Individuelle Lösungen durch die geeignete Wahl des Arbeitsmediums

Geothermische Kraftwerke in Deutschland



TIEFE GEOTHERMIEBei der geothermischen Stromerzeugung
kommen bedingt durch projektspezifische Randbedingungen
technische Einzellösungen für die obertägige Kraftwerkstechnik
zum Einsatz. Insbesondere hinsichtlich der Förderrate und der
Temperatur des Thermalwassers werden stets individuelle Kraft-
werkskonzepte erarbeitet. Im Vordergrund stehen dabei die Wahl
eines effizienten Arbeitsmediums und die Anpassung der Kraftwerks-
komponenten an thermodynamische und wirtschaftliche Kriterien.

Autoren

i

Dr.-Ing. **Florian Heberle**, Jahrgang 1979, Studium der Umweltingenieurswissenschaften an der Universität Bayreuth, Promotion an der Universität Bayreuth. Seit 2010 Akademischer Rat am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) an der Universität Bayreuth.

florian.heberle@uni-bayreuth.de

Prof. Dr.-Ing. **Dieter Brüggemann**, Jahrgang 1958, Studium der Physik an der RWTH Aachen, Promotion und Habilitation an der RWTH Aachen, anschließend Universitätsprofessor am Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt der Universität Stuttgart. Seit 1998 Lehrstuhlinhaber des LTTT an der Universität Bayreuth; Direktor des Zentrums für Energietechnik. Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß, Jahrgang 1961, Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der TU München, Promotion an der Universität der Bundeswehr München, im Anschluss sieben Jahre in der Gas- und Dampfturbinenentwicklung der ABB Kraftwerke AG, Baden/Schweiz, in verschiedenen Positionen. Seit 2000 Professur für Strömungsmaschinen und Thermische Maschinen, Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden.

Dr.-Ing. Laura Grundemann, Studium der Energie- und Verfahrenstechnik an der TU Braunschweig, Promotion an der TU Braunschweig. Seit 2013 Projektmanagerin bei Evonik Creavis GmbH, Marl.

ORC-Geothermiekraftwerk in Insheim.

ie Nutzung geothermischer Ressour-Cen im Temperaturbereich bis 200 °C zur Stromerzeugung basiert in der Regel auf einem Sekundärprozess. Dabei wird die thermische Energie des Thermalwassers auf einen Dampfkraftprozess mit niedrig siedenden Arbeitsmedien übertragen. Hierzu stehen der Organic Rankine Cycle (ORC) oder der Kalina Cycle (KC) zur Verfügung. Im Fall des ORC werden organische Arbeitsmedien verwendet und beim KC ein Ammoniak/Wasser-Gemisch. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der geothermischen Kraftwerke in Deutschland mit zugehöriger elektrischer Leistung (P_{el}) , Thermalwassertemperatur (T_{TW}) Förderrate, Arbeitsmedium und Prozessführung [1]. Die Aufstellung verdeutlicht die hohe Bandbreite der eingesetzten Technologien und Medien. Grundsätzlich kann eine Charakterisierung der Fluide hinsichtlich thermodynamischer, sicherheitstechnischer, klimarelevanter und toxischer Aspekte erfolgen [2]. Für die Medienauswahl ergibt

Standort	Prozess	Medium	Prozessführung	P _{el} [MW]	<i>Τ</i> _{TW} [°C]	Fließrate [l/s]
Bruchsal	Kalina	NH ₃ /H ₂ O	KCS34	0,5	135	24
Dürrnhaar	ORC	R245fa	2-Druck	5,5	137	135
Grünwald	ORC	Isobutan	1-Druck	4,3	135	100
Insheim	ORC	Isopentan	1-Druck	4,8	165	85
Kirchstockach	ORC	R245fa	2-Druck	5,5	138	125
Landau	ORC	Isopentan	1-Druck	1,0	157	70
Sauerlach	ORC	R245fa	2-Druck	5,0	140	140
Traunreut	ORC	R134a	1-Druck	5,5	118	165
Unterhaching	Kalina	NH ₃ /H ₂ O	KCS34	3,4	122,8	150





