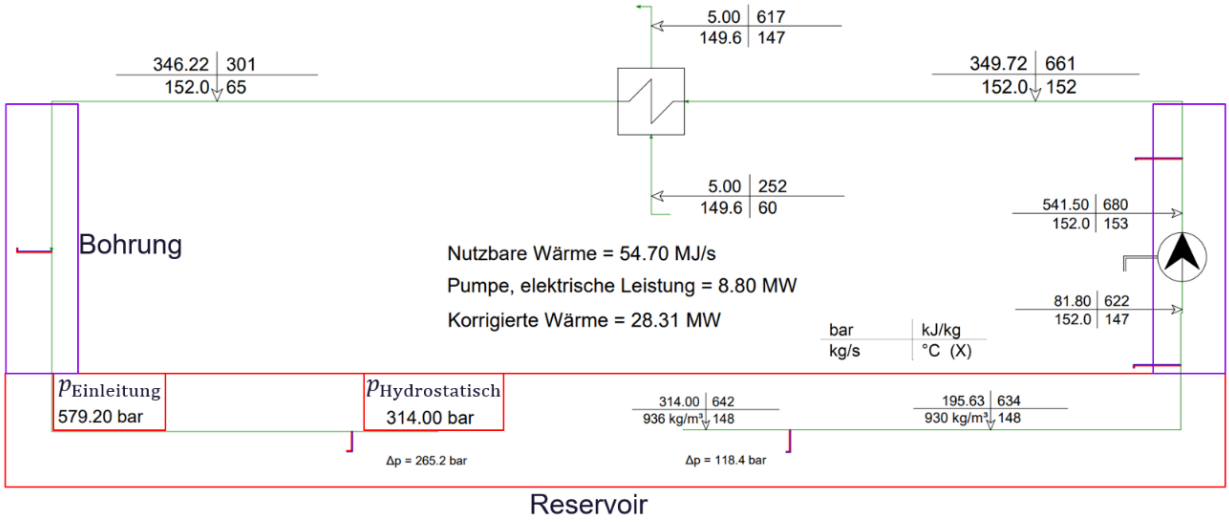

Abbildung 9: Wärmeschaltplan Sole

Auf der Abbildung 9 ist der Wärmeschaltplan eines geothermischen Kraftwerkes dargestellt, welcher hinsichtlich der betrachteten Randbedingungen für Fernwärmeauskopplung erstellt wurde. Der geothermische Kreislauf wird hinsichtlich des Massenstroms optimiert.

4.1.2 Stimulation des Gesteins

Wenn ein Fluid mit hohem Druck in die Injektionsbohrung geleitet wird, kann das Gestein stimuliert werden. Es bilden sich dann meist senkrecht zur Bohrung Risse aus, was seismische Aktivitäten zur Folge haben kann und beim Betrieb eines geothermischen Kraftwerkes nicht erwünscht ist. Die Abbildung 10 stellt abhängig von der Tiefe dar, wie hoch der maximale Einleitungsdruck in der Injektionsbohrung angenommen werden kann, bevor das Gestein stimuliert wird. Der maximale Einleitungsdruck wird für diverse Randbedingungen konservativ interpoliert.

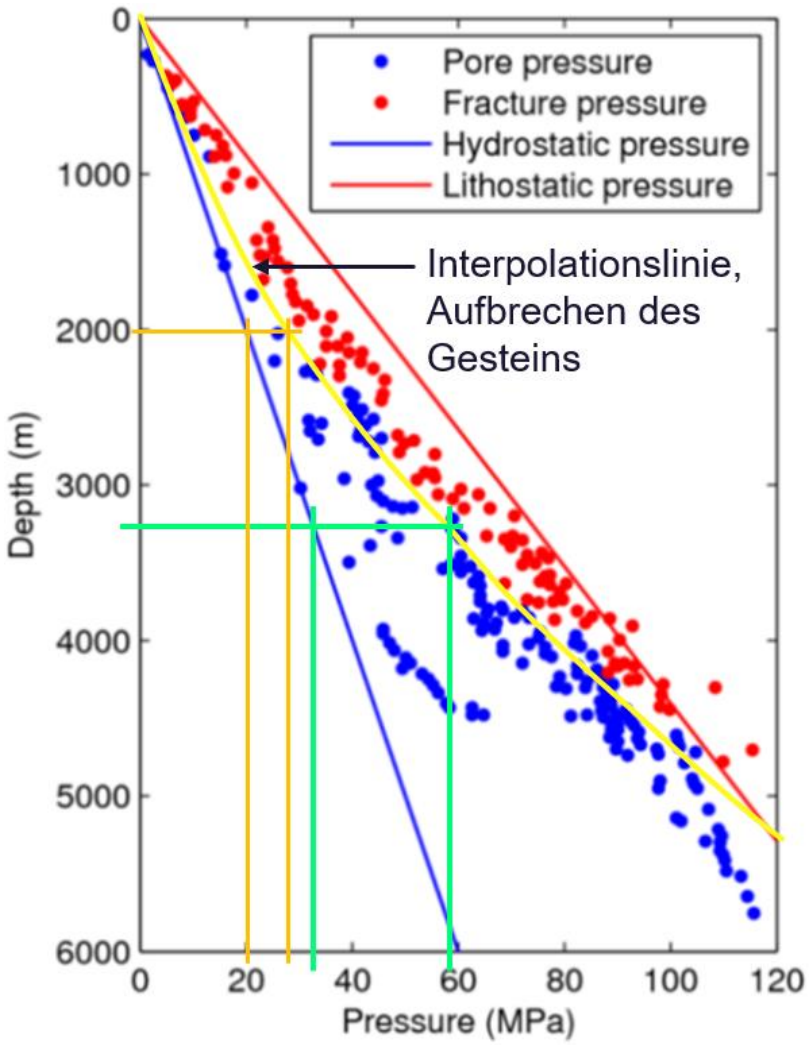

Abbildung 10: Stimulationsdruck (Gaaren 93, S.1305)

Der maximale Einleitungsdruck im Verhältnis zum hydrostatischen Druck ist bei geringeren Tiefen ebenfalls geringer. Dieses Verhältnis wird nach Abbildung 10 für die Tiefen 3200 m und 2000 m berechnet.

3200 m Tiefe:

$$\frac{p_{\text{Einleitung}}}{p_{\text{Hydrostatisch}}} \approx \frac{57\ bar}{31\ bar} = 1{,}84 \qquad (4\text{-}2)$$

2000 m Tiefe:

$$\frac{p_{Einleitung}}{p_{Hydrostatisch}} \approx \frac{28\ bar}{20\ bar} = 1{,}4$$

Bei der Auslegung eines geothermischen Kraftwerkes muss dieses Verhältnis berücksichtigt werden. Bei höheren Einführungsdrücken sind höhere Massenströme realisierbar, was ebenfalls die Wirtschaftlichkeit eines geothermischen Kraftwerkes erhöhen kann. Der nötige Einführungsdruck mit dem Wärmeträger CO_2 ist aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Fluids signifikant niedriger als bei dem

Wärmeträger Sole. Wenn sich der maximale Einführungsdruck negativ auf die nutzbare Wärme eines geothermischen Solekreislaufes auswirkt, kann angenommen werden, dass das Medium CO_2 bei einem Reservoir mit geringen Tiefen im Vergleich zu Sole mehr Wärme nutzbar macht.

4.1.3 Berücksichtigung des Salzgehaltes

Das geothermische Wasser, welches für die Leistungserzeugung in einem Geothermiekraftwerk an die Oberfläche befördert wird, löst beim Durchfließen des Reservoirs Salze. Diese können dort aufgrund natürlichen Ursprungs vorhanden sein und haben einen Einfluss auf die nutzbare Leistung des Kraftwerkes. Der Salzgehalt im Wasser wird auch als Salinität bezeichnet. Diese kann als Massenanteil oder in Prozent angegeben werden. Die Salinität eines Geothermiekraftwerkes hängt von dem verwendeten Reservoir ab. Das geothermische Wasser kann salzfrei, oder sehr salzhaltig sein.

Eigenschaften des Reservoirs und des Wärmeträgermediums werden mit dem Darcy-Gesetz verbunden (4-3). Die Druckdifferenz Δp beschreibt den Druckverlust des Mediums beim Durchströmen eines geothermischen Reservoirs. Dieser ist abhängig von dem Massenstrom $\dot{m}$, der Länge des Reservoirs L, dem Strömungsquerschnitt im Reservoir A, der Permeabilität κ, der dynamischen Viskosität μ und der Dichte ρ des Mediums. (Stob 10)

$$\Delta p = \left(\frac{\mu \cdot L \cdot \dot{m}}{\rho \cdot A \cdot \kappa}\right) \tag{4-3}$$

Der Salzgehalt im Wasser erhöht die dynamische Viskosität und die Dichte. Das Programm KRAWAL kann keinen Salzgehalt im Wasser nachbilden. Die erhöhte Viskosität und Dichte Aufgrund des Salzgehaltes kann über eine Verringerung der Permeabilität dargestellt werden. (nach Jodocy 11)

Die spezifische Wärmekapazität c_p eines Stoffes beschreibt die Wärmemenge, welche die Temperatur von einem Kilogramm eines Stoffes um ein Kelvin erhöht. Wenn bei Sole der Salzgehalt steigt, verringert sich die spezifische Wärmekapazität signifikant. Der c_p Wert für eine bei Raumtemperatur gesättigte Lösung ist um 28,4 % geringer als der von reinem Wasser (Lös. NaCl). Der Wärmestrom, welcher durch das Wärmeträgermedium an die Oberfläche transportiert wird, ist von der Wärmekapazität,

dem Massenstrom und der Temperaturdifferenz abhängig, und somit auch um 28,4 % geringer.

$$\dot{Q} = c_{\mathrm{p}} \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \tag{4-3}$$

Für eine gesättigte Lösung bei Raumtemperatur:

$$c_{\mathrm{pWasser}} = c_{\mathrm{pSole}} \cdot 0{,}716$$

$$\dot{Q_{\mathrm{W}}} = \dot{Q_{\mathrm{S}}} \cdot 0{,}716$$

Die Menge an Salz, welches in Wasser gelöst werden kann, ist von der Temperatur des Wassers abhängig (siehe Abbildung 11). (Hansper 18, S. 51)

