



1 EINLEITUNG

Die geothermische Energiegewinnung begann Anfang des 20. Jahrhunderts in Italien mit der Beheizung eines Niederdruckkessels [Stober & Bucher, 2012]. In den 1950er Jahren wurde weltweit begonnen, verstärkt geothermische Kraftwerke zu bauen. Der Ausbau erfolgte vorwiegend an den Kontinentalplattengrenzen, da der Erduntergrund an diesen Orten die größten Temperaturanomalien aufweist. Neben diesen großen Temperaturanomalien an den Plattengrenzen gibt es auch auf den Erdplatten Gebiete mit erhöhtem Temperaturgradienten im Erduntergrund. Zur Nutzung der Temperatur des Erduntergrunds ist ein Wärmeträgermedium erforderlich. Derzeit wird in fast allen geothermischen Kraftwerken im Erduntergrund eingespeichertes Wasser als Wärmeträgermedium verwendet. An den Plattengrenzen befindet sich das Wasser bereits in einigen hundert Metern Tiefe im dampfförmigen Zustand. Im Gegensatz hierzu können auf den Kontinentalplatten meist nur Heißwasserreservoirs mit geringerem spezifischem Energieinhalt erschlossen werden. Gleichzeitig ist ein hoher technischer Aufwand zur Erschließung der Heißwasserreservoirs aufgrund ihrer Vorkommen in bis zu 5000 m Tiefe erforderlich. Eine effiziente Nutzung des unter hohem Aufwand aus dem Erduntergrund geförderten Wärmestroms eines Heißwasserreservoirs ist somit für die Rentabilität der geothermischen Stromerzeugung unabdingbar. Da es sich bei der geothermischen Stromerzeugung um eine regenerative, CO₂-freie Energieform handelt, ist ein Ausbau in Deutschland politisch gewünscht [Viertl, 2013] und es werden Projekte mit Heißwasserreservoirs als Wärmequelle realisiert [Kather & Rohloff, 2011]. Der größte Anteil der Erdkruste besteht aus heißem, trockenem Gestein, das heutzutage noch nicht zur geothermischen Stromerzeugung genutzt werden kann. Erste Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit dieser sogenannten petrothermalen geothermischen Stromerzeugung, um die örtliche Begrenzung der geothermischen Stromerzeugung aufzuheben [Tischner et al., 2006].

1.1 Motivation

Zur Nutzung der Energie aus geothermischen Reservoiren werden in Abhängigkeit vom Zustand des Thermalwassers im Reservoir unterschiedliche Technologien zur Stromerzeugung eingesetzt. Bei hydrothermalen Heiß- und Trockendampfvorkommen mit Temperaturen über 200 °C kann der Dampf direkt in einer Turbine genutzt werden [Stober & Bucher, 2012]. Liegt der Dampf als Nassdampf vor, wird

in Flash-Systemen durch Druckabsenkung ein Teil der flüssigen Phase verdampft. Die restliche flüssige Phase wird im Abscheider von der dampfförmigen Phase abgeschieden. Der Dampf wird anschließend in der Turbine entspannt. Das gleiche Prinzip wird angewendet, wenn das Thermalwasser unter hohem Druck flüssig im Reservoir vorliegt.