Bild 1 Schematische Anlagenverschaltung eines geothermischen 1-Druck-ORC-Prozesses.

sich ein Spannungsdreieck aus Klimarelevanz, Brennbarkeit und Toxizität. Teilfluorierte Kältemittel sind mitunter stark klimarelevant und unterliegen der EU-F-Gas-Verordnung 517/2014 [3]. In dieser Studie werden die natürlichen Kohlenwasserstoffe Isobutan und Isopentan sowie die Kältemittel R134a und R245fa als potenzielle ORC-Fluide untersucht. Die Wahl eines geeigneten Arbeitsmediums und die damit verbundenen technologischen und wirtschaftlichen Aspekte werden an einem Fallbeispiel für das süddeutsche Molassebecken dargestellt. Diese Region rund um München weist ein hohes Potenzial für die hydrothermale Geothermie auf. Für die Detailbetrachtungen werden die Randbedingungen des Kraftwerks Kirchstockach gewählt, das mit einer Anlagengröße von rund 5 MW (el.) repräsentativ für aktuelle Projekte im süddeutschen Raum ist.

Prozesssimulation

Der betrachtete 1-Druck-Prozess des geothermischen ORC-Kraftwerks ist in

Bild 1 dargestellt. Dabei wird das Arbeitsmedium vom Zustandspunkt 1 durch die Speisepumpe auf den oberen Prozessdruck gebracht (2). Die Wärmezufuhr ist in Vorwärmung und Verdampfung unterteilt. Am Eintritt in den Verdampfer (3) liegt das Arbeitsmedium bei Siedetemperatur vor, während es am Austritt (4) leicht überhitzt ist. Anschließend erfolgt die Entspannung auf den unteren Prozessdruck in der Turbine $(4 \rightarrow 5)$. Der Kreisprozess wird durch die Kondensation geschlossen. Die Eintrittstemperatur des Kühlmediums im hier betrachteten Auslegungsfall entspricht der Jahresmitteltemperatur für den Raum München von 8,7 °C.

Die Analyse der Simulationsergebnisse erfolgt neben einer detaillierten Auslegung der Kraftwerkskomponenten mit Hilfe der Leistungsabgabe und über die Berechnung des thermischen Wirkungsgrads.

$$\eta_{\text{therm,Brutto}} = \frac{p_{\text{Brutto}}}{\dot{Q}_{\text{zu}}}$$

(1)

Da die EEG-Vergütung des erzeugten Stroms auf die Bruttoleistung gewährt wird, liegt auf deren Optimierung ein besonderes Augenmerk. Für die ganzheitliche Bewertung der Kraftwerkskonzepte werden neben der thermodynamischen Analyse auch Schlüsselkomponenten der ORC-Module (Turbine und Wärmeübertrager) für die konkreten Randbedingungen ausgelegt und darauf basierend die Wirtschaftlichkeit der betrachten Konzepte gegenübergestellt.

Die Auslegung der Wärmeübertrager erfolgt als Rohrbündelwärmeübertrager. Diese Bauart wird auch bei den im Betrieb befindlichen Kraftwerken favorisiert. Die Kondensation des Arbeitsmediums wird in einem luftgekühlten Kondensator realisiert. Gemäß des VDI-Wärmeatlas [4] werden in Abhängigkeit des Phasenzustands und der Bauart des Wärmeübertragers die geeigneten Korrelationen zur Bestimmung der Wärmeübertragungsflächen gewählt. Für die Turbine ist es aufgrund der kleinen Enthalpiegefälle möglich, eine einstufige axiale Gleichdruckturbine auszulegen, deren Turbinenrad direkt auf der Generatorwelle montiert werden kann. Dadurch werden eine zusätzliche Turbinenlagerung, eine Kupplung und auch Wellendichtungen vermieden. Die Turbine wird für n=3000 rpm ausgelegt, so dass ein Standard-Generator zum Einsatz kommen kann. Die Wirkungsgradvoraussagen basieren auf einem Inhouse-Turbinenauslegungstool, das den Beaufschlagungsgrad, das Machzahlniveau (Überschallturbinen), die Schaufelumlenkung als auch das Schaufelseitenverhältnis der tatsächlichen Auslegung berücksichtigt [5]. Die dargestellten Turbinendaten sind das Ergebnis einer Optimierung der Turbinengeometrie für jedes Fluid und dessen thermodynamische Auslegungsrandbedingungen.