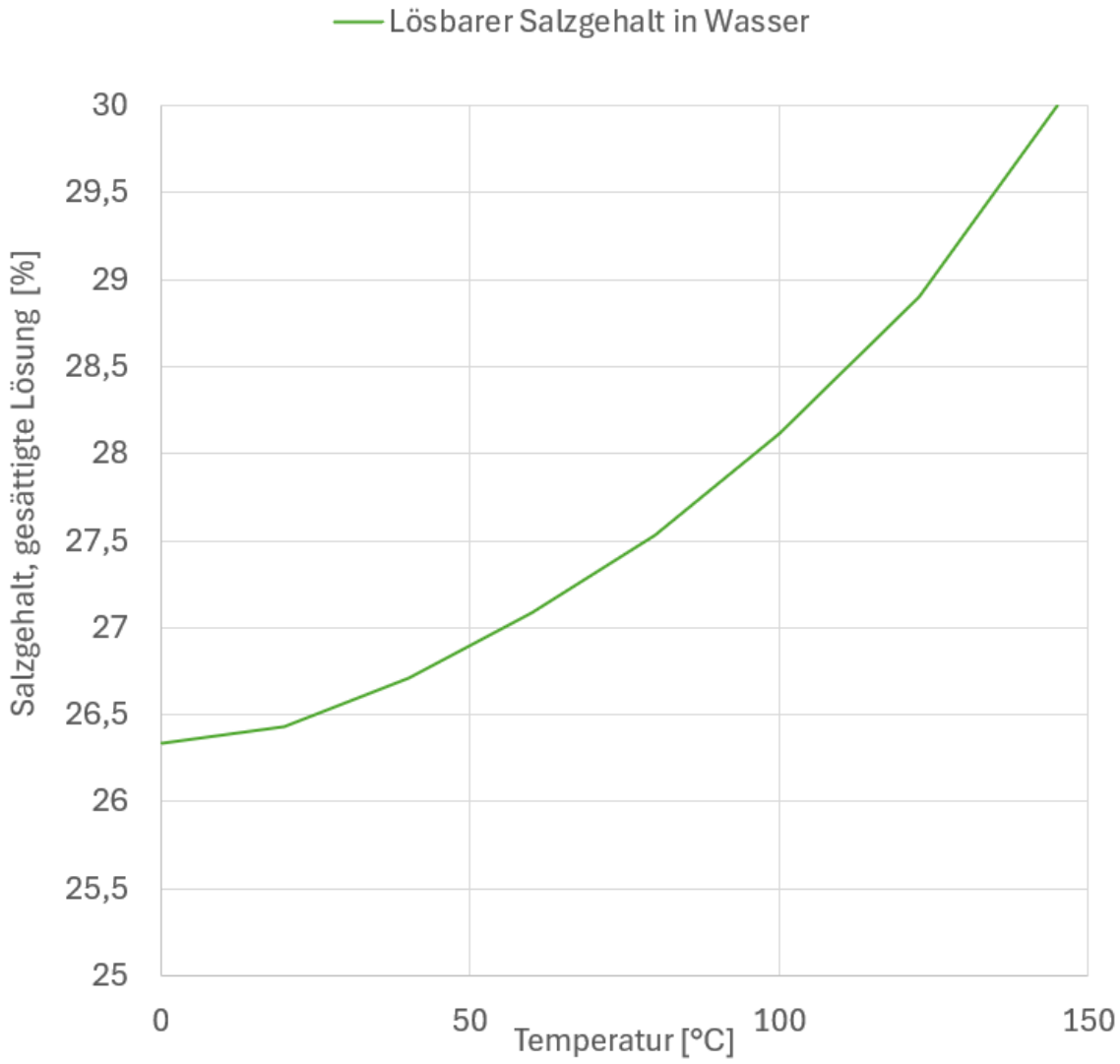

Abbildung 11: Sole, Sättigung abhängig von der Temperatur

Bei dem Umgebungsdruck von ≈ 1 bar geht Wasser ab einer Temperatur von 100 °C in den gasförmigen Zustand über. Bei Geothermiekraftwerken mit Wasser als Wärmeträgermedium kann dieses aufgrund eines höheren Druckes ein höheres Temperaturniveau erreichen, ohne den Aggregatzustand zu wechseln. Somit kann bei

einer Temperatur von 145 °C ein Salzgehalt von ≈ 30 % im Medium vorhanden sein. Sole mit einer Salinität von 30 % kann ≈ 32,7 % weniger Wärme übertragen als reines Wasser (siehe Abbildung 12).

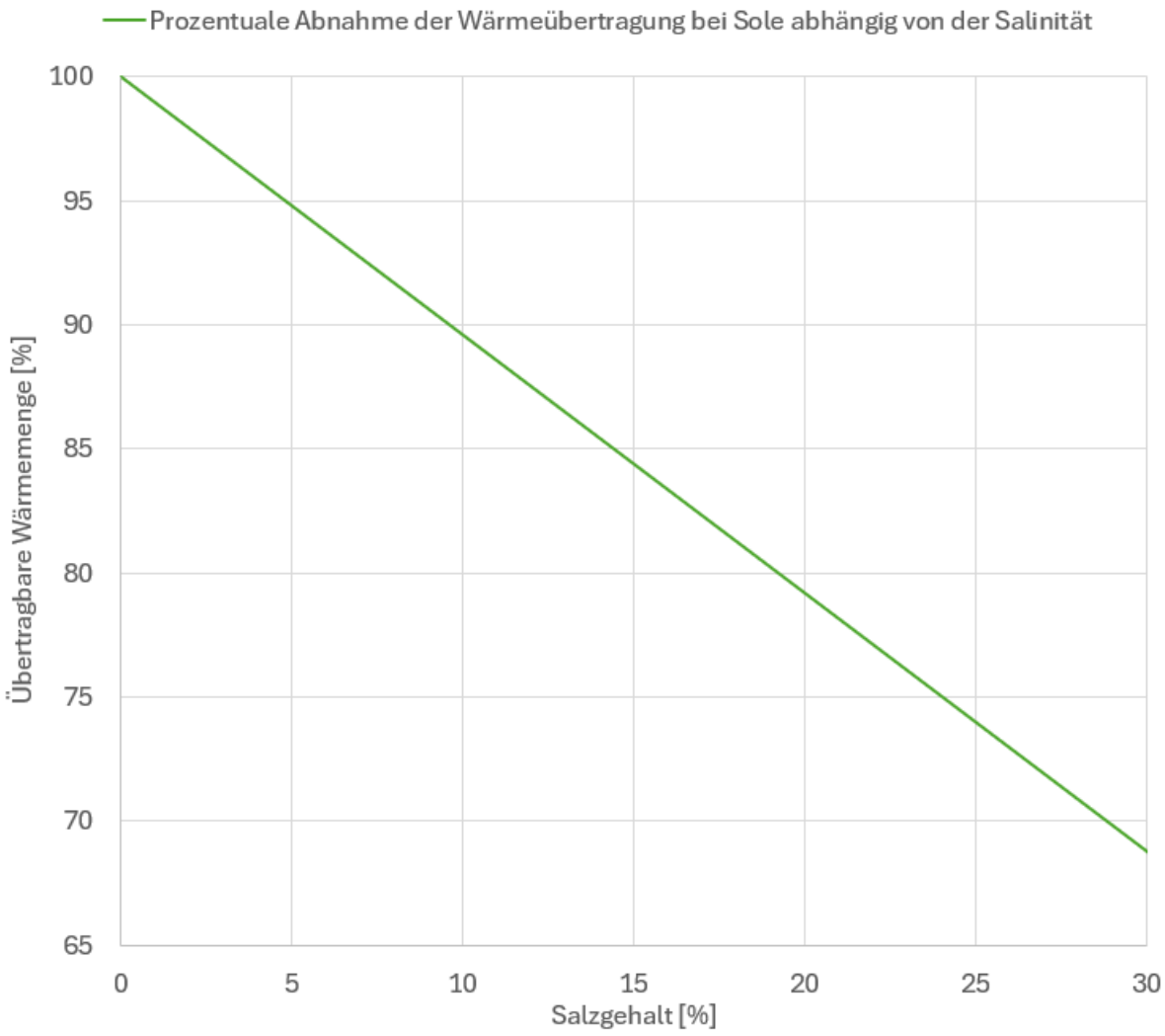

Abbildung 12: Wärmestrom abhängig vom Salzgehalt

Dieser Sachverhalt wird in den Berechnungen (Kapitel 4) berücksichtigt.

4.1.4 Untersuchung einer weiteren Wärmesenke

Um die nutzbare Leistung in einem geothermischen Kraftwerk zu maximieren, muss ebenfalls der Thermosiphoneffekt optimiert werden. Es ist sinnvoll zu untersuchen, ob die Entnahme von Wärme hinter der Fernwärmeauskopplung einen positiven Einfluss auf den Thermosiphoneffekt hat.

Die Sole hat nach der Wärmeauskopplung eine Temperatur von 65 °C. Diese wird auf 15 °C vor der Injektionsbohrung runtergekühlt. Die Temperaturdifferenz beträgt somit

50 K. Für die Kühlung wird hier ein Fluss mit einer Temperatur von 10 °C angenommen, welcher Kühlwasser mit flexiblem Massenstrom ohne anfallende Kosten liefert.

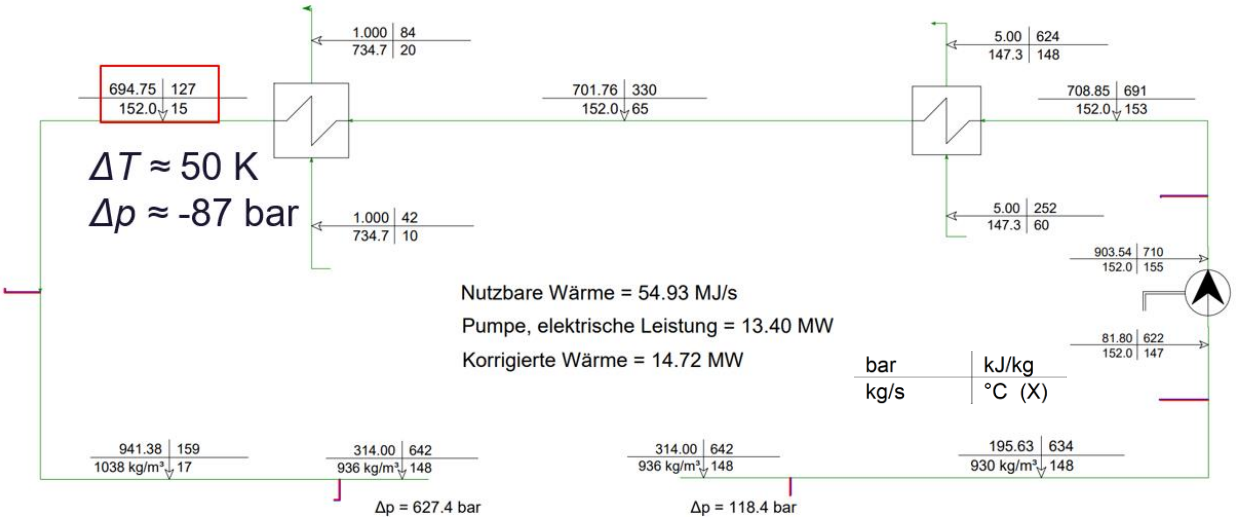

Abbildung 13: Wärmeschaltplan Sole mit Kühler

Das Runterkühlen der Sole hinter der Wärmeauskopplung für Fernwärme hat bei jedem umsetzbaren Massenstrom einen negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkes. Der Grund ist die steigende Leistungsaufnahme der Pumpe. Bei geringerer Temperatur der Sole vor der Injektionsbohrung ist mehr Druck nötig, um das Medium in das Reservoir zu pumpen. Der Grund ist die Viskosität von Sole, welche schon bei einer Temperaturdifferenz von -50 K signifikant ansteigt. (siehe Abbildung 14).

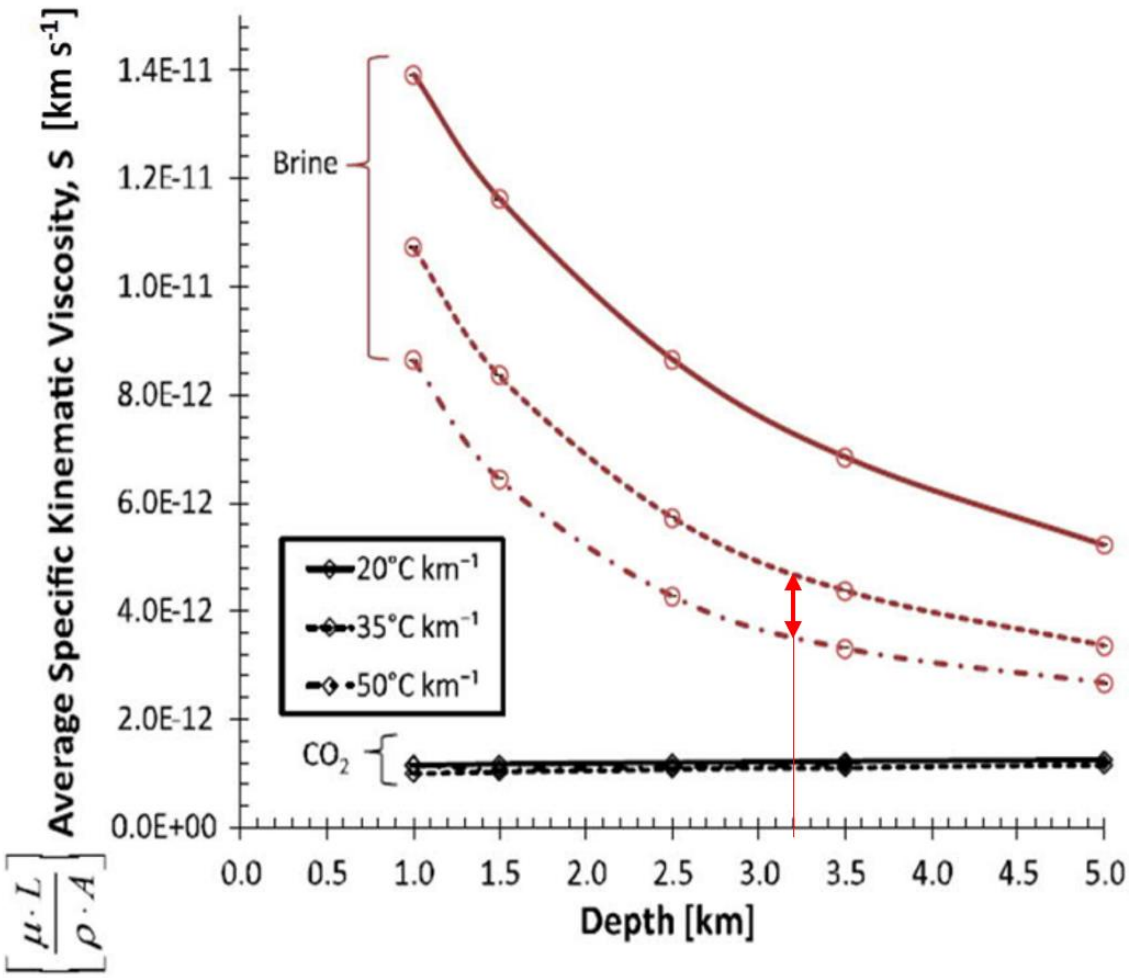

Abbildung 14: Kinematische Viskosität von Sole und sCO2 (Adam 14b, S.368)

