

Thermodynamische Untersuchung zur effizienten Stromerzeugung geothermischer Energie.

Hans-Joachim Wiemer, Ginka Ehinger, Boris Bartenstein, D. Kuhn

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) / IKET

Keywords: ORC, Kraftwerkstechnik, Niedertemperatur Kreisläufe.

Zusammenfassung

Stromerzeugung aus geothermischer Energie ist in Deutschland ein noch wenig erschlossener Sektor. Bohrungen bis zu einer Tiefe von ca. 4 Kilometern ermöglichen Wassertemperaturen von rund 150 °C (423 K). Bei diesen für Kreisprozesse niedrigen Temperaturen kommen in der Regel organische Arbeitsfluide zum Einsatz. Die Stromerzeugung erfolgt so mit einem organic Rankine cycle (ORC). Dieser Beitrag beschreibt die numerische Berechnung von verschiedenen ORC's mit Hilfe des kraftwerkstechnischen Simulationstools IPSEpro. Aus den resultierenden thermodynamischen Daten ergeben sich der thermische Wirkungsgrad und die abgeführte Leistung des Kraftwerksprozesses. Diese Größen erlauben eine Beurteilung der Effizienz und der Ausbeute eines ORC. Zusätzlich sind die Berechnungen für verschiedene Arbeitsfluide, insbesondere Isopentan und R-245fa, durchgeführt worden. Die Validierung der Stoffdaten von IPSEpro erfolgte mit der Datenbank REFPROP des National Institute of Standards and Technology (NIST). Die Abweichungen von IPSEpro werden in diesem Beitrag diskutiert.

Eine Alternative zur geothermischen Stromerzeugung über ORC-Kraftwerke sind hybride Kraftwerke, bei denen die geothermische Wärme zur Vorwärmung des Wasserdampfkreislaufs (WSC) eines herkömmlichen Dampf-Kraftwerks verwendet wird. Dieser Beitrag vergleicht dazu aus technischer Sicht die Nettoabgabeleistung der Stromerzeugung innerhalb eines ORC mit einem WSC mit der kombinierten Stromerzeugung innerhalb eines hybriden Kraftwerks. Die Berechnungen zeigen, dass die Zunahme der Leistungsfähigkeit des WSC hauptsächlich durch den max. zulässigen Dampfgehalt bei gleichen Randbedingungen begrenzt wird. Der Vorteil der hybriden Vorwärmung des WSC eines großen Kraftwerks mit geothermischer Energie hängt vom Verhältnis der Abgabeleistung des WSC und des ORC ab, so dass sich ein merklicher Effekt auf die Effizienz erst bei mittleren bis kleinen WSC Blockgrößen einstellt. Die produzierbare Strommenge steigt gegenüber reinen ORC gerade bei großen hybriden WSC deutlich an.

1. Einleitung

Geothermische Energie ist die Energie, die in der Form von Wärme unter der Erdoberfläche gespeichert ist. Sein Potenzial ist auf einen menschlichen Zeitraum bezogen unerschöpflich und damit nachhaltig. In der Regel werden damit Prozess- und Fernwärmenetze versorgt, aber auch die Stromproduktion nimmt einen immer größeren Stellenwert ein. Die EU hat das Ziel, 50% des gesamten Energiebedarfs durch erneuerbare Energie bis 2050 zu decken, im Elektrizitätssektor bis 2010 12.5% und bis 2020 20%. Geothermische Energie hat das Potential 50% des jährlichen Energiebedarfs in Deutschland zu decken *Paschen et al. (2003)* und kann damit einen wesentlichen Beitrag zum EU-Ziel liefern. Der Hauptvorteil gegenüber den anderen erneuerbaren Energien ist die Grundlastfähigkeit der geothermischen Energie.

Die Herausforderung dabei ist die effiziente Produktion von Strom bei einem niedrigen Temperaturniveau von 100°C bis 200°C. Zur Stromerzeugung aus geothermischer Wärme wird heißes Mineralwasser mit bis zu 200°C aufwärts gepumpt und in elektrischen Strom umgewandelt.

Um elektrischen Strom bei solch niedrigen Temperaturen zu produzieren wird aufgrund der hohen Verdampfungstemperatur nicht der in der Kraftwerkstechnik etablierte Wasserdampf Rankine Zyklus (WSC) eingesetzt, sondern der Organic Rankine Cycle (ORC). Durch die Anwendung des ORC-Prozesses erstreckt sich der mögliche Nutzungsbereich über eine breitere Temperaturspanne der Wärmequelle. Diese reicht von rund 100°C bis zu 200 °C bei geothermischer Energie, bis über 300°C bei der Prozess-Abwärmenutzung. Als besonders interessante Anwendung gilt die Stromerzeugung aus der Abwärme von Heizkraftwerken oder die Nutzung des ORC in Verbindung mit der Solarthermie. Die ORC Anlagen haben eine Blockgröße von 200 kW_{el} bis 2 MW_{el}. In Abhängigkeit des eingesetzten Arbeitsfluids und des Kreislaufkonzepts wird ein elektrischer Wirkungsgrad von rund 12% erreicht(ohne Tiefpumpe).

Moderne Kohle-Kraftwerke erreichen hingegen Wirkungsgrade von 44% bei Temperaturen von 650°C und Drucken von ca. 250bar. Die Speisewasservorwärmung mit geothermischer Energie (hybride Kraftwerke) erscheint eine effizientere Art der Stromerzeugung zu sein als ein einzelnes ORC Kraftwerk.