Tabelle 2Betriebspara-
meter und thermischerBruttowirkungsgrad für
die gewählte Fallstudie
und die betrachteten
ORC-Arbeitsmedien.

Parameter	Isobutan	Isopentan	R134a	R245fa
Thermischer Bruttowirkungsgrad [%]	10,8	9,6	10,6	10,4
Bruttoleistung [kW]	4 311,6	3 799,4	5 226,0	3 998,7
Reinjektionstemperatur [°C]	57,8	58,9	40,0	60,7

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit werden die Bauteilkosten mit Hilfe von Kostenfunktionen nach Turton et al. [6] in Abhängigkeit der charakteristischen Größe der Komponente bestimmt. Die gesamten Herstellungskosten werden nach Bejan et al. [7] mit dem 6,32-fachen der aufsummierten Bauteilkosten abgeschätzt. Darüber hinaus wird für das ORC-Modul eine Handelsspanne von 30 % angenommen. Als Kennwerte werden die mittleren gemittelten Stromgestehungskosten (SGK) und die spezifischen Kosten des ORC-Moduls berechnet [8]. Hierzu werden gängige wirtschaftliche Randbedingungen und Preissteigerungsraten angenommen [9; 10]. In diesem Zusammenhang betragen die Explorationsund Bohrkosten für eine Dublette 45 Mio. €, die Aufwendungen für Versicherungen 2 Mio. € und sonstige Kosten 1,4 Mio. €. Die Betriebs- und Wartungskosten werden mit 4 % der Gesamtinvestitionen und der interne Zinssatz mit 6,5 % angesetzt.

Ergebnisse

Bewertung des Gesamtsystems

Für die geothermischen Kraftwerksprozesse ergibt sich in der Regel ein lokales Optimum für die Leistungsabgabe des Prozesses in Abhängigkeit der variablen Betriebsparameter Reinjektionstemperatur und oberer ORC-Prozessdruck. Ein Absenken der Reinjektionstemperatur unter den Optimalwert führt zwar zu einer gesteigerten Wärmeeinkopplung, was eine Steigerung des ORC-Massenstroms zur Folge hat, jedoch sinkt im Gegenzug der obere Prozessdruck und somit auch der thermische Wirkungsgrad des Sekundärprozesses. Dieser Zusammenhang ist in **Bild 2** beispielhaft dargestellt.

Für den 1-Druck-Prozess führt das Arbeitsmedium Isopentan zur geringsten



Bild 2 Bruttoleistung, Massenstrom, oberer Prozessdruck und thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Reinjektionstemperatur für den ORC-Prozess mit R245fa.

Bruttoleistung und R134a zur höchsten (Tabelle 2). Dabei gilt es anzumerken, dass die Reinjektionstemperatur in Abhängigkeit des eingesetzten Arbeitsmediums stark variiert. R245fa weist mit 60,6 °C die höchste Reinjektionstemperatur auf. Das Arbeitsmedium R134a führt aufgrund seiner Stoffeigenschaften zu einer hohen Auskühlung des Thermalwassers bis auf eine Reinjektionstemperatur von 40 °C. Damit verbunden ist eine deutlich gesteigerte Übertragung von thermischer Energie auf den Sekundärprozess, woraus eine hohe Leistungsabgabe resultiert.