Zwischen den Kurven für den Temperaturgradienten von 35 °C / km und 50 °C / km ist exemplarisch die Änderung der kinematischen Viskosität bei einer Temperaturdifferenz von ≈ 50 °C in 3200 m Tiefe dargestellt. Die Differenz ist signifikant. Der negative Effekt der Viskosität begründet nicht den höheren übertragbaren Wärmestrom aufgrund der höheren Dichte bei geringeren Temperaturen. Ebenfalls ist aufgrund der Berechnungen keine Verstärkung des Thermosiphoneffektes zu erkennen (siehe Abbildung 13). Das Ableiten von Wärme im Rahmen eines Unterkühlers zwischen dem Wärmetauscher für Fernwärmeauskopplung und der Injektionsbohrung ist nicht sinnvoll

4.1.5 Nutzbare Wärmemenge mit Sole als Wärmeträgermedium

Für die Optimierung des geothermischen Kreislaufes in Kapitel 4.1 wird der Wärmestrom für die Fernwärmeauskopplung und die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe in Abhängigkeit des Massenstroms berechnet und dargestellt. Ebenfalls wird die „Korrigierte Wärme“ (nach 3-1) als degressive Kurve abgebildet, welche ein

wirtschaftliches Optimum bei ihrem Maximum darstellt. Der Massenstrom bei diesem Optimum wird für weitere Vergleiche herangezogen.

Weil der Salzgehalt in geothermischen Kraftwerken sehr unterschiedlich ist, werden die Berechnungen für verschiedenen Salzgehalte durchgeführt. Es werden Diagramme für eine Salinität von 0%, von 15% und von 30% durchgeführt.

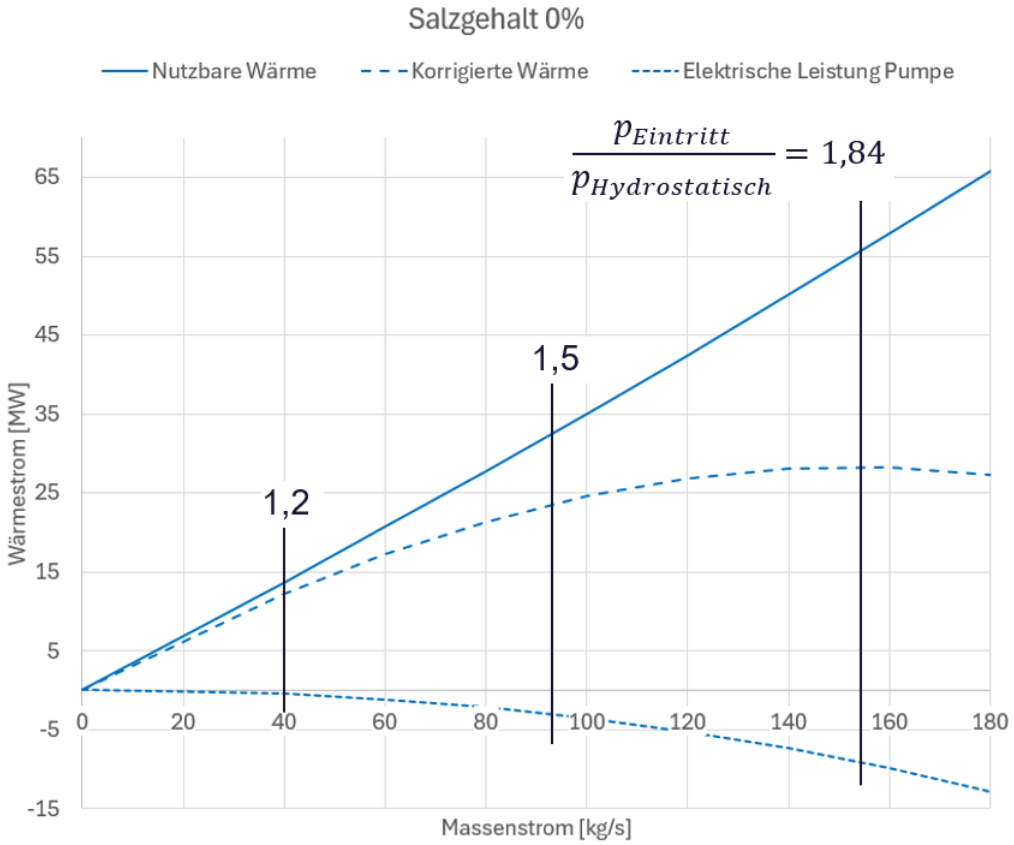

Abbildung 15: Auswertung Sole Kreislauf, 0 % Salinität

Die nutzbare Wärmemenge steigt linear mit dem Massenstrom an. Der negative Wert der elektrischen Leistungsaufnahme der Pumpe steigt bei steigendem Massenstrom polynominell an.

Aufgrund der Formel zur Berechnung der korrigierten Wärme (3-1) ist bei einer Salinität von 0 % (siehe Abbildung 15) für einen Massenstrom von ≈ 155 kg/s ein wirtschaftliches Optimum zu erkennen. Hinsichtlich Betriebskosten verspricht der Betrieb des Kraftwerkes bei diesem Massenstrom den höchsten finanziellen Gewinn. Beim optimalen Massenstrom von 155 kg/s wird eine Wärmemenge von ≈ 55 MJ/s nutzbar. Die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe beträgt an dem Punkt ≈ 9 MW. Das Verhältnis von Einleitungsdruck zu hydrostatischem Druck liegt an diesem Punkt bei 1,84. Der Massenstrom ist nach Kapitel 4.1.2 umsetzbar, ohne das Gestein zu stimulieren. Auf dem Diagramm ist ebenfalls dargestellt, wie sich die nutzbare Wärme,

die korrigierte Wärme und die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe bei den Druckverhältnissen 1,2 und 1,5 (4-3) verhält. Die Massenströme bei den Druckverhältnissen sind über die Druckerhöhung der Pumpe, der Tiefe des Reservoirs und dem umsetzbaren Massenstrom bei gegebener elektrischen Leistungsaufnahme der Pumpe berechenbar.

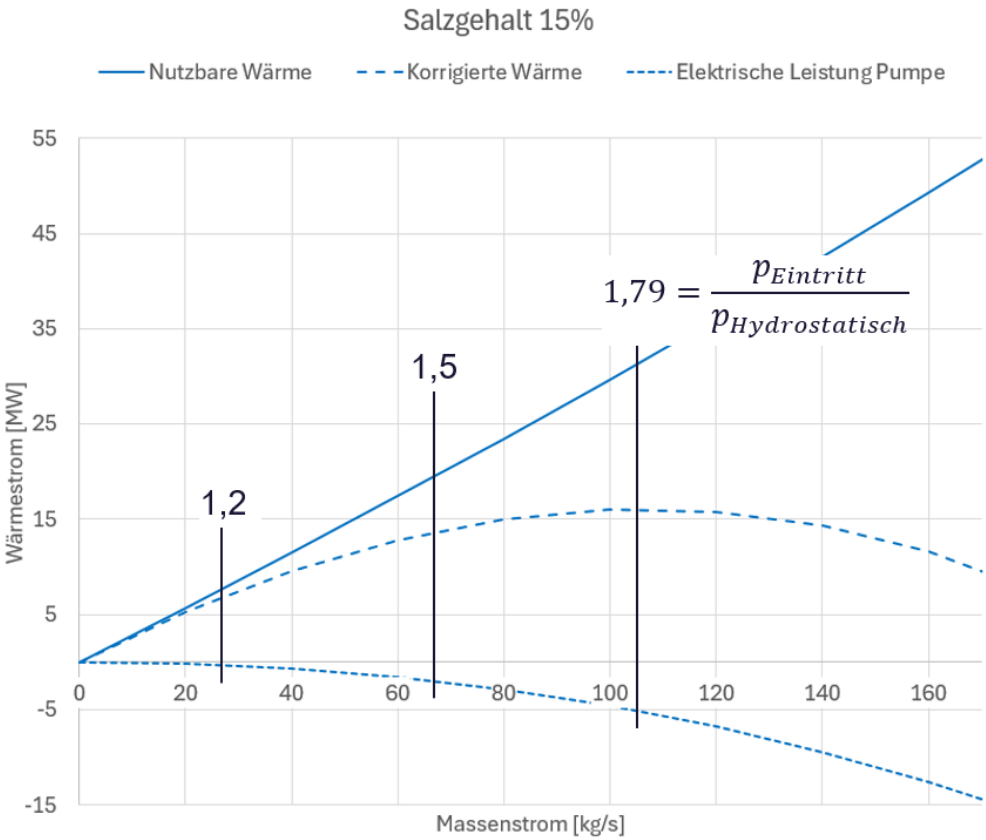

Abbildung 16: Auswertung Sole Kreislauf, 15 % Salinität

Bei einer Salinität von 15 % (siehe Abbildung 16) sinkt die Steigung der dargestellten Funktionen. Der optimale Massenstrom liegt hier bei 105 kg/s. Dieser macht 31,3 MJ/s nutzbar. Das Druckverhältnis (4-3) im wirtschaftlichen Optimum ist nach Kapitel 4.1.2 umsetzbar, ohne das Gestein zu stimulieren. Der Einfluss von geringeren umsetzbaren Druckverhältnissen ist analog zu Abbildung 15 berechnet und dargestellt.

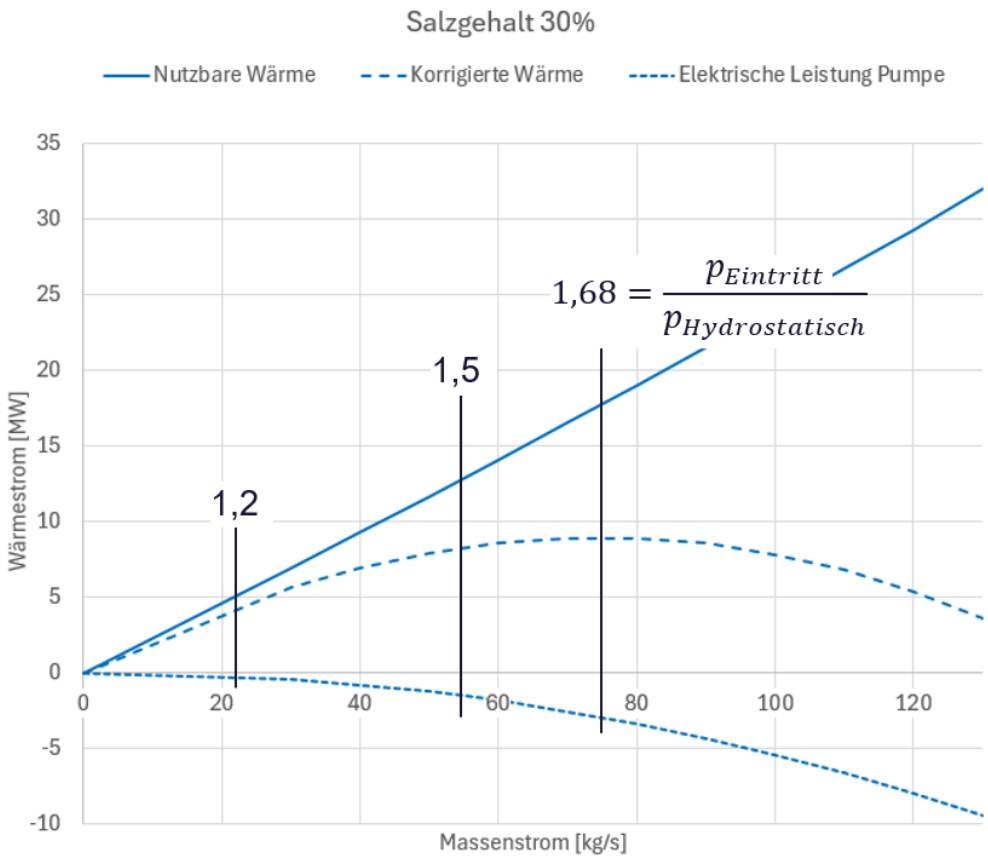

Abbildung 17: Auswertung Sole Kreislauf, 30 % Salinität

Bei einer Salinität von 30 % (siehe Abbildung 17) sinkt die Steigung der dargestellten Funktionen weiter. Der optimale Massenstrom liegt bei 75 kg/s. Dieser macht 17,8 MJ/s nutzbar. Das Druckverhältnis (4-3) im wirtschaftlichen Optimum ist nach Kapitel 4.1.2 umsetzbar, ohne das Gestein zu stimulieren. Der Einfluss von geringeren umsetzbaren Druckverhältnissen ist analog zu Abbildung 15 berechnet und dargestellt.