Zur Optimierung der Kraftwerkskonzepte hinsichtlich der erzeugten Strommenge ist der Einsatz von thermodynamischen Simulationstools notwendig. Dazu verwenden wir die Kraftwerksimulation IPSEpro von Simtech mit der Stoffdaten-Bibliothek(LTP) für niedrige Temperaturen. Diese Bibliothek schließt die Fluid-Eigenschaften von Isopentan, Neopentan, Pentan, R245fa, Toluol und von MDM ein. Der Fokus der Untersuchung liegt auf Isopentan als Referenzflüssigkeit und R245fa. Beides sind organische Flüssigkeiten mit unterschiedlichem kritischen Temperaturen und molaren Gewichten. Wie in Abb.1 dargestellt zeigt R245fa ein weniger starkes retrogrades Verhalten als Isopentan, eine für den Einsatz in Kraftwerksprozessen wichtige Größe.

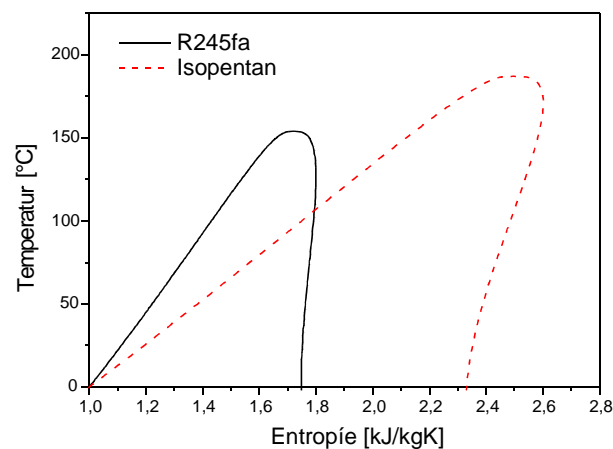


Abb. 1: Temperatur Entropy Diagramm von Isopentan and R245fa.

Mit dem Simulationstool ist es auch möglich, die Gesamtleistung eines hybriden Kraftwerks zu berechnen. Ein Nachteil des Hybridkonzepts ist die eingeschränkte Standortwahl aufgrund des begrenzten Abstandes der Wärmeübertragung. In dieser Arbeit wird nicht nur der Wirkungsgrad der Kraftwerkskreisläufe betrachtet, sondern vor allem die erzeugte Leistung. Diese liefert einen besseren Vergleich zwischen verschiedenen Kraftwerkskonzepten bzw. Arbeitsfluiden, die die entscheidenden Faktoren bei der Stromerzeugung darstellen.

2. Überprüfung der Stoffeigenschaften und Simulation.

Die Stoffparameter, ausgedrückt als krit. Druck, krit. Temperatur, Enthalpie und Entropie bilden die Grundlage der Simulationsrechnungen. Um die Genauigkeit der Stoffdaten zu überprüfen vergleichen wir die Stoffdaten von IPSEpro mit der Datenbank REFPROPdes National Institute of Standards and Technology *NIST(2007)*. Die zwei verwendeten Flüssigkeiten sind Isopentan als Referenzfluid und R245fa (Tab. 1).

Table 1:Stoffdaten von Isopentan and R245fa.

Name	Struktur	Krit. Temperatur °C	Krit. Druck bar	Molw. kg/kmol
Isopentan	2-Methylbutan <chem>C5H12</chem>	187,25	33,8	72,15
R245fa	1,1,1,3,3-Pentafluoropropane <chem>C3H3F5</chem>	154,1	36,4	134,03

2.1 Vergleich der Fluideigenschaften

Die folgenden Tabellen zeigen die charakteristischen Eigenschaften der benutzten Flüssigkeiten und die Referenzpunktdaten, wobei der Referenzpunkt für den Vergleich mit anderen Datenquellen bedeutsam ist. Im Fall von R245fa ist der Wert der Enthalpie nahe 200 kJ/kg und die Entropie beträgt ca. 1 kJ/kgK. Dieses entspricht nahezu dem Bezugspunkt des IIR (international Institute of Refrigeration), es werden aber die in Tab 2 ermittelten Referenzdaten in den weiteren Simulationen verwendet.

Table 2: Referenzpunkte von Isopentan und R245fa.

Fluid	Temp. °C	Druck bar	Spez. Enthalpie kJ/kg	Spez. Entropie kJ/(kg K)
Isopentan	25	0,01	0	0,53207
R245fa	0	0,01	200,46	1,0016

Die relative Abweichung der spezifischen Enthalpie h aus NIST-Daten und IPSEpro wird mit Gleichung (1) ermittelt. Die Berechnung der Entropieabweichung erfolgt analog.

$$\text{Abweichung} = \frac{h_{NIST} - h_{IPSEpro}}{h_{NIST}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Abb. (2) zeigt die Abweichungen von Enthalpie und Entropie für Isopentan und R245fa bei verschiedenen Temperaturen. Die Abweichungen des Isopentans verringern sich bei Zunahme der Temperatur. Im Gegensatz dazu erhöht sich die Abweichungen von R245fa mit steigender Temperatur. Insgesamt übersteigen die Abweichungen aber nicht 1,5%.