Komponentenebene

Die Gegenüberstellung der Wärmeübertragungsflächen in **Tabelle 3** zeigt eine hohe Schwankungsbreite der Werte für die untersuchten Medien. So führt die Wahl von Isopentan zu einer 30 % größeren Übertragungsfläche im Vergleich zu R134a. Hierfür sind die Stoffeigenschaften bei Kondensationsbedingungen maßgeblich verantwortlich. Mit einem Anteil von durchschnittlich 70 %, bezogen auf die Gesamtübertragungsfläche, weist der Luftkondensator den höchsten Flächenbedarf auf. Dabei ist eine geringe Wärmeleitfähigkeit des Arbeitsmittels, wie im Fall von Isopentan oder R245fa, ausschlaggebend für geringe Wärmeübergangseigenschaften und somit für hohe Übertragungsflächen. Hinsichtlich der ORC-Speisepumpe führen hohe übertragene thermische Leistungen wie bei R134a oder Isobutan zu hohen ORC-Massenströmen und folglich zu einem hohen Eigenbedarf. Die Turbinenauslegung ergibt im Mittel ein Wirkungsgradniveau von 79,3 % (± 0.5 %), die Unterschiede zwischen den Arbeitsmedien sind relativ gering. Höhere Prozesswirkungsgrade gehen wie zu erwarten mit schlechteren Expansionswirkungsgraden einher (höhere Gefälle; das heißt Machzahlen). Da 1%-Punkt im thermischen Wirkungsgrad etwa 10 %-Punkte im Turbinenwirkungsgrad ausgleichen, ist es offensichtlich, dass letzterer kein ausschlaggebendes Kriterium für die Fluidauswahl sein kann. Tabelle 3 führt die notwendigen Außendurchmesser und das Verhältnis von

Erneuerbare Energien

Parameter	Isobutan	Isopentan	R134a	R245fa
Gesamte Wärmeübertragungsfläche [m2]	5 388,2	7 523,7	6 411,8	6 136,8
Leistung der Speisepumpe [kW]	316,2	77,6	619,0	133,4
Leistung der Turbine [kW]	4 311,6	3 799,4	5 226,0	3 998,7
Isentroper Turbinenwirkungsgrad [%]	79,6	79,8	79,4	78,8
Rotordurchmesser [m]	1,0	1,0	0,75	0,8
Schaufelhöhendurchmesserverhältnis [%]	4,6	15,6	6,9	17,9

4250 40 R245fa Isopentan 4000 spezifische Investitionskosten ORC (E/kW mittlere Stromgestehungskosten (ct/kWh) 35 Isobutan R134a 3750 30 3500 EEG-Vergütung 25 ct/kWh 25 3250 20 3000 15 2750 10 2500 5 2250 2000 Arbeitsmedien

Bild 3 Mittlere Stromgestehungskosten und spezifische Kosten für das ORC-Modul für die betrachteten Arbeitsmedien.

Schaufelhöhe zu Außendurchmesser für die vier ausgelegten Turbinen auf. Der Außendurchmesser steht für die Baugröße der Turbine und hat einen direkten Einfluss auf die Kosten. Das "Schaufelhöhendurchmesserverhältnis" ist ein Kriterium, ob die Schaufeln prismatisch ausgeführt werden können oder ob sie für h/D > 10%über die Schaufelhöhe verwunden sein müssen, um den prognostizierten Wirkungsgrad zu erreichen. Unter Einsatz von R134a ergibt sich die kleinste Turbine, deren Schaufeln prismatisch sein können, was insgesamt zu einem kostengünstigen Apparat führt. Isopentan benötigt das größte Rad und zusätzlich verwundene Schaufeln, was diese Turbine deutlich aufwendiger im Vergleich zur R134a-Turbine macht.