Der Einfluss des maximalen Einleitungsdrucks im Verhältnis zum hydrostatischen Druck und der Salinität auf den Wärmestrom kann der Abbildung 18 entnommen werden.

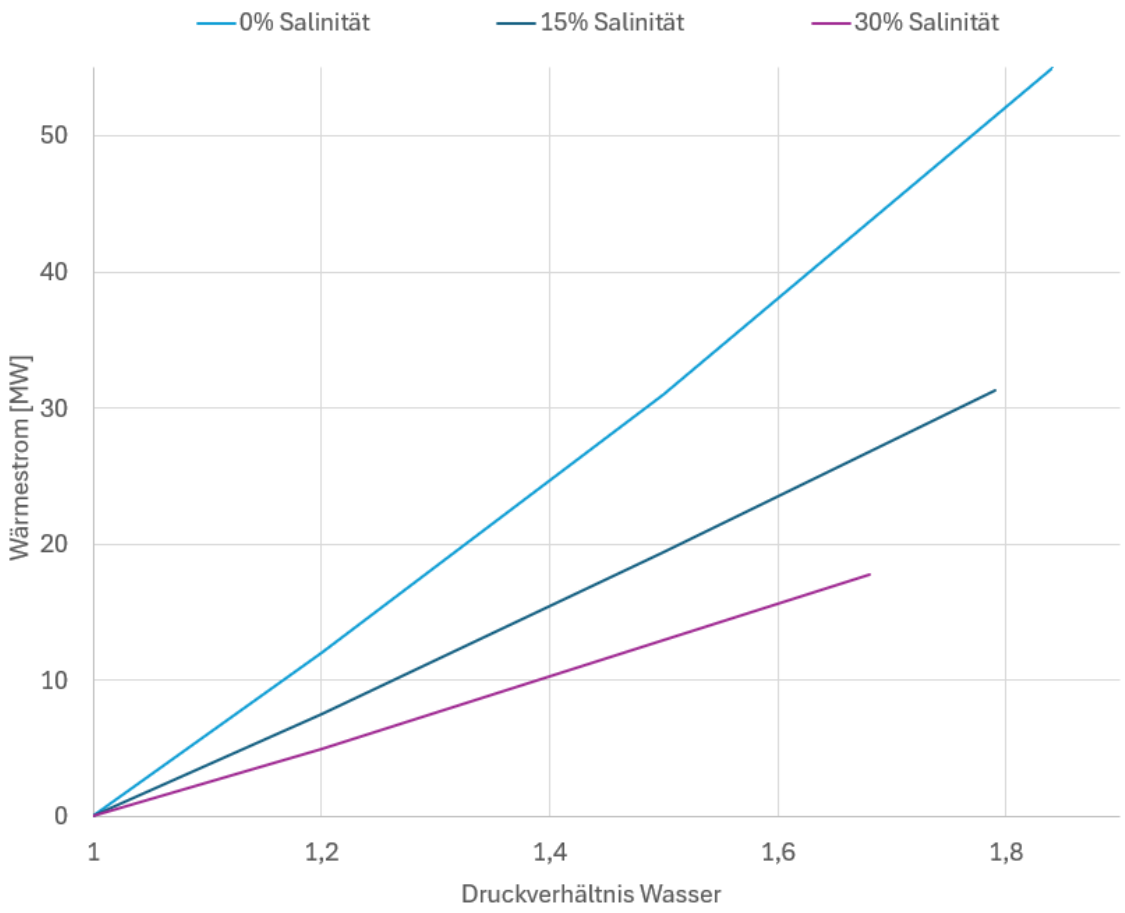

Abbildung 18: Einfluss des maximalen Einleitungsdrucks

Ein geringerer Stimulationsdruck und gelöstes Salz im Medium wirkt sich somit negativ auf den nutzbaren Wärmestrom aus. Die Werte des Diagramms gelten nur für die betrachteten Randbedingungen des Reservoirs.

4.2 sCO_2-Kreislauf

Bei der Berechnung des geothermischen Kreislaufs mit CO_2 als Wärmeträgermedium wird der nutzbare Wärmestrom mithilfe von zwei Wärmeübertragern untersucht. Eine Pumpe ist im Gegensatz zum Solekreislauf aufgrund des starken Thermosiphon Effektes nicht nötig. Der Wärmeübertrager hinter der Produktionsbohrung überträgt die nutzbare Wärme aus dem geothermischen Kreislauf in den Fernwärmekreislauf. Eine Wärmesenke vor der Injektionsbohrung hat aufgrund der stark temperaturabhängigen Dichte von CO_2 einen positiven Einfluss auf den Thermosiphoneffekt.

Als Wärmesenke wird Flusswasser mit einer Temperatur von 10°C angenommen, welches auf 20 °C erwärmt wird. Der Wärmeübertrager kühlt das CO_2 somit aufgrund der Grädigkeit von 5K von 65°C auf 15°C runter. Aufgrund einer kälteren Rückführung in das geothermische Reservoir ist ein höherer Massenstrom und somit ein höherer Wärmestrom für die Wärmeauskopplung nutzbar. Es wird der geothermische Kreislauf in Abbildung 19 berechnet.

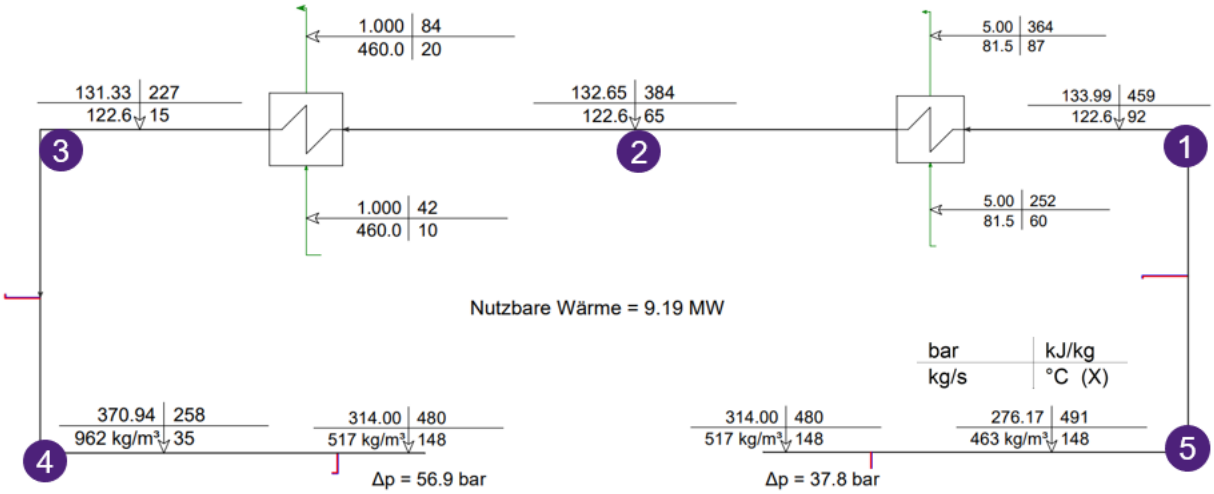

Abbildung 19: CO_2 Kreislauf

Die Darstellung des Kreislaufes in einem T-s Diagramm visualisiert die Thermodynamik des CO_2 im Geothermischen Kreislauf. Von Punkt 1 nach Punkt 2 wird die nutzbare Wärme isobar aus dem geothermischen Kreislauf ausgekoppelt (siehe Abbildung 19 und 20). Von Punkt 2 nach Punkt 3 wird die Temperatur des Mediums durch eine Kühlung mit Flusswasser isobar reduziert. Das Verhalten des CO_2 bei der Rückführung in das Reservoir ist von Punkt 3 nach Punkt 4 dargestellt. Sowohl der Druck als auch die Temperatur steigen an. Die Wärmeaufnahme im geothermischen Reservoir wird von Punkt 4 nach Punkt 5 dargestellt. Die Temperatur des Mediums nimmt unter Druckverlust die Temperatur des Reservoirs an. Von Punkt 5 nach Punkt 1

steigt das CO_2 wieder an die Oberfläche. Aufgrund des fehlenden hydrostatischen Drucks verringert sich der Druck auf das Medium. Daraus folgt eine Dekompression des CO_2, was wiederum die Temperatur des Gases verringert.

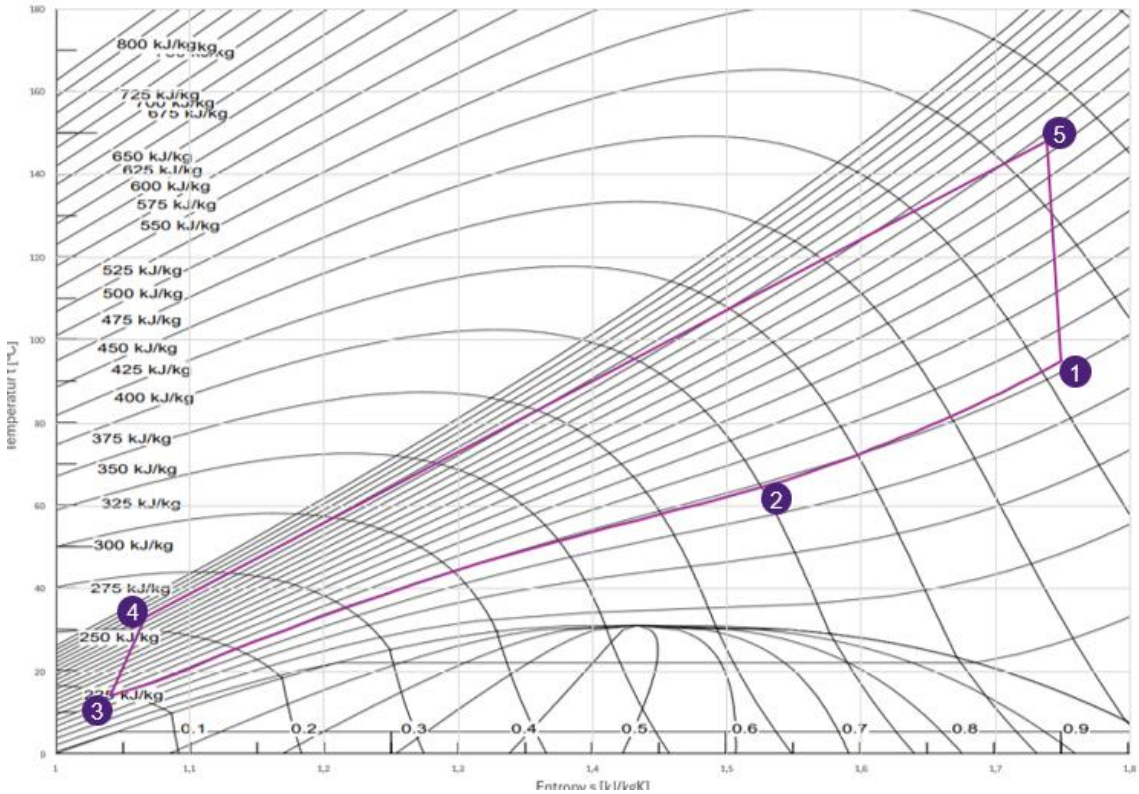

Abbildung 20: T-s Diagramm CO2 Kreislauf

Weil der Druck im Kreislauf aufgrund der fehlenden Turbomaschinen definiert ist, ergibt sich der Massenstrom. Dieser beträgt 121,4kg/s. Für die Untersuchung des Systems hinsichtlich maximal nutzbarer Wärme soll die Optimierung des Kreislaufes mit einem variablen Massenstrom durchgeführt werden. Das ist nur möglich, wenn bei einem Massenstrom < 121,4 kg/s eine Turbine, und bei einem Massenstrom > 121,4 kg/s eine Pumpe in den geothermischen Kreislauf integriert wird. Das erstellte Modell ist eine „Kraft-Wärme-Kopplung“, also ein thermodynamischer Kreislauf mit Wärmeströmen und Arbeitsströmen.