Bei einer zu geringen spezifischen Enthalpie des Thermalwassers, die für die Verdampfung des Thermalwassers im Erdinneren nicht ausreicht, werden indirekte Systeme mit Sekundärkreislauf eingesetzt. Der mit dem Thermalwasser geförderte Wärmestrom wird in einem Wärmeübertrager auf einen geschlossenen Kreisprozess übertragen. Aufgrund des geringen mittleren Temperaturniveaus der Wärmezufuhr ist der Carnot-Wirkungsgrad der Systeme mit Sekundärkreislauf gering. Bei gleichzeitig hohen Investitionskosten infolge der bohrungstechnischen Erschließung von Reservoiren in bis zu 5000 m Tiefe ist die optimale Nutzung der erschlossenen Energiequelle unerlässlich. Es existieren zwei unterschiedliche Systeme zur Verstromung von Niedertemperaturwärme. In beiden Kreisprozessen werden Arbeitsmittel mit einer geringeren Siedetemperatur¹ als jener von Wasser verwendet. Beim Organic Rankine Cycle (ORC) werden organische Arbeitsmittel wie Benzene, Toluene oder azeotrope Mischungen als Arbeitsmittel eingesetzt [Hung et al., 1997]. In den Arbeiten von Hung et al. [1997] und Kather & Rohloff [2011] wird die Auswahl der Arbeitsmittel für den ORC in Abhängigkeit von den Prozessparametern beschrieben. Beim zweiten Kreisprozess, dem Kalina-Kreislauf, wird ein Ammoniak-Wasser-Gemisch als Arbeitsmittel eingesetzt. Der Kalina-Kreislauf weist dabei im Vergleich zum ORC aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmittels Vorteile bei der Wärmeübertragung auf [Köhler, 2005]. Weltweit ist der Kalina-Kreislauf fünf Mal realisiert worden. Drei dieser Anlagen nutzen geothermische Wärmequellen, wovon zwei in Deutschland stehen. Aufgrund der geringen Betriebserfahrung gibt es noch einen erheblichen Forschungsbedarf für die optimale Auslegung des Kalina-Kreislaufs zur Nutzung geothermischer Energiequellen und zum Betriebsverhalten einer solchen Anlage.

In dieser Arbeit wird ein Beitrag zur Optimierung des Kalina-Kreislaufs für die geothermische Stromerzeugung geleistet. Dabei stehen insbesondere die optimale

¹ Die Siedetemperatur von Gemischen ist die Temperatur des Verdampfungsbeginns bei einem gegebenen Druck und einer gegebenen Konzentration der Bestandteile des Arbeitsmittels.

Nutzung der Energiequelle und das Betriebsverhalten des Kalina-Kreislaufs im Fokus.

1.2 Ziel und Abgrenzung der Arbeit

Die Ziele dieser Arbeit sind die Beschreibung des Betriebsverhaltens und die Optimierung des Kalina-Kreislaufs zur geothermischen Stromerzeugung. Im Kalina-Kreislauf werden Gemischeigenschaften und daraus resultierende Wärmeübertragungseigenschaften zur effizienten Verstromung geothermischer Heißwasserreservoirs mit niedriger Temperatur genutzt. Eine Literaturrecherche zum Kalina-Kreislauf zeigt, dass die bisherigen Untersuchungen den optimierten Auslegungsfall des Stromerzeugungsprozesses zum Ziel haben [vgl. z. B. Kalina, 2003; Köhler, 2005; Kather et al., 2008; Thorade, 2008]. Kalina und Köhler untersuchen und optimieren in Ihren Arbeiten den Prozesswirkungsgrad des Kalina-Kreislaufs, wohingegen Kather und Thorade die Auswirkungen der prozesseitigen Optimierung auf den Anlagenwirkungsgrad betrachten². Die optimale Anpassung der Schaltung der Prozesskomponenten an die Betriebsbedingungen der geothermischen Wärmequelle, basierend auf dem Netto-Anlagenwirkungsgrad und dem Betrieb des Kalina-Kreislaufs, sind derzeit noch wenig untersucht.

Die Schaltung der Prozesskomponenten des Kalina-Kreislaufs und die Betriebsparameter des Arbeitsmittels beeinflussen entscheidend den vom Thermalwasser auf den Prozess übertragenen Wärmestrom und damit die erzeugte elektrische Nettoleistung. Hierauf aufbauend werden unter Berücksichtigung des maximalen Netto-Anlagenwirkungsgrads vergleichend zu Untersuchungen in der Literatur und zur Praxis zwei neue Schaltungsvarianten definiert. Die Betriebsbedingungen bestimmen für alle Schaltungsvarianten die optimalen Betriebsparameter.