Ökonomische Bewertung der betrachteten Konzepte

Mit mittleren SGK von 16,3 Ct/kWh stellt die Wahl von R134a als Arbeitsmedium die wirtschaftlichste Lösung unter den gegebenen Randbedingungen dar (**Bild 3**). Im Hinblick auf die derzeitige EEG-Vergütung für die Tiefe Geothermie von 25 Ct/kWh führen auch die restlichen Arbeitsmedien zu einer wirtschaftlichen Umsetzung. Aufgrund der hohen spezifischen Investitionen für das ORC-Modul von 4056€/kW ist Isopentan die unrentabelste Lösung. Dies ist auf eine geringe Effizienz beziehungsweise Leistungsabgabe, eine kostenintensive Turbinengeometrie und den hohen Flächenbedarf des Luftkondensators zurückzuführen. Das Arbeitsmedium R134a hingegen ermöglicht aufgrund seiner Stoffeigenschaften eine Auskühlung des Thermalwassers bis auf den Minimalwert von 40 °C. Damit verbunden ist eine hohe Leistungsabgabe, die wiederum zu geringen spezifischen Kosten von 2360€/kW führt. Die Reinjektionstemperatur kann jedoch aufgrund der Gefahr von Mineralisation, so genannten Scalings, projektspezifisch limitiert sein. Ist dies der Fall, so stellt Isobutan als Arbeitsmedium mit SGK von 18,3 Ct/kWh eine wirtschaftliche Alternative dar.

Zusammenfassung

Das vorgestellte Fallbeispiel zeigt, dass nur eine ganzheitliche Betrachtung von thermodynamischen und strömungsmechanischen Aspekten eine belastbare wirtschaftliche Bewertung verschiedener Arbeitsmedien für geothermische ORC- Kraftwerke ermöglicht. Die berechneten Stromgestehungskosten verdeutlichen die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Umsetzung der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland. Hierfür sind eine individuelle Fluidauswahl und die entsprechende Anpassung der Kraftwerkskomponenten an die Randbedingungen zielführend. Die finale Festlegung auf ein Fluid erfolgt unter der Abwägung sicherheitstechnischer und klimarelevanter Aspekte.

 Tabelle 3
 Resultierende Dimensionierung und Kennwerte der Bauteile in Abhängigkeit des ORC-Arbeitsmediums.

Literatur

[1] Bundesverband Geothermie: Tiefe Geothermieprojekte in Deutschland (Projektliste), November 2016. Verfügbar unter: http://www.geothermie.de/fileadmin/ useruploads/wissenswelt/Projekte/Projektliste_Tiefe_ Geothermie 2016.pdf. (Zugegriffen: 25.1.2017).

[2] Heberle, F.; Obermeier, A.; Brüggemann,D.: Mögliche Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie durch den Einsatz von F-Gasen im Energiewandlungsprozess mittels ORC. Clim. Change, Bd. 16/2012.

[3] Europäisches Parlament und Rat: Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006, 2014.

[4] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC), Hrsg., VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2006.

[5] Weiß, A. P.; Zinn, G.; Weith, T.; Preißinger, M.; Brüggemann, D.: Turbinenauslegungsparameter als Kriterien für die Fluidauswahl für ein ORC-Minikraftwerk. In Tagungsband CO2-freie Stromerzeugung durch Abwärmenutzung für dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Fahrzeuge, Haus der Technik München, 2013.

[6] Turton, R.; Bailie, R. C.; Whiting, W. B.: Analysis, synthesis and design of chemical processes, 2nd edition. Old Tappan, NJ: Prentice Hall, 2003.

[7] Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M.: Thermal Design & Optimization. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[8] Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinienreihe VDI 2067 Blatt 1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung, 2012.

[9] Heberle, F.: Untersuchungen zum Einsatz von zeotropen Fluidgemischen im Organic Rankine Cycle für die geothermische Stromerzeugung, Bayreuth, 2013.

[10] Kaltschmitt M.; Janczik, S.: Vorbereitung des EEG-Erfahrungsberichts 2014 – Vorhaben IIb Stromerzeugung aus Geothermie, 2014.