4.2.1 Pumpenkreislauf

Bei der Darstellung eines T-s Diagramms ist die elektrische Leistungsaufnahme einer Pumpe in einem Bereich mit geringerem Abstand zwischen den Isobaren ebenfalls geringer. Somit ist vor der Injektionsbohrung und hinter dem Unterkühler von Punkt 3 nach Punkt 4 die geringste elektrische Leistungsaufnahme für die Erhöhung des

Druckniveaus zu erwarten (siehe Abbildung 21). Der in Abbildung 22 zu sehende Wärmeschaltplan wird erstellt.

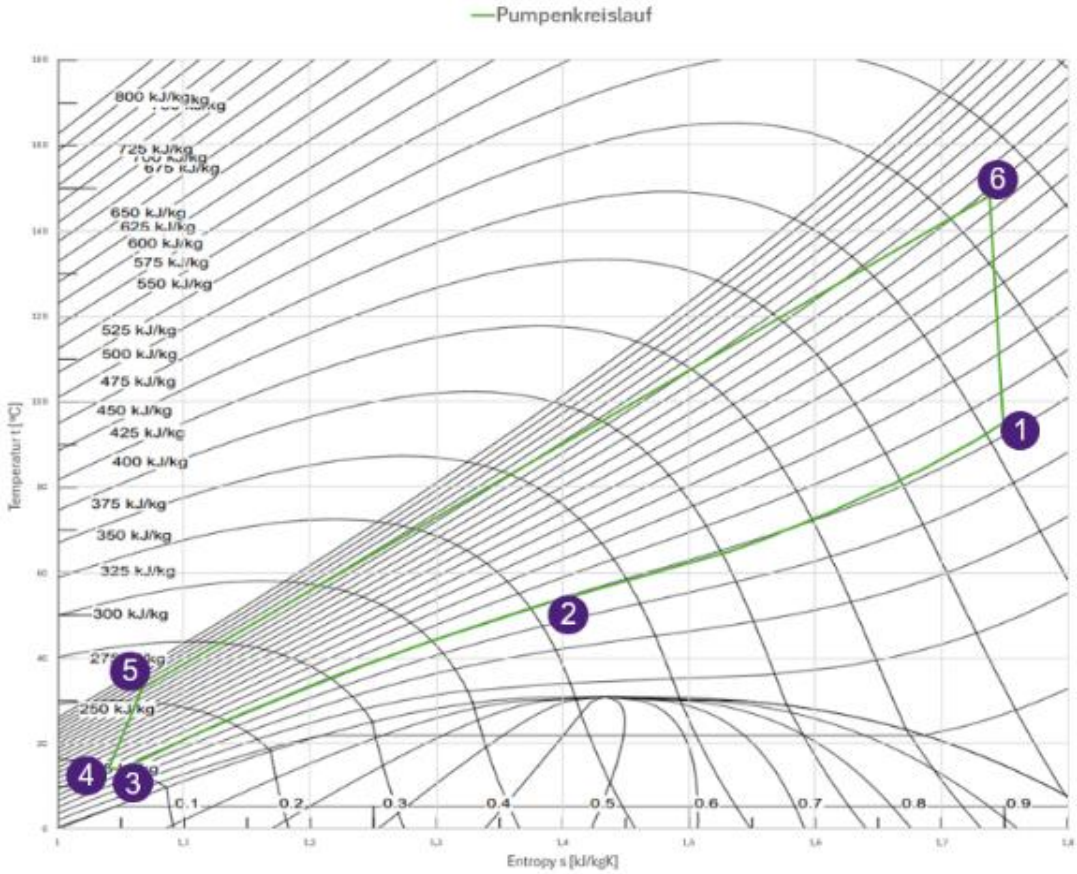

Abbildung 21: T-s Diagramm, CO2 Kreislauf mit Pumpe

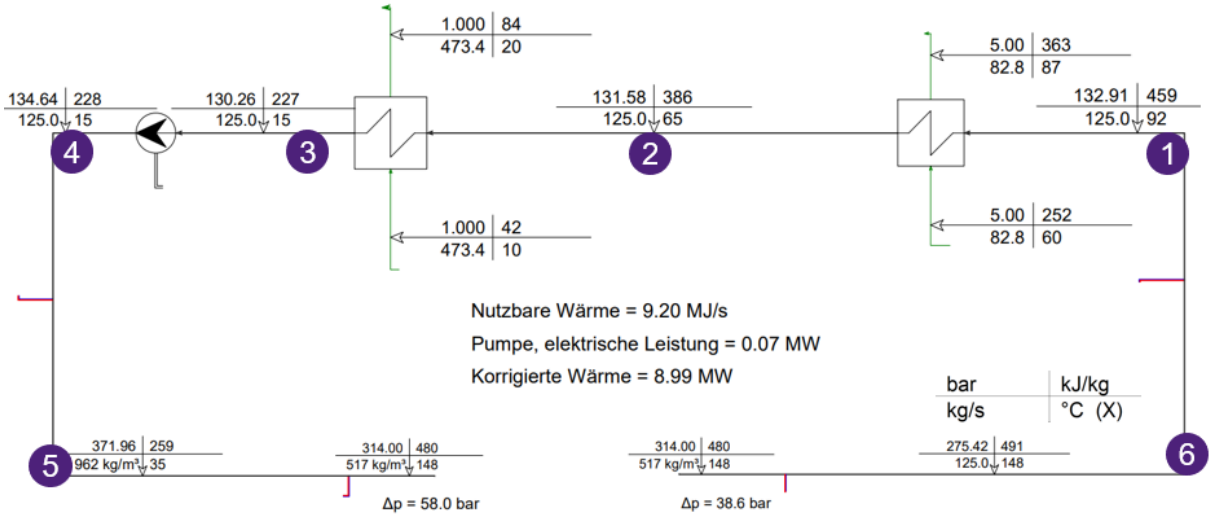

Abbildung 22: CO2 Kreislauf mit Pumpe

Für den Kreislauf wird die nutzbare Wärme hinsichtlich des umsetzbaren Massenstroms untersucht.

4.2.2 Turbinenkreislauf

Analog zum Pumpenkreislauf ist die elektrische Leistungsabgabe einer Turbine im Bereich des T-s Diagramms höher, wenn die Isobaren einen größeren Abstand zueinander haben. Um die Wärmeabgabe nicht negativ zu beeinflussen, wird die Turbine zwischen die Wärmeübertrager für die Fernwärme und den Kühler von Punkt 2 nach 3 platziert (siehe Abbildung 23). Der in Abbildung 24 zu sehende Wärmeschaltplan wird erstellt.

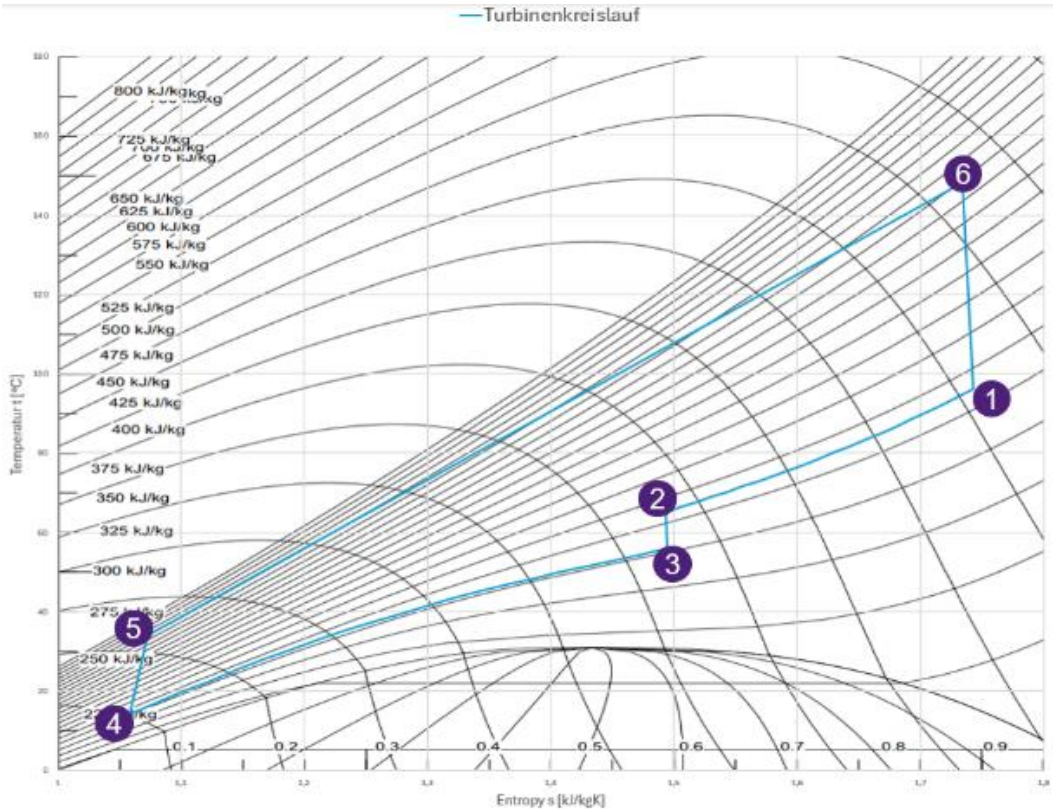

Abbildung 23: T-s Diagramm, CO2 Kreislauf mit Turbine

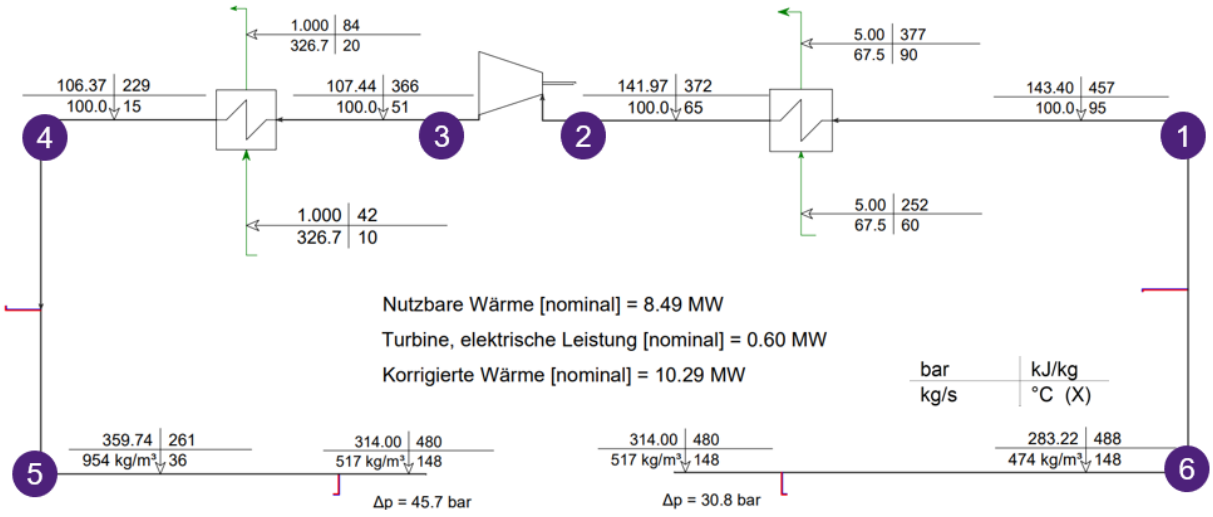

Abbildung 24: CO2 Kreislauf mit Turbine

Für den Kreislauf wird die nutzbare Wärme hinsichtlich des Massenstroms untersucht.

