

Konzepte zur effizienteren geothermischen Stromerzeugung auf Basis des Organic Rankine Cycle

F. Heberle, M. Preißinger und D. Brüggemann

Universität Bayreuth

Keywords: Kraftwerkstechnik, Organic Rankine Cycle, Optimierungsstrategien

Zusammenfassung

Aufgrund des hohen technischen Potentials geothermischer Ressourcen auf einem Temperaturniveau unter 180 °C ist eine Optimierung bestehender Kraftwerkskonzepte von besonderem Interesse. Der Schwerpunkt dieser Betrachtung liegt auf dem Einsatz des Organic Rankine Cycle als Kraftwerkstechnologie. Ausgehend von einem Standardkonzept mit dem Arbeitsmedium Isopentan werden verschiedene Optimierungsansätze untersucht.

In Abhängigkeit der Thermalwassereintrittstemperatur ergeben sich signifikante Wirkungssteigerungen des Kreisprozesses durch eine verbesserte Wahl des Arbeitsmediums, einer Entspannung auf Nieder- und Hochdruckniveau oder eine überkritische Fahrweise. Für Thermalwassertemperaturen unter 130 °C stellen zeotrope Fluidgemische eine interessante Optimierungsstrategie dar. Durch eine optimale Anpassung der Temperaturprofile des Kühlwassers und des Fluidgemisches im Kondensator steigt das Druckverhältnis der Entspannung und die Exergieverluste im Kondensator sinken. Es zeigt sich, dass die Wahl eines thermodynamisch und ökonomisch sinnvollen Anlagenkonzepts stark abhängig von den geologischen Randbedingungen ist.

1. Einleitung

Für Thermalwassertemperaturen unter 180 °C ist eine Stromerzeugung ausschließlich in binären Kraftwerken technisch und wirtschaftlich sinnvoll. Derzeit sind weltweit 155 binäre Kraftwerke mit einer elektrischen Leistung von über 250 MW in Betrieb [1]. Mit dem Organic Rankine Cycle (ORC) und dem Kalina Cycle (KC) stehen entsprechende Technologien zur Nutzung thermischer Energie auf Niedertemperaturniveau zur Verfügung. In beiden Fällen handelt es sich um Dampfprozesse, die dem Rankine-Prozess prinzipiell ähnlich sind. An Stelle von Wasser wird im Fall des ORC ein organisches Arbeitsmittel verwendet und im Fall des KC ein Ammoniak-Wasser-Gemisch.

Im Weiteren wird am Beispiel des ORC, ausgehend vom Standardkonzept, das Optimierungspotential dieser Technologie aufgezeigt. Vielversprechende Strategien zur Effizienzsteigerung sind die Wahl eines an die Wärmequelle angepassten Arbeitsmittels, die zweistufige Entspannung, die überkritische Fahrweise und der Einsatz binärer Stoffgemische.

2. ORC-Standardkonzept

Eine vereinfachte Prinzipskizze des zu Grunde gelegten Standardkonzepts einer geothermischen Stromerzeugung mittels ORC zeigt Abb.1. Der Thermalwasserstrom wird in zwei Schritten mit dem Arbeitsmedium gekoppelt. Zunächst erfolgt im Vorwärmer die Erwärmung des Arbeitsmittels bis zum Siedepunkt und anschließend die vollständige Verdampfung. Der Dampf wird in einer Turbine entspannt. Es schließt sich eine interne Wärmerückgewinnung im Rekuperator an. Die Kondensation des Arbeitsmittels und die Druckerhöhung durch die Speisepumpe vervollständigen den Kreisprozess.