Zusätzlich zur Auslegung der Schaltungsvarianten für die optimale Nutzung des mit dem Thermalwasser geförderten Wärmestroms wird das Betriebsverhalten des Kalina-Kreislaufs untersucht. Im Gegensatz zu den in Kapitel 2.3 dargestellten Untersuchungen aus der Literatur wird in dieser Arbeit das Verhalten der Schaltungsvarianten im Betrieb und somit für ausgewiesene Größen und Kennlinien der Kraftwerkskomponenten bestimmt.

² Die Definition der hier genannten Wirkungsgrade erfolgt in Kapitel 2.1.

Mit den in dieser Arbeit erarbeiteten Zusammenhängen wird eine optimierte Auslegung des Kalina-Kreislaufs zur geothermischen Stromerzeugung untersucht. Gleichzeitig soll mit dem detaillierten Wissen über die thermodynamischen Zustände und deren Einflussgrößen ein optimierter Betrieb des Kalina-Kreislaufs erreicht werden. Das Ziel der erarbeiteten Optimierungsstrategien ist die Erhöhung der über das Jahr erzeugten Strommenge des Geothermiekraftwerks.

1.3 Vorgehensweise

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, lassen sich in Abhängigkeit vom Zustand des Thermalwassers im geothermischen Reservoir verschiedene Kraftwerksprozesse zur geothermischen Stromerzeugung realisieren. Für die Untersuchung der Kraftwerksprozesse werden in Kapitel 2 Bewertungskriterien für geothermische Kraftwerke mit indirekten Systemen definiert und die Grundlagen des Kalina-Kreislaufs beschrieben. Die Gegenüberstellung der aktuellen Strategien zur Optimierung des Kalina-Kreislaufs verdeutlicht die Wichtigkeit der ganzheitlichen Betrachtung eines Geothermiekraftwerks mit Kalina-Kreislauf basierend auf dem Netto-Anlagenwirkungsgrad.

Für die ganzheitliche Untersuchung eines Geothermiekraftwerks mit Kalina-Kreislauf wird ein Simulationsmodell erstellt. Die Verwendung realitätsnaher Randbedingungen ist für die Charakterisierung und die Optimierung des Betriebsverhaltens eines Geothermiekraftwerks mit Kalina-Kreislauf unerlässlich. Das Geothermiekraftwerk Bruchsal dient als Referenzkraftwerk für die Randbedingungen des Simulationsmodells. Anhand von Messwerten des Referenzkraftwerks wird das erstellte Modell validiert. Die externen Randbedingungen „Kaltwassertemperatur“, „Kühlwassermassenstrom“, „Thermalwassertemperatur“ und „Thermalwassermassenstrom“ (ff. Betriebsbedingungen genannt) werden im Auslegungsfall zu $T_{KW} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}_{KW} = 160 \text{ kg/s}$, $T_{TW} = 121,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\dot{m}_{TW} = 24,5 \text{ kg/s}$ definiert. Die dem Modell zugrunde liegenden Besonderheiten der eingesetzten Arbeitsmittel sowie die Wirkungsgrade und die Betriebscharakteristika der einzelnen Komponenten des Kreislaufs werden in Kapitel 3 vorgestellt. Die Auswahl der Komponenten und deren Betriebscharakteristika orientieren sich ebenfalls an dem Referenzkraftwerk. Darüber hinaus werden in Kapitel 3 die Zustandsgrößen des Arbeitsmittels im Auslegungsfall des Referenzkraftwerks dargestellt und der Referenzbetrieb des Geothermiekraftwerks definiert.

Vergleichend zu der derzeit in den Geothermiekraftwerken Bruchsal und Unterhaching in Deutschland realisierten Schaltungsvariante des Kalina-Kreislaufs werden in Kapitel 4 zusätzlich zwei neue, optimierte Schaltungsvarianten vorgestellt. Die Zielstellung der neuen Schaltungsvarianten ist ein maximaler Netto-Anlagenwirkungsgrad des Geothermiekraftwerks bei reiner Stromerzeugung unter Berücksichtigung des gesamten Systems inklusive der Besonderheiten der geothermischen Energiequelle.