4.2.3 Nutzbare Wärmemenge mit CO_2 als Wärmeträgermedium

Bei Variation des Massenstroms in den erstellten Kreisläufen lässt sich die davon abhängige nutzbare Wärme und die Aufnahme oder Abgabe von elektrischer Leistung durch die Pumpe oder die Turbine beobachten (siehe Abbildung 25).

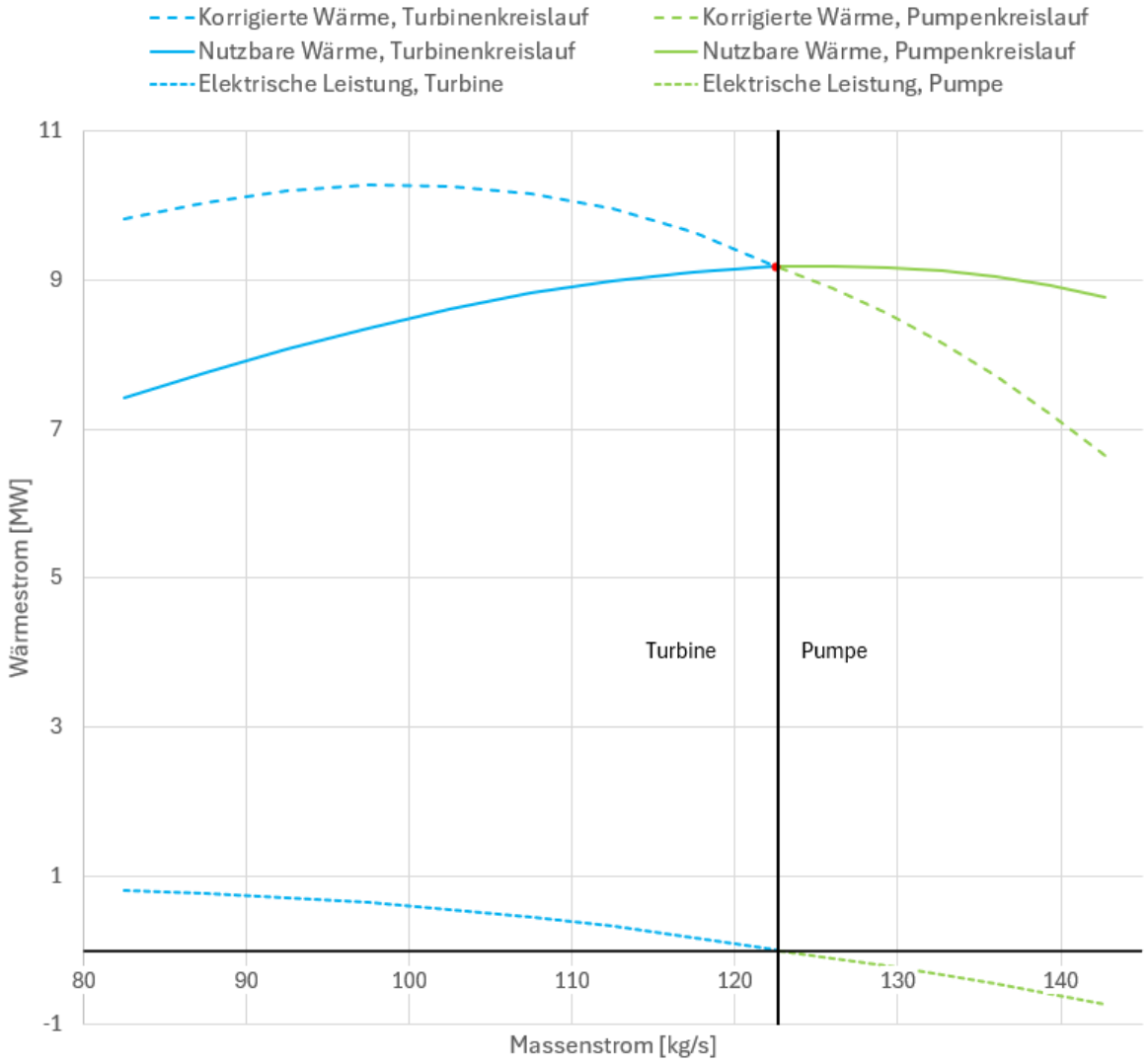

Abbildung 25: Auswertung CO2 Kreislauf bei

Mit dem geothermischen Kreislauf aus Kapitel 4.2 lässt sich ein nutzbarer Wärmestrom von ≈ 10 MJ/s mit einem Massenstrom von 122,6 kg/s umsetzen. Das Maximum an nutzbarer Wärme erhöht sich durch die Verwendung einer Pumpe nicht signifikant und rechtfertigt nicht die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe. Im Turbinenkreislauf lässt sich bei der „Korrigierten Wärme“, der Bilanzierung der erzeugten elektrischen Leistung mit der nutzbaren Wärme, aufgrund der Formel (4-1) eine wirtschaftliche Alternative bei einem Massenstrom von ≈ 97 kg/s vermuten. Weil für den Vergleich der Wärmeträgermedien ein Kreislauf mit maximaler nutzbarer Wärme sinnvoll ist, wird im weiteren Verlauf der Arbeit die Version ohne Turbomaschinen mit einem Massenstrom von 122,6 kg/s betrachtet.

4.3 Vergleich Sole und CO_2

Die optimierten geothermischen Kreisläufe mit CO_2 und Sole als Wärmeträgermedium können aufgrund verschiedener Kriterien bewertet werden.

4.3.1 Bewertung des Wärmestroms

In den Kapiteln 4.1.5 und 4.2.3 wird die nutzbare Wärmemenge abhängig vom Massenstrom betrachtet. Das Zusammenfassen der Ergebnisse führt zu dem Diagramm in Abbildung 26. Der maximale dargestellte Wärmestrom befindet sich nach der korrigierten Wärme (4-1) im wirtschaftlichen Optimum.

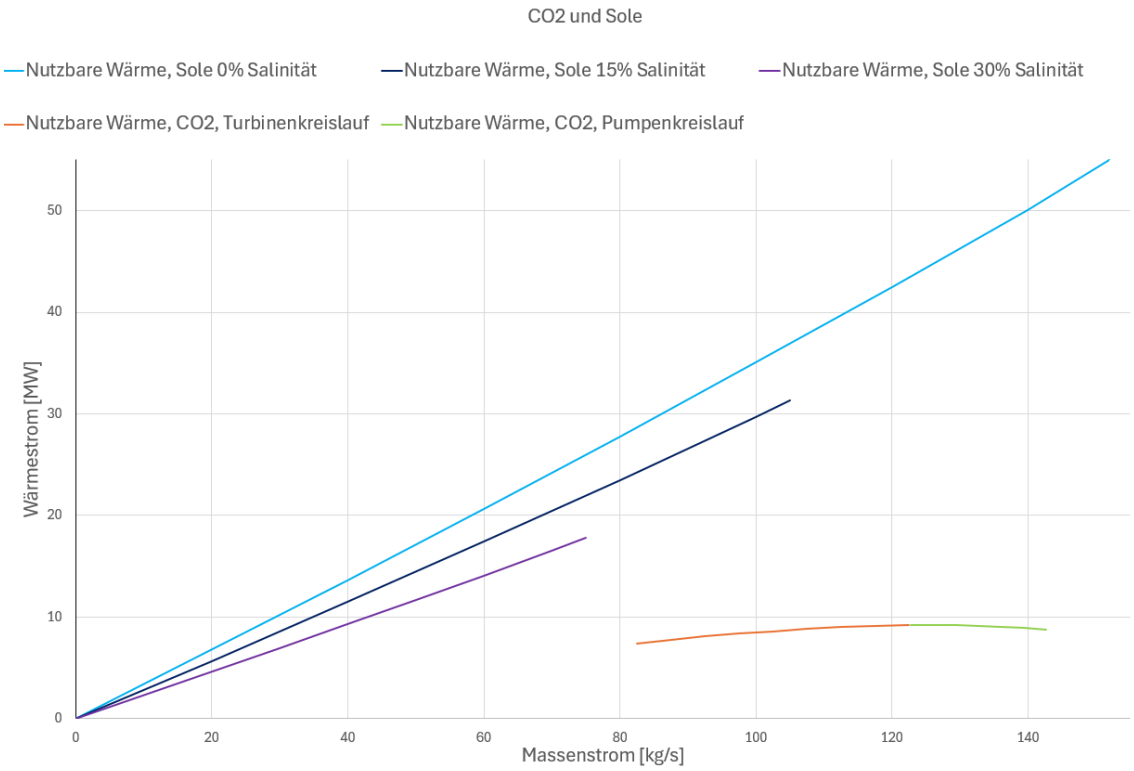

Abbildung 26: Vergleich CO2 und Sole

Das Medium Sole macht bei den betrachteten Randbedingungen mit 0 % Salinität 55MJ/s, mit 15 % Salinität 28,3 MJ/s, und mit 30 % Salinität 12 MJ/s nutzbar. Das Medium CO_2 macht im optimalen Kraftwerksdesign 9,2 MJ/s nutzbar. Wenn die Ergebnisse in ein Verhältnis gesetzt werden, kann das Medium Sole mindestens 130 % und maximal 598 % der Wärmemenge eines geothermischen Kreislaufs mit CO2 als Medium auskoppeln. Es ist zu beachten, dass sich des Weiteren die an das Fernwärmewasser übertragbare Temperatur unterscheidet. Das Medium Sole erwärmt das Fernwärmewasser auf 140 °C. Das Medium CO_2 erwärmt das Fernwärmewasser auf 90 °C.

Wenn bei geringeren Tiefen geringere Druckverhältnisse (4-2) umsetzbar sind, kann CO2 aufgrund des geringeren maximalen Einleitungsdrucks auch einen höheren nutzbaren Wärmestrom als Sole liefern. Dieser Bereich ist in der Abbildung 27 abhängig vom Druckverhältnis und der Salinität im Solekreislauf dargestellt.