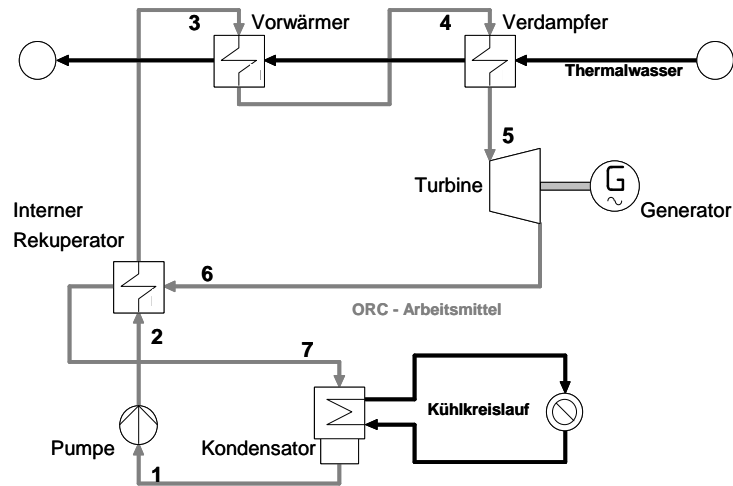


Abb. 1: Schaltbild eines geothermischen ORC-Kraftwerks

Ein häufig verwendetes Arbeitsmittel ist der natürliche Kohlenwasserstoff Isopentan, welches beispielsweise auch im Kraftwerk Landau (Pfalz) zum Einsatz kommt. Das in Abb. 2 dargestellte T,s -Diagramm von Isopentan zeigt schematisch den ORC mit zugehöriger Wärmequelle und -senke. Deutlich wird die Limitierung des Prozess durch die Einhaltung der Temperaturdifferenz am Pinch-Punkt. Der isotherme Phasenübergang des betrachteten Reinstoffs führt zu einer Begrenzung der oberen und unteren Prozess Temperatur. Im Fall der Verdampfung tritt der Pinch-Punkt am Zustandspunkt 4 auf und im Fall der Kondensation am Zustandspunkt 7. Auf eine Überhitzung des Mediums am Zustandspunkt 5 wird verzichtet, da aufgrund der überhängenden Taulinie keine Tropfenschlaggefahr für die Turbine besteht.

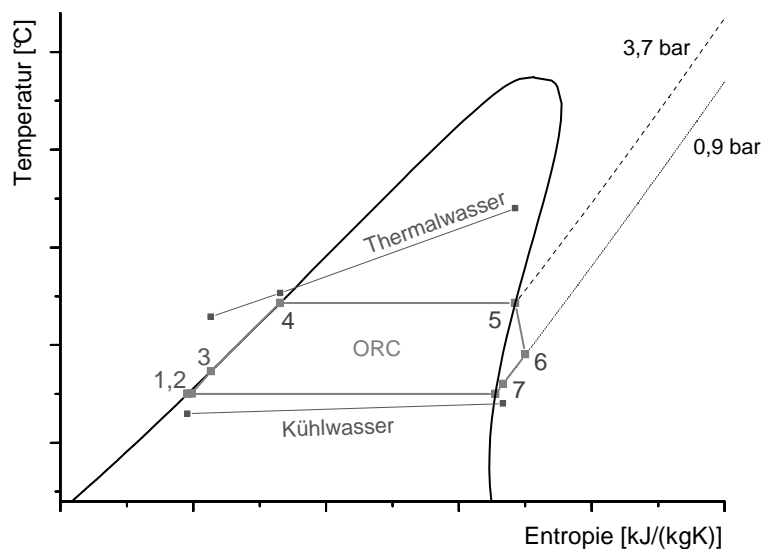


Abb. 2: schematisches T,s -Diagramm von Isopentan

Ziel der Optimierungsstrategien ist es die Limitierung durch den Pinch-Punkt mittels einer besseren Anpassung an das Temperaturprofil der Wärmequelle und -senke zu entschärfen.

3. Simulationsmodell

Die Kreisprozesssimulationen erfolgen mit Hilfe des Simulationsprogramms Cycle Tempo und der eingebundenen Stoffdatenbank Refprop 8.0 [2,3]. Um die Ergebnisse untereinander vergleichen zu können, werden die Simulationen bei konstanten Randbedingungen durchgeführt. Eine Übersicht dieser Parameter sowie der gewählten Standardwerte liefert Tab. 1.

Tab. 1: Randbedingungen und Standardparameter der durchgeführten Prozesssimulationen

Parameter	Wert
Thermalwasservolumenstrom [m ³ /h]	150
Thermalwassereintrittstemperatur [°C]	120
Maximaler ORC-Prozessdruck	0,8·p _{crit}
ΔT-Pinch-Point Verdampfung und Kondensation [°C]	5
ΔT des Kühlwassers [°C]	5
Eintrittstemperatur des Kühlwassers [°C]	15
Isentroper Wirkungsgrad der Turbine / Pumpe [%]	80 / 75