Die Betriebsbedingungen bestimmen die Größe der Kraftwerkskomponenten und mit diesen zusammen die Auswahl der kreislaufinternen Betriebsparameter „Gesamt-Arbeitsmittelmassenstrom“, „Arbeitsmitteldruck stromabwärts des Regelventils“ und „Gesamt-Ammoniakmassenanteil“. Eine detaillierte Analyse des Einflusses der Betriebsparameter auf den Betrieb eines Geothermiekraftwerks mit Kalina-Kreislauf wird in Kapitel 5 durchgeführt. Mit diesen Ergebnissen werden die optimalen Betriebsparameter der Schaltungsvarianten für den Auslegungsfall bestimmt.

In Kapitel 6 wird der Referenzbetrieb der Schaltungsvarianten entsprechend dem Referenzkraftwerk (Bruchsal) definiert. Ausgehend vom Referenzbetrieb der Schaltungsvarianten wird anschließend eine Anpassung des Gesamt-Arbeitsmittelmassenstroms untersucht. Zum Vergleich der Betriebsweisen wird die Netto-Stromproduktion eines Jahres für alle Schaltungsvarianten ausgewiesen und verglichen.



2 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Die indirekten Systeme mit Sekundärkreislauf zur geothermischen Stromerzeugung sind im Rahmen der Diskussion über „Erneuerbare Energien“ und „Effizienzsteigerung“ in den Fokus der Wissenschaft gerückt [Nitsch et al., 2012]. Zum einen können bestehende geothermische Kraftwerke mit Sattdampfturbine durch einen Sekundärkreislauf ergänzt werden, wodurch die Abwärmeleistung des Kraftwerks verringert wird [DiPippo, 2004; Fuchs & Kather, 2014]. Zum anderen können die indirekten Systeme eigenständig zur Stromerzeugung aus geothermischen Heißwasserreservoirs mit niedriger Temperatur genutzt werden [DiPippo, 2004; Rohloff & Kather, 2011]. Für die indirekte Stromerzeugung stehen, wie bereits erwähnt, derzeit zwei Kreisläufe zur Verfügung, die sich hauptsächlich in den eingesetzten Arbeitsmitteln unterscheiden. Der ORC ist derzeit die bevorzugte Variante zur Verstromung geothermischer Wärmequellen niedriger Temperatur. Infolgedessen liegt für diesen Prozess bereits eine breite Basis an Betriebsdaten und Optimierungsstrategien vor. Für den ORC kann gezeigt werden, dass eine Ausführung auf zwei Druckniveaus oder eine überkritische Fahrweise des Prozesses den Anlagenwirkungsgrad steigert und dass die interne Wärmerückgewinnung bei der reinen Stromerzeugung den Anlagenwirkungsgrad senkt. Bei einer Thermalwasservorlauftemperatur von 150 °C und Vernachlässigung der elektrischen Leistung der Förderpumpe ($P_{el,FP} = 0$ kW) kann mit dem ORC ein maximaler Netto-Anlagenwirkungsgrad von 5,5 % erreicht werden [Kather et al., 2008].

Der Kalina-Kreislauf wurde bisher vorwiegend theoretisch untersucht. Die derzeitigen Optimierungsstrategien beruhen auf einer Verbesserung des Prozesswirkungsgrads ohne detaillierte Berücksichtigung der Besonderheiten der geothermischen Wärmequelle und des gesamten geothermischen Kraftwerks. Der Kalina-Kreislauf weist gegenüber dem ORC aufgrund der Zustandsänderung des verwendeten Ammoniak-Wasser-Gemisches bei der Wärmezufuhr und der Wärmeabfuhr thermodynamische Vorteile auf. Infolgedessen kann mit dem Kalina-Kreislauf KCS 34 (vgl. Kapitel 2.3) bei einer Thermalwasservorlauftemperatur von 150 °C und Vernachlässigung der elektrischen Leistung der Förderpumpe ($P_{el,FP} = 0$ kW) ein Netto-Anlagenwirkungsgrad von 5,6 % erreicht werden [Thorade, 2008]. Einen Vergleich zwischen realisierten Anlagen mit unterschiedlichen Kreisläufen zur geothermischen Stromerzeugung gibt DiPippo [2004]. Die im Folgenden dargestell-