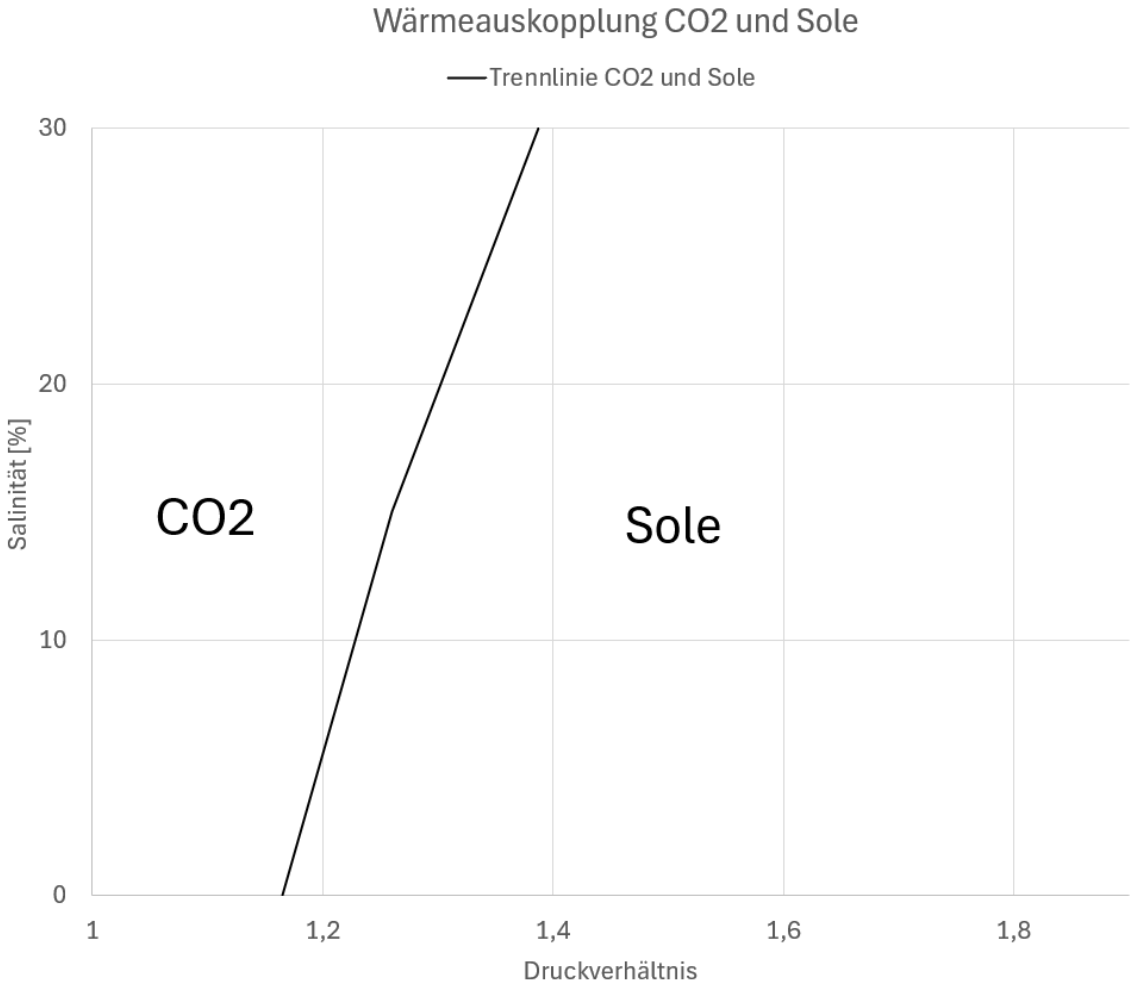

Abbildung 27: Bestes Medium, "Druckverhältnis" und Salinität

4.3.2 Bewertung des Exergiestroms

Ein weiteres sinnvolles Bewertungskriterium ist der Exergiestrom im Fernwärmewasser, also die Energie, welche an das Fernwärmewasser abgegeben werden kann. Der Exergiestrom der optimierten Sole-Kreisläufe und CO_2-Kreisläufe hat für die Bewertung der Systeme aufgrund der betrachteten Temperaturen mehr Aussagekraft über die Wirtschaftlichkeit der Systeme als die nutzbare Wärme. Sole in geothermischen Kraftwerken ist hoch salinar, weshalb der Exergiestrom des optimierten CO_2 Kraftwerkes mit dem Exergiestrom des optimierten Sole Kraftwerkes mit einer Salinität von 30 % in Bezug auf das Fernwärmewasser verglichen wird.

$$E_x = \dot{m} * \left((h_1 - h_0) - T_0 * (s_1 - s_0)\right) \quad (4\text{-}4)$$

Sole-Kreislauf ohne Unterkühler, 30 % Salinität:

$$E_{xFw} = 74{,}2\,\frac{kg}{s} \cdot \left(\left(607\,\frac{kJ}{kg} - 252\,\frac{kJ}{kg}\right) - 333{,}15K \cdot \left(1{,}783\,\frac{kJ}{kgK} - 0{,}831\,\frac{kJ}{kgK}\right)\right)$$
$$= 2808\ kW$$

$$E_{xPumpe} = 75\,\frac{kg}{s} \cdot \left(\left(663\,\frac{kJ}{kg} - 624\,\frac{kJ}{kg}\right) - 418{,}15K \cdot \left(1{,}809\,\frac{kJ}{kgK} - 1{,}795\,\frac{kJ}{kgK}\right)\right)$$
$$= 2486\ kW$$

$$E_{xSole} = E_{xFw} - E_{xPumpe} \approx 322\ kW$$

CO_2-Kreislauf ohne Turbomaschinen:

$$E_{xCO2} = 76{,}3\,\frac{kg}{s} \cdot \left(\left(382\,\frac{kJ}{kg} - 252\,\frac{kJ}{kg}\right) - 333{,}15K \cdot \left(1{,}205\,\frac{kJ}{kgK} - 0{,}831\,\frac{kJ}{kgK}\right)\right)$$

$$E_{xCO2} \approx 412\ kW$$

Mit den konservativen Randbedingungen, welche für den Solekreislauf angenommen wurden, macht das Medium CO_2 einen höheren Exergiestrom nutzbar. Die Betriebskosten der Pumpe sind dabei nicht berücksichtigt.

Wenn die Ergebnisse der Exergiestromrechnungen in ein Verhältnis gesetzt werden, ergibt sich der prozentuale Vorteil von CO_2 in Bezug auf den Exergiestrom.

$$\frac{E_{xCO2}}{E_{xSole}} \approx 1{,}29 = 129\,\%$$

Geothermische Kraftwerke mit CO2 als Wärmeträgermedium liefern bei Wärmeauskopplung für Fernwärme und den angenommenen Randbedingungen einen 29 % höheren Exergiestrom.

4.4 Wärmepumpenkonzepte, Turbo Wärmetransformer

Das Prozesswasser von Fernwärmenetzten muss für eine optimale Wärmeübertragung auf 140 °C erhitzt werden. Das macht die Nutzung von Geothermiekraftwerken mit CO_2 als Wärmeträgermedium für Fernwärme umständlich, da die nutzbare Temperatur aufgrund der Kompressibilität des Mediums niedriger ist als bei dem Wärmeträger Sole. Die Lösung kann ein Hochtemperaturwärmepumpenkonzept sein.

Die Ergänzung des Turbo Wärmetransformers in das für Wärmeauskopplung optimierte Geothermische Kraftwerk mit CO_2 als Wärmeträger (siehe Kapitel 4.2) führt zu dem Wärmeschaltplan in Abbildung 28.

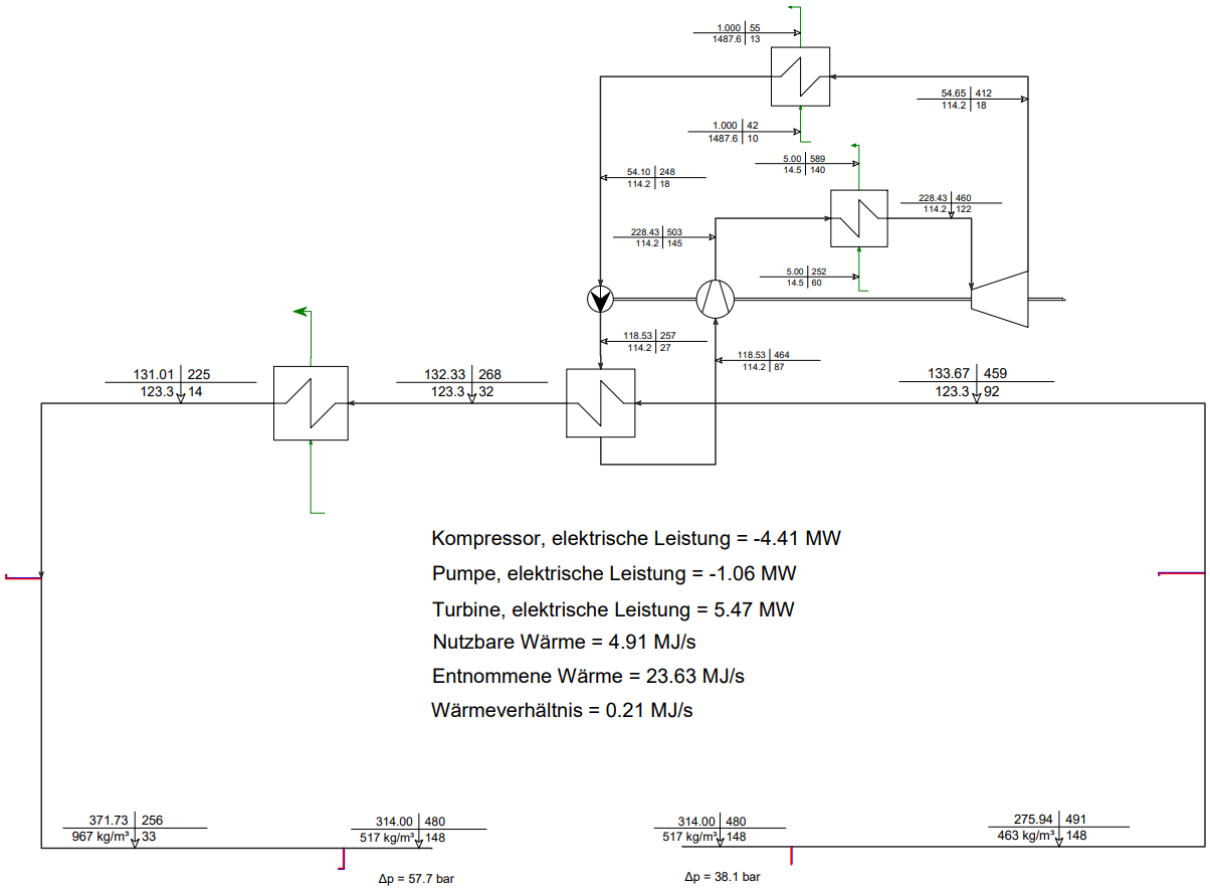

Abbildung 28: Turbo Wärmetransformer, Wärmeverhältnis

Die nutzbare Wärme verringert sich aufgrund des Betriebs des Turbo Wärmetransformers von ≈ 9,2 MJ/s (siehe Abbildung 19) auf ≈ 4,9 MJ/s (siehe Abbildung 28). Wenn der nutzbare Wärmestrom mit einer Temperatur von 140°C zu dem entnommenen Wärmestrom am ersten Wärmeübertrager ins Verhältnis gesetzt wird, ergibt sich nach Formel 3-2 die Effizienz des Turbo Wärmetransformers.

$$\eta_{\mathrm{TW}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{nutz}}}{\dot{Q}_{\mathrm{ab}}} = \frac{4{,}9\ MJ/s}{23{,}63\ MJ/s} \approx 0{,}21 = 21\ \%$$

In dem vorhandenen geothermischen Kreislauf kann 21 % der entnommenen Wärme auf dem für Fernwärme nötigen Temperaturniveau genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit, um mehr geothermische Wärme nutzbar zu machen, ist das Anpassen der Grädigkeiten an den Wärmetauschern. Für die Vergleichbarkeit mit anderen Kreisläufen wurde diese bisher auf 5 K festgesetzt. Um den Einfluss zu untersuchen und einen Eindruck vom Optimierungspotential zu bekommen, werden Berechnungen mit idealen Grädigkeiten von 0 K durchgeführt (siehe Abbildung 29).