Die Thermalwasseraustrittstemperatur ist variabel und wird entsprechend der maximalen Leistungsabgabe des Kreisprozesses gewählt. Mit sinkender Thermalwasseraustrittstemperatur wird mehr thermische Energie auf den ORC übertragen, die Wärmequelle stärker ausgekühlt und der Massenstrom des ORC steigt an. Im Gegenzug sinkt die obere Prozessstemperatur sowie der thermische Wirkungsgrad des ORC. Damit ergibt sich ein Optimum der elektrischen Leistung in Abhängigkeit der Thermalwasseraustrittstemperatur. Im Folgenden wird für jeden Betriebspunkt stets dieses Effizienzmaximum angegeben. Als Kennwert für die Effizienz des ORC wird der elektrische Wirkungsgrad η_{el} definiert.

$$\eta_{el} = \frac{P_{Netto}}{\dot{m}_{TW} \cdot (h(T_{TW, ein}) - h(T_{KW, ein}))} \quad (1)$$

Hier bezeichnet P_{Netto} die Nettoleistung des Kreisprozesses, ohne Berücksichtigung der Leistung der Tiefenförderpumpe. Der Massenstrom des Thermalwassers wird mit \dot{m}_{TW} bezeichnet. Der maximal nutzbare Wärmeinhalt des Thermalwassers ergibt sich aus der Differenz der Enthalpie h bei der Eintrittstemperatur des Thermalwassers $T_{TW, ein}$ und der Temperatur des Kühlmediums am Eintritt in den Kondensator $T_{KW, ein}$ multipliziert mit dem Thermalwassermassenstrom.

4. Arbeitsmittel

Die Wahl eines an die Eigenschaften der Wärmequelle angepassten Arbeitsmediums ist eine bekannte Strategie zur Effizienzsteigerung des ORC. Tchanche et al. haben für eine solare Anwendung 20 organische Arbeitsmedien untersucht [4]. Dabei erweist sich R134a als effizientestes Arbeitsmedium für den betrachteten kleinen Leistungsbereich. Im Fall von Isobutan wird auf die notwendigen Sicherheitsvorschriften hingewiesen. Saleh et al. bestimmen aus 31 Reinstoffen R152a und Isobutan als effiziente Medien für Anwendungen mit einer Wärmequelle von 100 °C [5]. Für

Hochtemperaturanwendungen zeigen Drescher und Brüggemann, dass Ethylbenzol eine höhere Stromausbeute im Vergleich zum Standardfluid Octamethyltrisiloxan liefert [6]. Eine Übersicht des elektrischen Wirkungsgrads verschiedener organischer Medien in Abhängigkeit der in Deutschland förderbaren Thermalwassertemperaturen gibt Abb. 3.

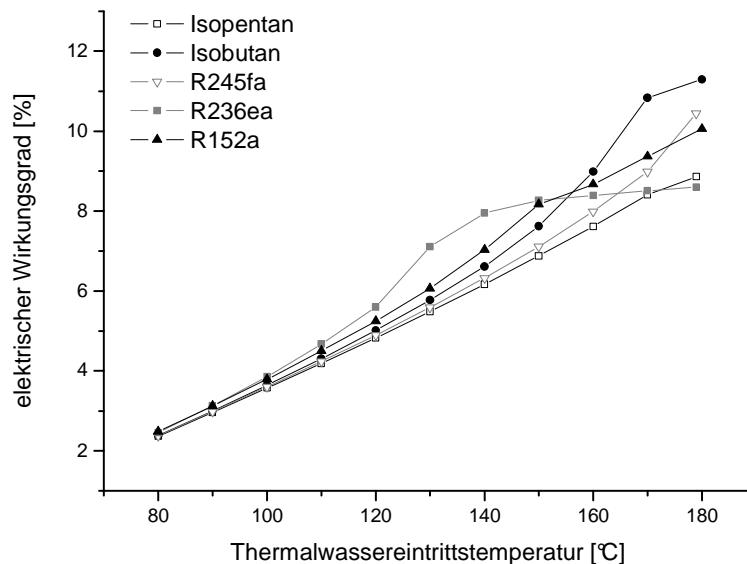


Abb. 3: elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Thermalwassereintrittstemperatur