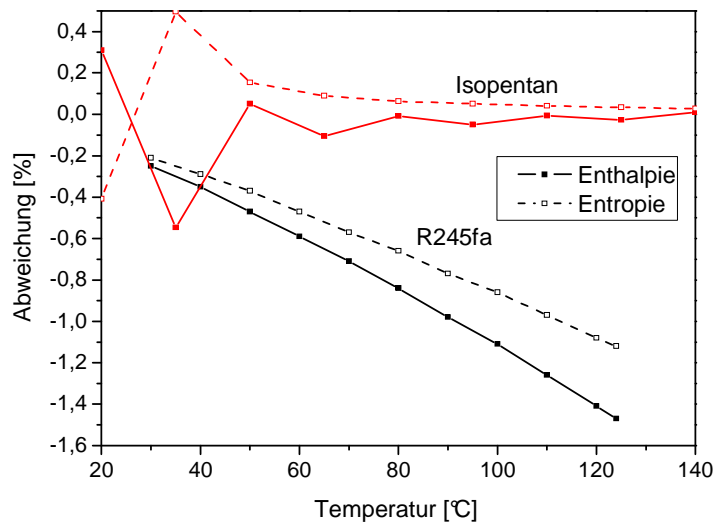


Abb. 2: Abweichungen der Enthalpie und Entropie von Isopentan und R245fa.

So können wir feststellen, dass es eine gute Übereinstimmung der untersuchten Fluide beim Vergleich der in IPSEpro implementierten Stoffeigenschaften mit den REFPROP-Daten gibt.

2.2 Überprüfung und Simulation

Um das Simulationswerkzeug IPSEpro zu validieren ist es notwendig eine vollständige Simulationsrechnung mit Referenzdaten zu vergleichen. Zu diesem Zweck verwendeten wir die Daten von Köhler (2005) in Tabelle 3. Um den Ablauf des Kraftwerkskreislaufs und die einzelnen Prozessschritte zu veranschaulichen, ist der qualitative Verlauf des Kreisprozesses in einem Temperatur / Entropie- Diagramm Abb. 3 aufgetragen.

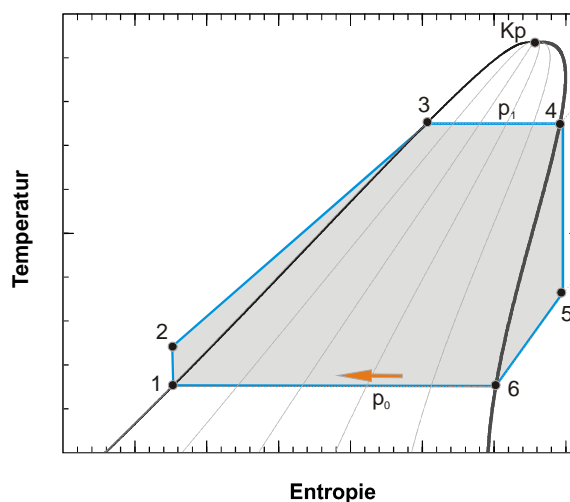


Abb 3: Qualitativer idealer Kreisprozess im Temperatur / Entropie-Diagramm von Isopentan.

Tabelle 3: Vergleich der Simulationsrechnung von Cycle-Tempo aus Köhler (2005) und IPSEpro-Daten.

Prozess Schritt	Temperatur [°C]	Druck [bar]	Enthalpie [kJ/kg]	Entropie [kJ/kgK]
1→2 Pumpe	38,3/38,3	6,30/6,30	336,9/304	1,08/1,08
2 → 3,4	88/88	5,50/5,50	412,6/412,4	1,18/1,17
4→5 Turbine	61,4/61,4	1,50/1,50	36/36,7	0,02/0,03
5→1 Kondensator	61,6/ 61,6	1,50/1,50	39,7/41	0,12/0,12

Dieser grundlegende Fall schließt eine konstante Wassertemperatur von TW1=150°C, Rücklauf­temperatur TW2=90 °C und einen Massenstrom $m_w = 20$ kg/s ein. Dieses führt zu einer Wärmeleistung von $Q_{th} = 5016$ kW. Das Kühlsystem hat einen Druckverlust von 1 bar und eine Temperatur von 15°C (Wasser) und 20°C (Luft) mit einer Grädigkeit von 5 K (Wasser) und von 10 K (Luft). Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung bei der Temperatur, dem Druck und der Entropie. Nur die Enthalpie weist einen Unterschied von 9.8% von Schritt 1 nach 2 auf. Diese Differenz liegt in der unterschiedlichen Wärmeaustauscherverschaltung bei diesem Prozessschritt. Die anderen Abweichungen sind kleiner als 1%.

2.3 Vereinfachtes Modell

Wir beginnen die Berechnung mit einer theoretischen Betrachtung, die geeignet ist, die verschiedenen Einflüsse bezüglich der Leistung und der Effizienz auszuwerten. Dieses Modell umfaßt keine Druckverluste und Wirkungsgrade der Kreislaufkomponenten. Es wird ein minimaler Temperaturunterschied von 20 K für die Wärmeübertragung vom Thermalwasser auf das ORC Fluid angenommen. Die Wärmeübertragung in den Kreisprozess und die Bilanz der Energieflüsse nach Abb. 4 , kann mit Gleichung 2 beschrieben werden.

$$\dot{Q}_{zu} + \dot{W} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 \tag{2}$$

$$\dot{m}_{ORC} = \frac{\dot{Q}_{ORC}}{r_{ORC}} = \frac{\dot{Q}_w}{r_{ORC}} = \frac{\dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w,ein} - T_e - \Delta T_{min})}{h_4 - h_3} \tag{3}$$