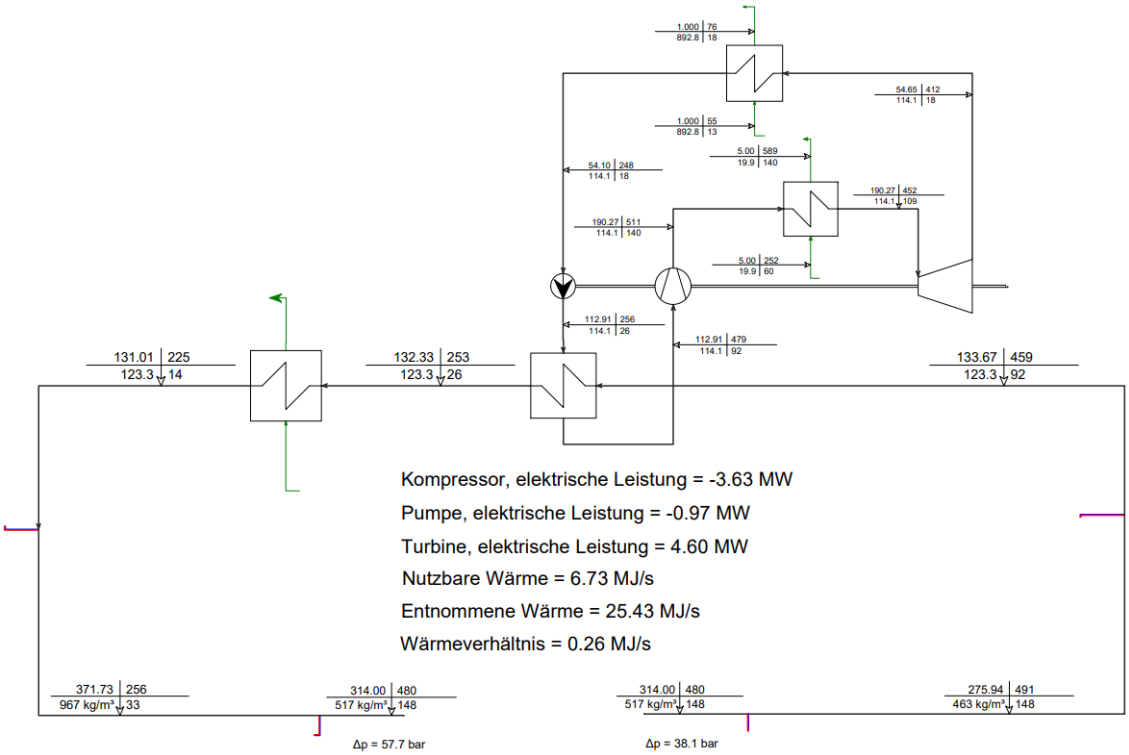

Abbildung 29: Turbo Wärmetransformer, Grädigkeiten

Bei vernachlässigten Grädigkeiten an den drei Wärmeübertrager im geothermischen Kreislauf ist es möglich, die nutzbare Wärmemenge im Fernwärmewasser von 4,9 MJ/s auf 6,73 MJ/s zu erhöhen. Das entspricht einem Anstieg des nutzbaren Wärmestroms um ≈ 37 %. Dabei ist zu beachten, dass die angenommenen Grädigkeiten von 0 K ein idealisiert sind. Die realen optimierten Grädigkeiten der Wärmetauscher werden zwischen 0k und 5 K erwartet. Mithilfe der Pinch Prüfung an den Wärmetauschen lässt sich die Grädigkeit minimieren und eine reale prozentuale Steigerung der nutzbaren Wärme errechnen.

Die Nutzung des Turbo Wärmetransformers kann über einen weiteren Wärmetauscher hinter der Produktionsbohrung optimiert werden (siehe Abbildung 30). Der zusätzliche Wärmetauscher soll die Temperatur des Fernwärmewassers vor der Nutzung eines Wärmepumpenkonzeptes so weit wie möglich erhöhen. Das verhindert Wärmeverluste aufgrund der Wirkungsgrade der Turbomaschinen.

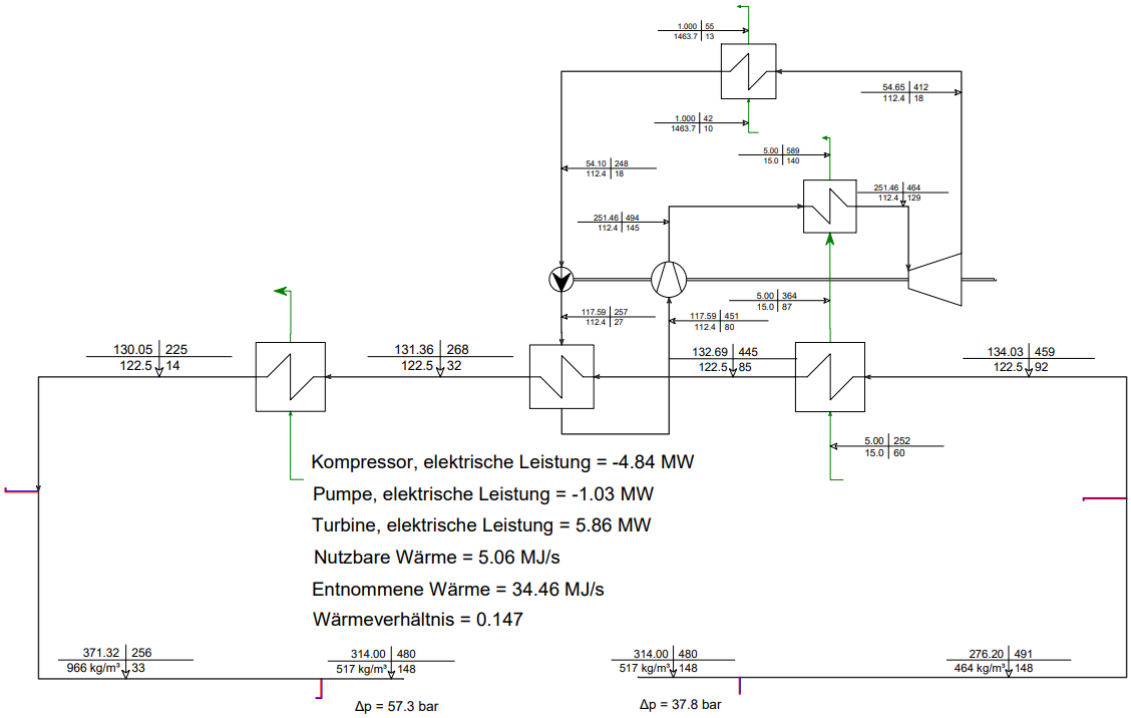

Abbildung 30: Turbo Wärmetransformer, Optimierung

Die Optimierung durch einen weiteren Wärmetauscher erhöht die Nutzbare Wärme von 4,9 MJ/s auf 5,13 MJ/s. Das entspricht einer Erhöhung des nutzbaren Wärmestroms um 4,7 %.

Ein Turbo Wärmetransformer im geothermischen Kraftwerk mit den angenommenen Randbedingungen verschlechtert die nutzbare Wärme des Wärmeträgers CO_2 im Vergleich zum Wärmeträger Sole signifikant.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund von Randbedingungen eines geothermischen Reservoirs werden Geothermiekraftwerke für die Wärmeträger Sole und CO_2 entwickelt. Diese sind hinsichtlich des nutzbaren Wärmestroms für Fernwärme optimiert. Unter Berücksichtigung diverser physikalischer Zusammenhänge können die Wärmeträger somit verglichen werden. Der an das Fernwärmewasser übertragbare Wärmestrom ist bei Sole signifikant höher. Außerdem ist die niedrigere Temperatur von CO_2 am Ausgang der Produktionsbohrung ein großer Nachteil. Diese niedrigere Temperatur von CO_2 kann für eine realistische Nutzung des Wärmestroms für Fernwärme mithilfe eines Wärmepumpenkonzeptes erhöht werden. Die dafür aufzubringende Wärmemenge verschlechtert die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkes deutlich. Darüber hinaus sind die Fixkosten der Bauteile bei der Nutzung des Wärmepumpenkonzeptes im Kraftwerk höher. Eine Nutzung von CO_2 als Wärmeträger für den Betrieb eines hinsichtlich Fernwärmeabgabe optimierten geothermischen Kraftwerkes ist somit bei den angenommenen Randbedingungen nicht sinnvoll.

Bei einem weniger tieferen geothermischen Reservoir mit signifikanten Salzeinlagerungen kann ein auf Wärmeauskopplung optimiertes Kraftwerk mit der Nutzung von CO_2 als Wärmeträger wirtschaftlicher sein als ein Kraftwerk mit Sole als Wärmeträger. Darüber hinaus ist es sinnvoll, die negative CO_2 Bilanz beim Aufbau eines geothermischen Kraftwerkes aufgrund der Einbringung von CO_2 ins Erdreich zu berücksichtigen. Der Verkauf von damit verbundenen CO_2 Zertifikaten kann einen Einfluss auf die Fixkosten des Kraftwerkes haben. Ein ausführlicher ökonomischer Vergleich der Wärmeträger für flexible Randbedingungen ist sinnvoll. In Bezug auf den Turbo Wärmetransformer ist es sinnvoll zu untersuchen, ob die Abwärme im Kühler vor der Injektionsbohrung ebenfalls für Fernwärme nutzbar gemacht werden kann. Ein zweiter Turbo Wärmetransformer könnte an dieser Stelle einen weiteren Wärmestrom auf die für Fernwärme benötigte Temperatur bringen.

Literaturverzeichnis

(Adam 14a)	Adams, B. M.; Kuehn, T. H.; Bielicki, J. M.; Randolph J. B.; Saar M. O. On the importance of the thermosiphon effect in CPG (CO2 plume geothermal) power systems Elsevier Ltd., Minneapolis 2014
(Adam 14b)	Adams, B. M.; Kuehn, T. H.; Bielicki, J. M.; Randolph J. B.; Saar M. O. A comparison of electric power output of CO2 Plume Geothermal (CPG) and brine geothermal systems for varying reservoir conditions Elsevier Ltd., Minneapolis 2014
(Bauer 14)	Bauer M. J.; Freeden W.;Jacobi H.; Neu T.; Handbuch tiefe Geothermie, Springer Verlag, Heidelberg 2014
(Bv. Geothermie, Gradient)	Terrestrischer Wärmestrom und Geothermischer Gradient, Zugriff am 18.02.2025, von https://www.geothermie.de/geothermie/einstieg-in-die-geothermie/terrestrischer-waermestrom-und-geothermischer-gradient
(Bv. Geothermie, Permeabilität)	Permeabilität, Zugriff am 17.03.2025, von https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/p/permeabilitaet
(Bv. Geothermie, Technologien)	Geothermische Technologien, Zugriff am 01.04.2025, von https://www.geothermie.de/geothermie/geothermische-technologien
(Chemie, Wärmek.)	Liste der spezifischen Wärmekapazitäten, Zugriff am 03.03.2025, von https://www.chemie.de/lexikon/Liste_der_spezifischen_Wärmekapazitäten.html
(Gaaren 93)	Gaarenstroom, L.; Proceedings of the 4th Conference; Published by The Geological Society, London 1993

(Herf 15)	Herfurth, S.; Schröder, E.; Thomauske, K.; Kuhn, D. Messung physikalischer Thermalwassereigenschaften unter In-situ-Bedingungen Institut für Kern- und Energietechnik, Karlsruhr 2015
(Hölt 13)	Hölting, B.; Coldewey, W.G. Hydrogeologie, Springer-Verlag, Heidelberg 2013
(Jodocy 11)	Jodocy, M.; Stober, I.; Physikalische Eigenschaften von Waser, Schwankungen im Zusammenhang mit Geothermiebohrungen und Auswirkungen auf die thermische Leistung und die Aquiferparameter, Freiburg im Breisgau 2011
(Lös. NaCl)	Löslichkeit von Natriumchlorid, Zugriff am 21.03.2025, von https://www.rhetos.de/html/lex/loeslichkeit_von_natriumchlorid.htm
(Ramming 19)	Ramming, K.; Zusätzliche Auskühlung des Geothermiewassers und Wärmeversorgung bei höherer Temperatur mit Hilfe von Wärmetransformatoren, 2019
(Stob 10)	Stober, I.; Fritzer, T.; Obst, K. Tiefe Geothermie Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2010
(Zackariat 25)	Zackariat, M.; Hartz, K.; Huneke, F.; Agora Energiewende, Die Energiewende in Deutschland, Berlin 2025

Nicht öffentliche und Siemens Energy interne Literatur:

(Böhmer 20)	Böhmer, F.; Modellierung und Design eines Versuchsstandes für CO2-basierte Geothermiekraftwerke, 2020
(Hansper 18)	Hansper, J.; Thermodynamische Analyse von sCO_2 Kreisprozessen in Geothermie-Kraftwerken, 2018

(Heuter 23)	Heuter, R.; Wirtschaftliche Bewertung von CO_2 basierten Geothermiekraftwerken unter Berücksichtigung von nicht reinem CO_2, 2023
(Schnorr 21)	Schnorrenberg, J.; Entwicklung und Optimierung sCO2-basierter Geothermie-Kraftwerke in Abhängigkeit der geologischen und geographischen Randbedingungen an Industriestandorten, 2021
(Shandilya 24)	Shandilya, A.; Turbo heat transformer, 2024
(Sudhoff 19)	Sudhoff, R.; Thermodynamische und wirtschaftliche Analyse von sCO2-Kreisprozessen in Geothermie-Kraftwerken, 2019

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht. Die vorgelegte Arbeit hat weder in der gegenwärtigen noch in einer anderen Fassung schon einem anderen Fachbereich der Hochschule Ruhr West oder einer anderen wissenschaftlichen Hochschule vorgelegen.

Mülheim, 24.04.2025 — Ralf Radke

Ort, Datum — Unterschrift, Ralf Radke