Für Thermalwassertemperaturen unter 120 °C hat die Wahl des Arbeitsmittels nur geringen Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad. Im Bereich von 110 °C bis 150 °C ist R227ea das effizienteste Medium. Ein Vergleich mit dem Standardfluid Isopentan bei einer Thermalwassertemperatur von 130 °C zeigt eine Effizienzsteigerung um nahezu 30 %. Für Thermalwassertemperaturen über 150 °C ist Isobutan als ORC-Medium zu bevorzugen. Der unstetige Verlauf der Kurven für R227ea und für Isobutan in Abb. 3 ist auf eine Verschiebung des Pinch-Punkts zurückzuführen. In diesen Fällen liegt der Pinch-Punkt nicht mehr am Beginn der Verdampfung, sondern am Beginn der Vorwärmung. Damit sind eine stärkere Auskühlung des Thermalwassers und eine Steigerung des ORC-Massenstroms verbunden. Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 4 das Temperaturprofil für die Vorwärmung und Verdampfung im Fall von Isopentan und R227ea bei einer Thermalwassereintrittstemperatur von 150 °C.

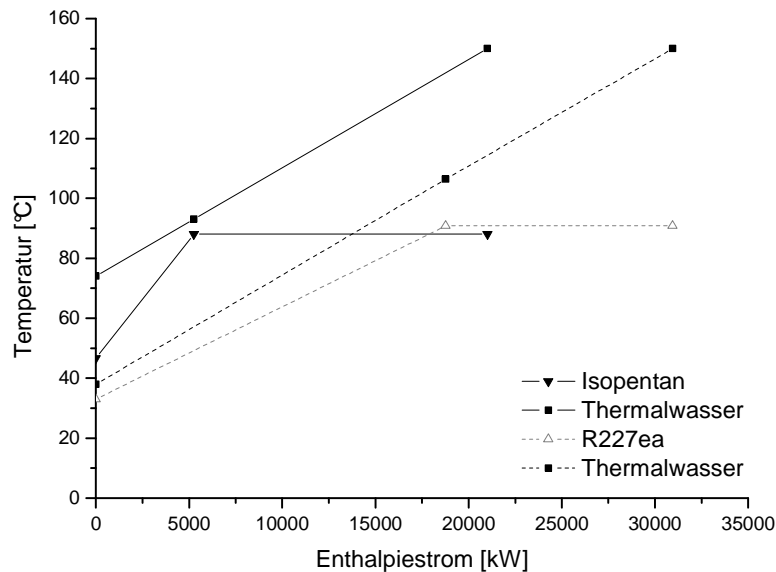


Abb. 4: elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Thermalwassereintrittstemperatur

Die obere Prozesstemperatur des ORC weist mit 88,1 °C für Isopentan und mit 90,9 °C für R227ea nur geringe Unterschiede auf. Ausschlaggebend für den Effizienzunterschied ist die um 10 MW höhere Wärmeübertragung im Fall von R227ea. Dies wird anhand der Auskühlung des Thermalwassers auf 39 °C im Fall von R227ea und 74 °C für Iso pentan deutlich. Im gewählten Fallbeispiel beträgt die elektrische Nettoleistung des ORC für Isopentan 2555 kW und im Fall von R227ea 3067 kW.

5. Zweistufige Entspannung

Die zweistufige Entspannung stellt einen weiteren interessanten Optimierungsansatz dar. Dabei erfolgt eine Massenstromaufspaltung in einen Nieder- und einen Hochdruckteilstrom. Es kommt zu einem apparativen Mehraufwand im Vergleich zum einstufigen Prozess. Der Thermalwasserstrom wird in vier Schritten mit dem ORC gekoppelt. Zunächst erfolgt die Vorwärmung des gesamten ORC-Massenstroms auf Niederdruckniveau, anschließend wird ein Teilstrom abgespaltet und mittels einer zusätzlichen Speisepumpe auf Hochdruckniveau verdichtet. Die beiden Teilströme werden vollständig verdampft und der Dampf in einer Hoch- und Niederdruckturbine entspannt. Die Entschärfung der Pinch-Punkt-Limitierung wird somit durch eine Treppenfunktion im T,s -Diagramm erreicht.

Abb. 5 stellt den elektrischen Wirkungsgrad der zweistufigen Entspannung dem Standardkonzept gegenüber. Exemplarisch wird die Effizienz der Medien Isopentan und R245fa für eine Thermalwassertemperatur im Bereich von 80 °C bis 180 °C betrachtet.