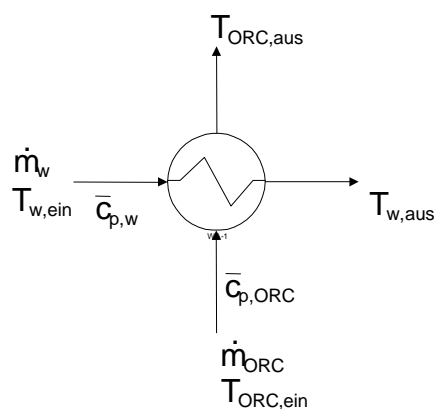


Abb. 4: Wärmetauscher Modell

Der ORC Massenstrom wird aus der Energiebilanz des Verdampfers (Gleichung 3) berechnet. Hierin enthalten sind der Wärmestrom Q, Verdampfungsenthalpie r, Verdampfungstemperatur T_e

und die minimale Temperaturdifferenz ΔT_{\min} des Wärmetauschers. Somit hängt der Massenstrom des ORC Fluids im wesentlichen von der Verdampfungstemperatur und der Verdampfungsenthalpie im ORC Kreislauf ab. Aus diesem Grund wird der Massenstrom für jede Verdampfungstemperatur im ORC Kreislauf vorab berechnet und in der Simulation als konstanter Wert eingesetzt. Die Rücklauf­temperatur des Thermalwassers wird mit Gleichung 4 berechnet:

$$T_{W,aus} = (T_e + \Delta T_{\min}) - c_{pm} \frac{T_e - T_{con}}{r_{ORC}} (T_{W,ein} - T_e - \Delta T_{\min}) \quad (4)$$

Mit der Verdampfungstemperatur T_e , der Thermalwassertemperatur am Eintritt $T_{W,ein}$ und der Kondensatortemperatur T_{con} . Die Turbinenwellenleistung des ORC ergibt sich aus Gleichung 5 nach Bejan (1996).

$$\dot{W} = \eta_{is} \cdot \eta_{mech} \cdot \dot{m} \cdot c_{pm} \cdot \left(1 - \frac{T_{con}}{T_e}\right) \cdot (T_{W,ein} - T_{W,aus}) \quad (5)$$

Gleichung 5 gilt für den Fall, dass $\dot{m} = \dot{m}_{ORC}$ und $C_{p,m}$ den arithmetischen Mittelwert der Wärmekapazität des ORC Fluids darstellt. Es werden $T_{W,ein}$ und $T_{W,aus}$ als obere und untere Thermalwassertemperatur angesetzt. Der isentrope Wirkungsgrad der Turbine η_{is} ist 0.75 und $\eta_{mech} = 1$.

Die Abb. 5 zeigt die Abhängigkeit der Wellenleistung von der Rücklauf­temperatur des Thermalwassers $T_{W,aus}$. Es ist einsichtig, dass die Berechnung mit einer größeren Temperaturspanne 175/30 und 150/10 zu einer höheren Leistung führt, als bei der Referenzrechnung mit 150/30. Zusätzlich verschiebt sich das Maximum der Wellenleistung zu niedrigeren Wassertemperaturen $T_{W,aus}$, bei niedrigeren unteren Prozesstemperaturen (150/10).

Die Senkung der Kondensationstemperatur simuliert vereinfacht die saisonalen Schwankungen eines Jahres. Im Winter kann die Umwelt als endlose Wärmesenke mit Temperatur unter 5 °C betrachtet werden. Damit ist eine Kondensationstemperatur von 10°C realistisch. Eine ausführliche Betrachtung des Effektes der saisonalen Schwankungen auf die Stromproduktion unter Berücksichtigung der Kraft/Wärme-Kopplung wurde vom *Kongressband Geothermischer Vereinigung (2008)* durchgeführt.

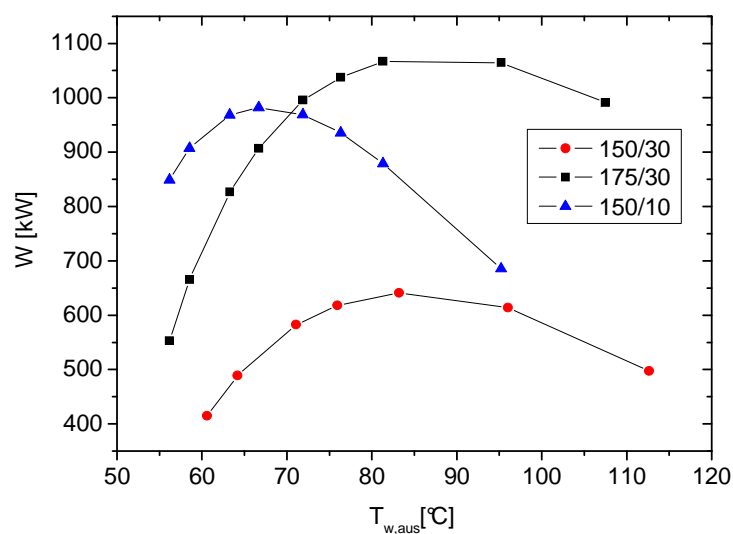


Abb. 5: Turbinenleistung mit vereinfachten Modell, Isopentan und unterschiedlichen oberen und unteren Prozesstemperaturen $T_{W,ein}/T_{con}$.