ten Bewertungsgrundlagen der Betriebseigenschaften indirekter Systeme zur geothermischen Stromerzeugung sind unabhängig vom gewählten Stromerzeugungsprozess und gelten für alle Systeme, die ein geothermisches Reservoir mit flüssigem Thermalwasser niedriger Temperatur nutzen. Dies gewährleistet die Vergleichbarkeit verschiedener untersuchter Systeme.

2.1 Kennzahlen der geothermischen Stromerzeugung

Zur Beschreibung und Überwachung der Betriebseigenschaften von geothermischen Kraftwerken werden Kennzahlen herangezogen. Dabei ist eine einheitliche Definition der Referenzbedingungen und der Systemgrenzen wichtig. Als Kennzahlen werden Wirkungsgrade definiert, die im Allgemeinen den Nutzen ins Verhältnis zum Aufwand setzen

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} . \quad (2.1)$$

Der Nutzen ist bei geothermischen Stromerzeugungssystemen die erzeugte elektrische Bruttoleistung P_{el} . Wird zusätzlich Wärme erzeugt, wird diese bei gesonderten Kennzahlen, den Nutzungsgraden, ebenfalls dem Nutzen der Anlage zugerechnet. Der Aufwand beschreibt die dem Prozess zugeführte Menge an Energie. Bei der Geothermie ist dies der mit dem Thermalwasser aus dem Erduntergrund geförderte Thermalwasserwärmestrom

$$\dot{Q}_{\text{TW}} = \dot{m}_{\text{TW}} \cdot (c_{\text{p,TW,ein}} \cdot T_{\text{TW,ein}} - c_{\text{p,TW,ref}} \cdot T_{\text{ref}}) . \quad (2.2)$$

Als Referenzzustand für die Berechnung des Thermalwasserwärmestroms werden die Referenztemperatur von 15 °C entsprechend der Richtlinie VDI 3986 [VDI, 2000] und der Referenzdruck von 1,01325 bar nach DIN 1343 [DIN, 1990] verwendet.

Die Wärmeströme und die elektrischen Leistungen in einem geothermischen Kraftwerk mit Sekundärkreislauf sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

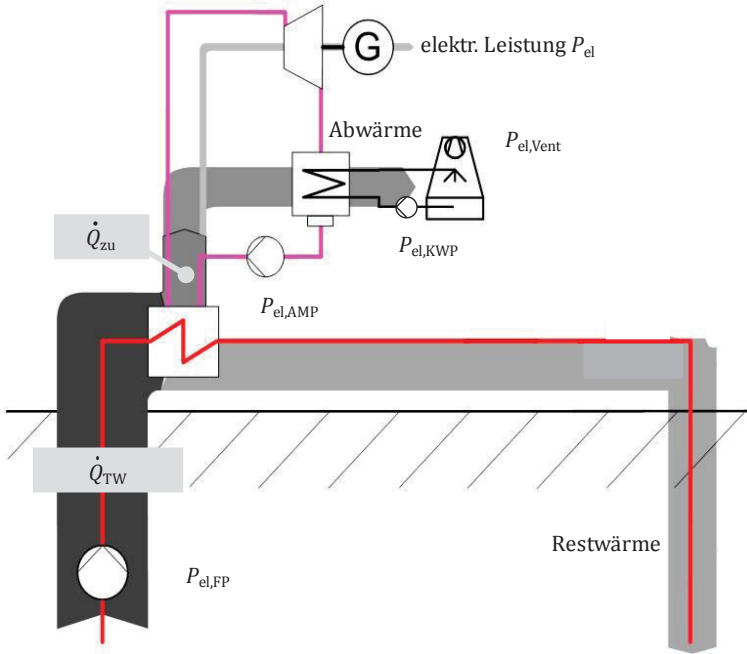


Abbildung 2.1: Wärmeströme, erzeugte elektrische Bruttoleistung und elektrischer Verbrauch in einem geothermischen Kraftwerk