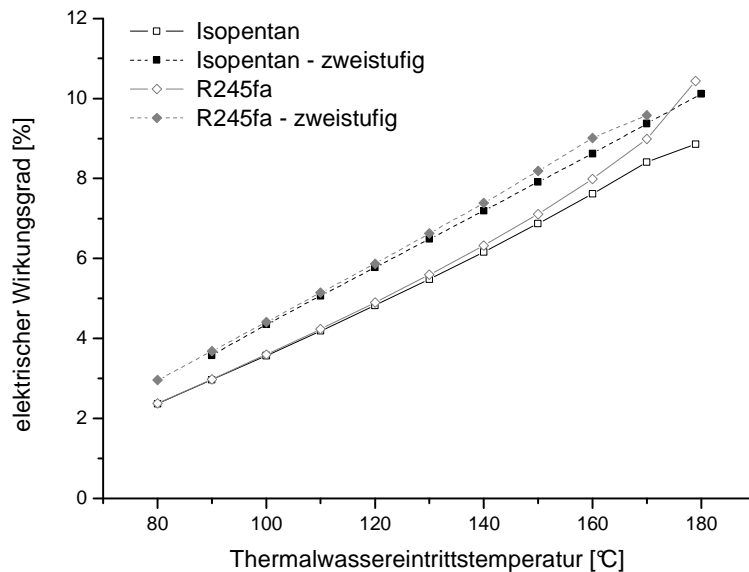


Abb. 5: elektrischer Wirkungsgrad der zweistufigen Entspannung in Abhängigkeit der Thermalwassereintrittstemperatur

Im betrachteten Temperaturbereich beträgt das Potential zur Effizienzsteigerung bis zu 27 % im Vergleich zum Standardkonzept. Einzig für Thermalwassertemperaturen über 170 °C führt eine zweistufige Entspannung im Fall von R245fa zu keiner Wirkungsgradsteigerung. Grund hierfür ist die Verschiebung des Pinch-Punkts zum Beginn der Vorwärmung für R245fa in der einstufigen Betriebsweise. Die damit verbundene Leistungssteigerung übertrifft die der zweistufigen Entspannung.

6. Überkritische Fahrweise

Gu und Sato untersuchen den überkritischen ORC als Alternative zu Single-Flash-Prozessen bei Thermalwassertemperaturen von 229 °C [7]. Dabei identifizieren die Autoren R134a als geeignetes Arbeitsmedium und berechnen eine Effizienzsteigerung von nahezu 35 % im Vergleich zum Single-Flash-Prozess. Karellas und Schuster betrachten den überkritischen Prozess für R134a und R227ea bei oberen Prozesstemperaturen von 105 °C und 115 °C sowie einem Druckniveau des 1,01- und 1,1-fachen des kritischen Drucks [8]. Obwohl der thermische Wirkungsgrad teilweise absinkt, ergibt sich eine deutliche Steigerung der Systemeffizienz im Vergleich zum subkritischen Prozess der ausgewählten Fluide.

In Abb. 6 sind die elektrischen Wirkungsgrade des überkritischen Prozesses der Medien R134a, Isobutan und R245fa in Abhängigkeit der Thermalwassertemperatur aufgetragen. Die betrachteten Druckverhältnisse Pr betragen 1,05 und 1,25 und stellen den Quotienten des Prozessdrucks und des überkritischen Drucks dar. Um eine Entspannung durch das Nassdampfgebiet vollständig ausschließen zu können, wurde die obere Prozesstemperatur des überkritischen Prozesses $T_{max,\bar{u}}$ in Abhängigkeit der maximalen Entropie des Fluids im subkritischen Bereich $s_{max,sub}$ berechnet.

$$T_{max,\bar{u}} = T(p_{\bar{u}}, s_{max,sub}) \quad (2)$$

Der vorliegende Druck im überkritischen Bereich wird mit $p_{\bar{u}}$ abgekürzt. Unter Berücksichtigung einer Temperaturdifferenz am Pinch-Punkt von 10 °C und den beschriebenen Randbedingungen er-

gibt sich eine Mindesttemperatur des Thermalwassers, die für eine überkritische Fahrweise vorliegen muss. Im Fall von R134a dies eine Thermalwassertemperatur von 130 °C.