Die berechnete Abgabeleistung von R245fa zeigt nur kleine Abweichungen zu Isopentan aufgrund der ähnlichen physikalischen Eigenschaften wie z.B. Dampfdruck. Der größte Unterschied besteht im fast doppelt so großen Massenstrom von R245fa. Als Grenzfall führt ein Massenstrom im ORC >0 kg/s zum maximalen Wirkungsgrad, es wird aber in diesem Punkt keine Leistung produziert. Die Darstellung der Abgabeleistung als Funktion der Wasserrücklauftemperatur ermöglicht die Zuweisung der maximalen Wellenleistung zu einer bestimmten Temperatur. Diese Temperatur entspricht wiederum einer bestimmten Verdampfungstemperatur des ORC-Fluids. Für den Bereich der kombinierten Strom- und Wärmeproduktion ergibt sich eine verringerte Leistung, die Wärmeversorgung kann jedoch in Abhängigkeit der erforderlichen Rücklauftemperatur ohne großen Aufwand in das Kraftwerkskonzept eingebunden werden. Es ist dabei zu beachten, dass der Bereich niedriger Rücklauftemperaturen in Abb. 5 auch zu geringen Wirkungsgraden führt und damit ein Auslegungspunkt eines Kraftwerks links des Leistungsmaximums vermieden werden muss.

Aufgrund der weitgehenden Vernachlässigung von Verlusten und Vereinfachungen liefert diese Berechnung unrealistische hohe Wirkungsgrade und Leistungen. Folglich haben die Kurven in Abb. 5 einen qualitativen Charakter und vermitteln einen Eindruck über die physikalischen Zusammenhänge. Um realistischere Werte zu erhalten ist es notwendig eine numerische Simulation zu verwenden und Verluste für die Berechnung zu definieren.

$$\eta = \frac{P_{\text{gen}} - P_{\text{eig}}}{Q_{\text{zu}}} \cdot 100\% \quad (6)$$

In Gleich. 6 ist P_{gen} die Generatorleistung und P_{eig} , der Eigenbedarf des Kraftwerks ohne die Thermalwasserpumpe und Q_{zu} definiert den Wärmeeintrag vom Thermalwasser in den ORC.

3. Simulation

IPSEpro liefert verschiedene Module, um ein Simulations-Fließschema nach Abb.6 aufzubauen.

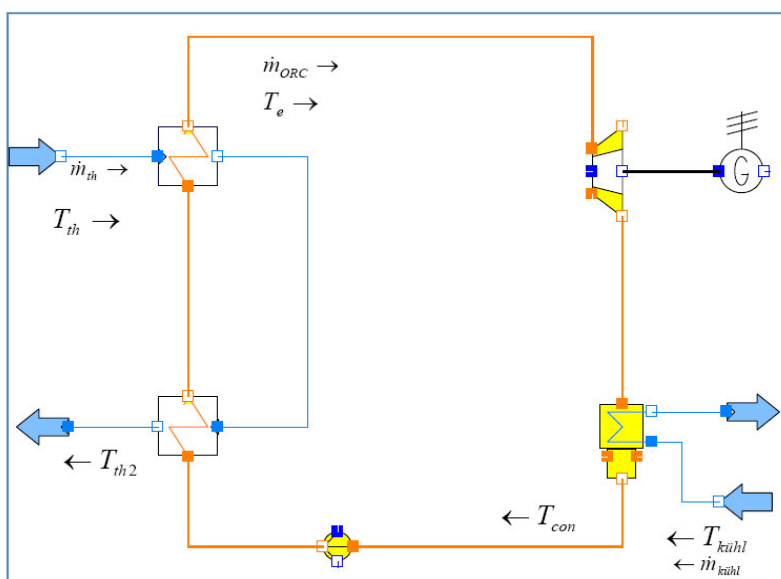


Abb. 6: Kreislaufmodell in IPSEpro. Die angegebenen Werte sind zu definieren.

Diese Abbildung zeigt die zwei Wärmeaustauscher, die Turbine, den Kondensator und die Kreislaufpumpe. Es muss berücksichtigt werden, dass die Thermalwasserpumpe und das

Luftkühlungssystem nicht in dieser Berechnung enthalten sind. Das Programm löst die Energie- und die Massenbilanz und gibt die Leistung, den Wirkungsgrad des Kreislaufs, Enthalpie, Entropie, sowie Druck und Temperatur vor und nach den einzelnen Modulen des ORC aus.

In den drei betrachteten Temperaturspreizungen Abb. 7 wird der Wirkungsgrad des ORC berechnet. Der Wirkungsgrad nimmt mit steigendem Massenstrom in allen drei Fällen ab. Für den Fall 150/30 erreicht man den niedrigsten Wirkungsgrad, während sowohl der Fall 150/10 mit einer verringerten Kondensatortemperatur (Winterbetrieb) und der Fall 175/30 mit einer erhöhten Thermalwassertemperatur fast ähnliche Wirkungsgrade liefern. Dies entspricht auch der prinzipiellen Definition nach Carnot *Baehr (2009)* durch die obere und untere Prozesstemperatur in Gleich. 7.