Ein Teil des Thermalwasserwärmestroms $\dot{Q}_{TW}$ wird unter Abkühlung des Thermalwassers in einem Wärmeübertrager auf das Arbeitsmittel übertragen. Durch den dem Stromerzeugungsprozess zugeführten Wärmestrom

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_{TW} \cdot (c_{p,TW,ein} \cdot T_{TW,ein} - c_{p,TW,aus} \cdot T_{aus}) \quad (2.3)$$

wird das Arbeitsmittel in Abhängigkeit vom betrachteten Prozess vollständig oder teilweise verdampft. Das Verhältnis des dem Prozess zugeführten Wärmestroms $\dot{Q}_{zu}$ zum Thermalwasserwärmestrom $\dot{Q}_{TW}$ definiert den Auskühlungsgrad des Kraftwerks

$$\eta_{Auskühlung} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{Q}_{TW}} \quad (2.4)$$

Der durch den zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$ erzeugte Dampfmassenstrom des Arbeitsmittels wird in der Turbine entspannt, um über eine Welle den Generator anzutreiben und die elektrische Bruttoleistung P_{el} zu erzeugen. Zur Beschreibung des Stromerzeugungsprozesses wird der Brutto-Prozesswirkungsgrad $\eta_{\text{Prozess,brutto}}$ definiert, der die erzeugte Bruttoleistung P_{el} ins Verhältnis zum Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$, der dem Prozess zugeführt wird, stellt

$$\eta_{\text{Prozess,brutto}} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (2.5)$$

Für die Bewertung und den Vergleich von geothermischen Stromerzeugungsanlagen wird der Anlagenwirkungsgrad definiert. Der Brutto-Anlagenwirkungsgrad bezieht die erzeugte elektrische Bruttoleistung P_{el} auf den geförderten Thermalwasserwärmestrom $\dot{Q}_{TW}$. Der Brutto-Anlagenwirkungsgrad berechnet sich folglich aus dem Produkt von Auskühlungsgrad $\eta_{\text{Auskühlung}}$ und Brutto-Prozesswirkungsgrad $\eta_{\text{Prozess,brutto}}$

$$\eta_{\text{Anlage,brutto}} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{TW}} = \eta_{\text{Auskühlung}} \cdot \eta_{\text{Prozess,brutto}} \quad (2.6)$$

Unter Berücksichtigung der elektrischen Verbraucher wie Pumpen und Ventilatoren werden in Abhängigkeit von den für die Wirkungsgrade geltenden Systemgrenzen der Netto-Prozesswirkungsgrad zu

$$\eta_{\text{Prozess,netto}} = \frac{P_{el} - P_{el,AMP} - P_{el,KWP} - P_{el,Vent}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (2.7)$$

und der Netto-Anlagenwirkungsgrad mit zusätzlicher Berücksichtigung des elektrischen Bedarfs der Thermalwasserförderpumpe zu

$$\eta_{\text{Anlage,netto}} = \frac{P_{el} - P_{el,AMP} - P_{el,KWP} - P_{el,Vent}}{\dot{Q}_{TW}} - \frac{P_{el,FP}}{\dot{Q}_{TW}} \quad (2.8)$$

definiert. Mit diesen Kennzahlen wird der Einfluss der kreislaufinternen Betriebsparameter und der Betriebsbedingungen auf den Kalina-Kreislauf untersucht und bewertet.