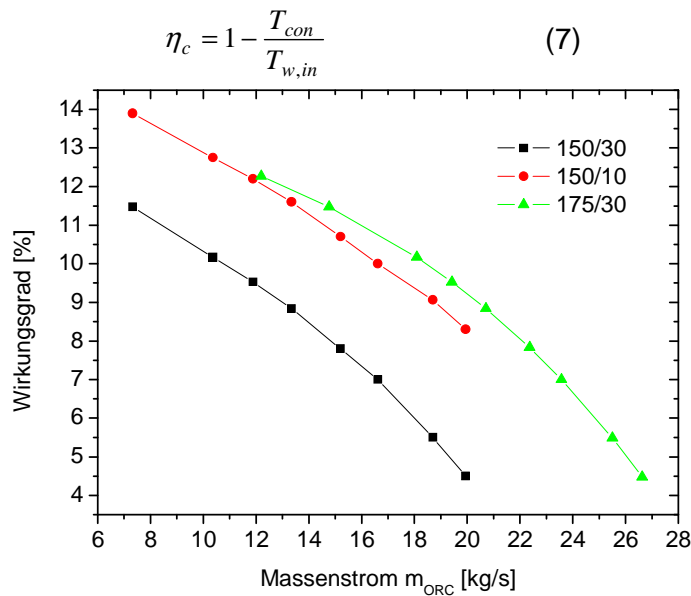


Abb 7: Isopentan Wirkungsgrad für verschiedene untere und obere Prozesstemperaturen $T_{w,in}/T_{con}$ aus ISPEpro.

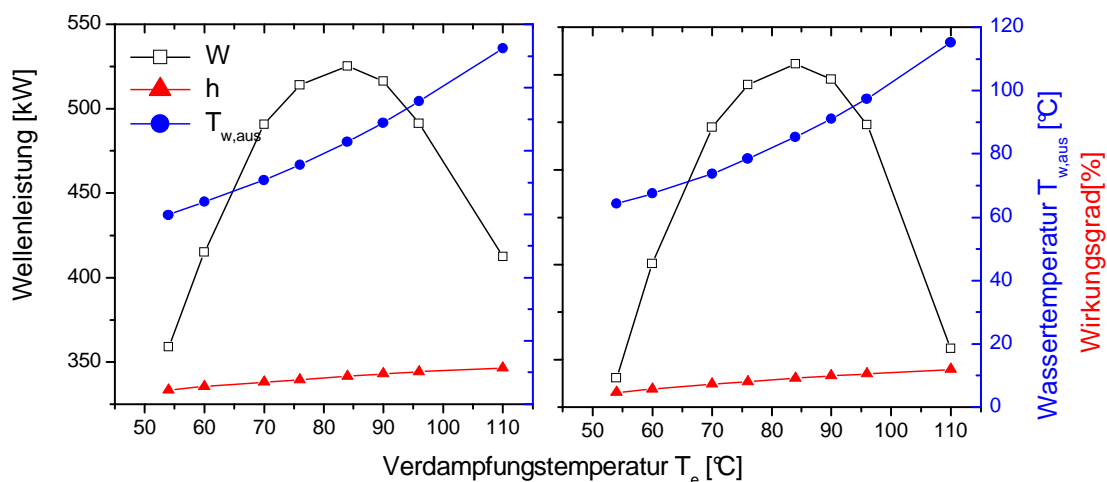


Abb. 8a: Wellenleistung W , Wassertemperatur $T_{w,aus}$ und Wirkungsgrad h von Isopentan aus ISPEpro und Abb. 8b R245fa.

Die Zunahme der Verdampfungstemperatur des ORC Zyklus führt zu der Tatsache, dass der Wärmestrom, der durch das Thermalwasser übertragen werden kann abnimmt und so eine Verringerung der Leistung erfolgt Abb. 8a und 8b.

Der Wirkungsgrad des Kreisprozesses erhöht sich mit steigender Verdampfungstemperatur. Folglich ist der Wirkungsgrad von den Prozesstemperaturen, abhängig, wobei zwischen den zwei untersuchten Fluiden kein wesentlicher Unterschied hinsichtlich des Wirkungsgrads festzustellen ist. Die simulierte Leistung ist auch im Fall R245fa niedriger als die theoretisch berechnete Leistung aufgrund der Vernachlässigung der Verluste. Die maximale mechanische Leistung beider Flüssigkeiten unterscheidet sich ein wenig mit 525 kW für Isopentan und 506 kW für R245fa. Die genaue Betrachtung des Betriebsdrucks beider Fluide zeigt, dass Isopentan mit einem Betriebsdruck von 5,8 bar, gegenüber R245fa mit einem Betriebsdruck von 7 bar, technisch günstiger liegt. Auch die Auftragung der ORC-Massenströme in Abb. 10 ergibt, dass bei einem konstanten Wirkungsgrad von 8,9% das R245fa mit einem Massenstrom von 18,7 kg/s, verglichen mit 13,3 kg/s bei Isopentan einen größeren Massenstrom erfordert. Bei diesen Massenströmen ergibt die Simulation die maximale Turbinenleistung.

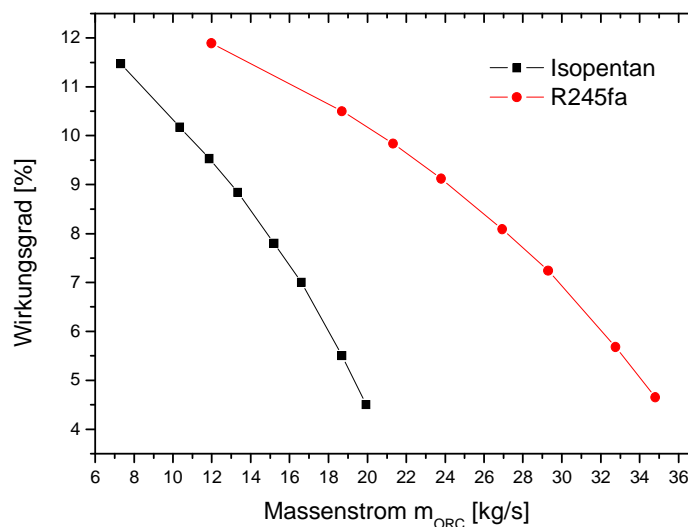


Abb. 10: Wirkungsgrad für Isopentan und R245fa als Funktion des Massenstroms.

Damit führen in dieser Simulation höhere Massenströme und höhere Drücke zu geringeren Wirkungsgraden und auch höherem Verschleiß. Ein weiteres Argument für den Einsatz von Isopentan ist, dass die Leistung nicht so deutlich von der Kondensationstemperatur abhängt wie im Fall von R245fa. So ergeben sich im Sommer bei erhöhter Umgebungstemperatur geringere Leistungsverluste.

3.2 Hybrid-Kraftwerk

3.2.1 Simulation des ORC Referenz Kraftwerks

Um den Effekt einer Speisewasservorwärmung in einem Dampf-Kraftwerk mit geothermischer Wärme zu bewerten, werden die folgenden Bedingungen definiert. Wärmeeintrag durch das Thermalwasser $Q_g=5$ MW ohne Verluste. Die Thermalwassertemperatur am Eintritt beträgt 150°C . Der isentrope Wirkungsgrad der ORC Turbine wird auf 0,75 festgelegt und der Pumpen-Wirkungsgrad mit 0,84 eingestellt. Die Unterkühlung im Kondensator beträgt 2 K bei einer Kondensatoreingangstemperatur von 15°C . Der Wärmeau-stauscher-Druckverlust wird mit 0,2 MPa und der Wärmeverlust mit 1% eingestellt. Der Generatorwirkungsgrad folgt mit 0,98%.

Die numerische Berechnung mit Isopentan liefert die Basiswerte für den Vergleich mit dem Dampfkreislauf:

- Elektrische Leistung gab 577 Kilowatt aus (Leistungsfähigkeit 11,55%)
- Elektrische Nettoabgabeleistung 468,5 Kilowatt.

Dieses sind die Parameter des Referenzfalls, mit dem der Vergleich zwischen ORC und dem hybriden Kraftwerk durchgeführt wird.

3.2.2 Simulation des Hybrid-Kraftwerks

Drei verschiedene Blockgrößen von Dampfkraftwerken werden berechnet. Um die Berechnung zu vereinfachen hat der Dampfkreislauf keine Speisewasservorwärmung (ausgenommen die geothermische Wärmeeinkopplung), die üblicherweise bei großen Dampfkraftwerken zum Einsatz kommt. Somit ist der Wirkungsgrad nicht so hoch wie möglich, aber die grundlegenden funktionalen Abhängigkeiten sind vorhanden Abb. 11.

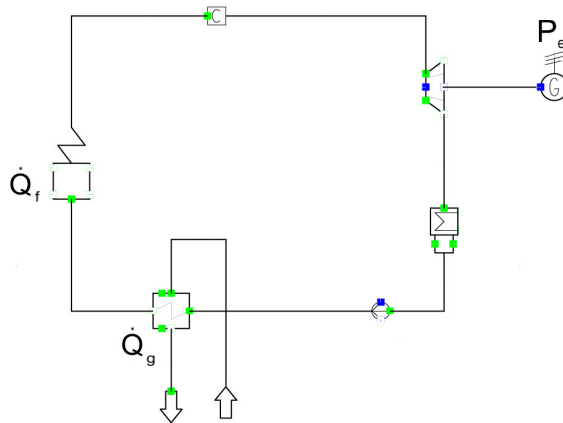


Abb. 11 Fließschema in IPSEpro mit Q_f als der Dampfkesselhitzeingang, Generatorabgabeleistung P_{EL} und der geothermische Wärmeaustauscher mit Q_g .

Table 4 : Result of hybrid plant simulation

Blockgröße	100 MW	100 MW	1000 MW
Dampfparameter	4,1 MPa / 440°C	25MPa / 560°C	25MPa / 560°C
Verdampferleistung MW	340	280	2800
Wirkungsgrad %	29,42	35,64	35,64
Elektr. Leistung kW	100027	99794	997937
Elektr. Leistung mit geoth. Vorwärmung kW	101663	101774	999917
Differenz kW	1636	1980	1980

Die Resultate der hybriden Kraftwerkssimulation zeigen, dass der Anteil der geothermischen Wärme von dem höheren Wirkungsgrad des Dampfzyklus profitiert. Im Falle der kleinen Blockgröße

(100MW) mit den Dampfparametern von 4,1 MPa und 440°C ergibt der Vergleich eine Differenz von 1636 kW. Mit verbesserten Dampfparametern von MPa 25 und 560°C steigt der Differenzbetrag auf 1980kW. Den gleichen Wert erhält man auch für eine 10 mal größere Blockleistung. Der Vergleich der Zunahme der Dampfkreislaufleistung mit der Kreislaufleistung eines einzelnen ORC, resultiert in einer 3,4 mal höheren elektrischen Leistung für die hybride Anlage. Auch der Wirkungsgrad im Fall von (100 MW) steigt leicht um 0,048% Punkte. Mit Zunahme der Blockgröße wird dieser Wirkungsgrad steigernde Effekt vernachlässigbar.

Es sei angemerkt, dass diese Berechnungen ohne Berücksichtigung der Thermalwasserpumpe erfolgt sind. Die Leistung zur Förderung des Thermalwassers erreicht rund 1/3 des erzeugten Stroms (in Abhängigkeit der Fördertiefe). Auch aufgrund anderer Unwägbarkeiten wie Verunreinigung ist bei realen Kraftwerken mit deutlich niedrigeren elektrischen Leistungen zu rechnen. Zusätzliche Simulationen und experimentelle Daten sind notwendig, um den Kraftwerksentwurf zu verbessern.

4. Ergebnis

Aufgrund der geologischen Bedingungen in Deutschland können Thermalwassertemperaturen bis zu rund 200°C erwartet werden. Aus diesem Grund ist die Entwicklung eines leistungsfähigeren Kraftwerks erforderlich. In diesen Kraftwerken wird die Wärme des Thermalwassers auf eine organische Sekundärflüssigkeit übertragen, die bei einer niedrigeren Temperatur als Wasser verdampft. Der Betrieb des Kraftwerks verläuft ähnlich wie bei Wasser-Dampfkraftwerken. Das Arbeitsfluid wird bis zur Sättigung verdampft und anschließend in einer Turbine entspannt. Wegen der noch relativ hohen Temperaturen am Turbineaustritt ist eine weitere Nutzung der Abwärme über eine Kraft/Wärme-Kopplung ratsam.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt bei der Stromerzeugung. Das Energiekonzept für den Betrieb des Kraftwerks entscheidet über die Auswahl des Arbeitsfluids. Es ist energetisch vorteilhaft den Prozess so zu gestalten, dass die kritische Temperatur des Arbeitsfluids ein wenig höher als die obere Prozesstemperatur ist. So kommen nur wenige Flüssigkeiten in die engere Wahl, abhängig von der Quelltemperatur. Die Thermalwasserparameter legen den Entwurf eines Kraftwerks fest. Zwei Fluide wurden betrachtet, deren kritische Temperatur- und Dampfdrucklage im gewünschten Bereich liegen.

Die theoretische Berechnung der Prozessparameter, für Isopentan und 1,1,1,3,3-Penta-fluoropropane (R245fa), erfolgten für drei Fälle unterschiedlicher Thermalwasser- und Kondensationstemperaturen. Ein Ziel dieser Arbeit war es, die verschiedenen Kreisprozesse zu veranschaulichen und die erzielten Leistungen zu vergleichen. Für die Auswertung wurden die Parameter Leistung, Wirkungsgrad und der Punkt der maximalen Leistung ermittelt. Auch die Prozessparameter Verdampfungstemperatur, Verdampfungsdruck, die Dampfqualität, und die Kondensationstemperatur sind für die Optimierung und Auslegung des Kreislaufs wichtige Größen.

In dieser Arbeit lösen wir die Energiebilanz eines ORC mit dem Simulationswerkzeug IPSEpro, um die Leistung und den Wirkungsgrad des Isopentans mit R245fa zu vergleichen. Die Validierung der Stoffdaten von IPSEpro zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Stoffdatenbank REFPROP. Auch der Vergleich einer kompletten Simulationsrechnung mit Daten aus Köhler (2005) liefert nur geringe Abweichungen. Die simulierten Kreisprozesse zeigen den Verlauf der Leistung und des Wirkungsgrads mit steigender Verdampfungstemperatur der Fluide. Während die Leistung ein Maximum aufweist, steigt der Wirkungsgrad mit steigender Verdampfungstemperatur. In der Simulationsrechnung liefert das Isopentan 20 kW oder 4% mehr Strom als R245fa (im Punkt der maximalen Leistung) für Prozesstemperaturen von 150°C / 30°C. Als zusätzlicher Aspekt wird die Kombination eines Dampfkraftwerks mit geothermischer Vorwärmung betrachtet (Hybrid-Kraftwerk). Mit einem vereinfachten Modell konnte gezeigt werden, dass das hybride Kraftwerk im Vergleich zu einem reinem ORC 3,4 mal höhere elektrische Leistungen erzeugen kann.

Quellenangaben

- Baehr H.D: Thermodynamische Grundlagen und technische Anwendungen, Springer Verlag 13. Aufl., Berlin 2009
- Bejan, A., 1996: 'Models of power plants that generate minimum entropy while operating at maximum power.' Am. J. Phys., v. 64, p. 1054 - 1059.
- Kongressband Geothermischer Vereinigung: Geothermische Vereinigung, Kongressband des Geothermiekongresses. 11.-13. November 2008, Karlsruhe
- Herbst G: Simulation eines Niedertemperaturkreisprozesses zur Stromerzeugung mit IPSEpro, Diplom thesis, Hochschule Karlsruhe 2009
- Huenges, E., 2001: Strom aus Erdwärme in Deutschland, FVS Themen 2001
- IPSEpro: homepage www.simtechnology.com
- Köhler S: Geothermisch angetriebene Dampfprozesse Analyse und Prozessvergleich binärer Kraftwerke, Phd-Thesis, TU Berlin 2005
- NIST : Standard Reference Program REFPROP, U.S. Department of Commerce Technology Administration, Vers.8.0,2007
- Paschen H., Oertel D., Grünwald R. : Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland, Das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) 2008

KIT Campus Nord, IKET, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Wiemer@kit.edu