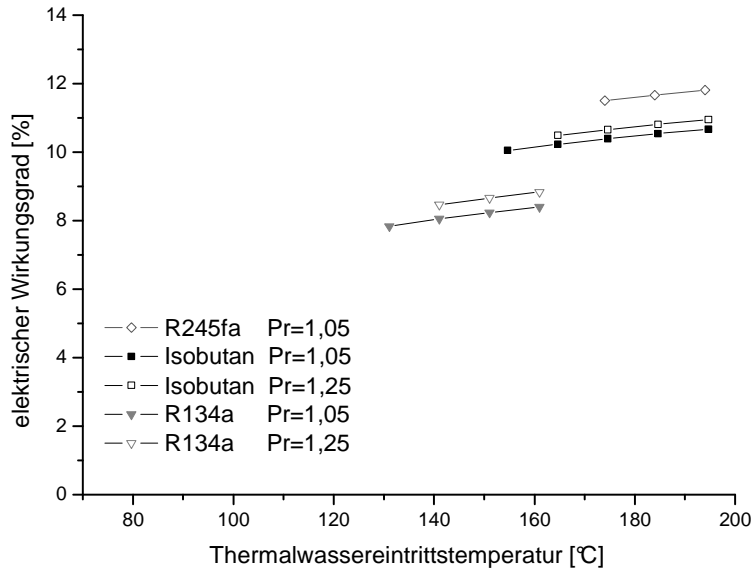


Abb. 6: elektrischer Wirkungsgrad des überkritischen Prozesses in Abhängigkeit der Thermalwassereintrittstemperatur

Im Vergleich zum Standardkonzept ergeben sich Leistungssteigerung von bis zu 35 %. Jedoch sind aufgrund der Randbedingungen und dem Verlauf der Isobaren im überkritischen Bereich relativ hohe Thermalwassertemperaturen notwendig, um die überkritische Fahrweise zu ermöglichen. Für R245fa bedarf es beispielsweise einer Thermalwassertemperatur über 170 °C.

7. Einsatz von binären Stoffgemischen

Ein innovativer Optimierungsansatz ist der Einsatz von zeotropen Fluidgemischen als Arbeitsmedium. Durch den nicht-isothermen Phasenübergang kommt es zu einer besseren Anpassung der Temperaturprofile im Kondensator und Verdampfer. Im Gegensatz zum Kalina Cycle wird bei den hier vorgestellten binären Gemischen auf eine Separation vor der Entspannung verzichtet. In diesem Zusammenhang werden Kältemittel- und Kohlenwasserstoffgemische untersucht, die einen Temperaturgleit bei Kondensationsbedingungen von mindestens 5 °C und maximal 15 °C aufweisen. Abb. 7 zeigt den elektrischen Wirkungsgrad für das Gemisch Isobutan/Isopentan in Abhängigkeit des Massenanteils der leichter flüchtigen Komponente Isobutan bei einer Thermalwassertemperatur von 120 °C.

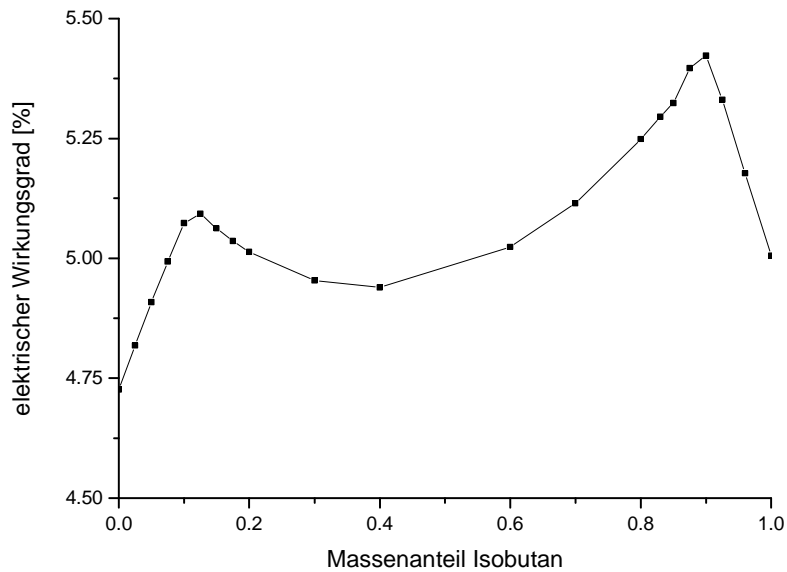


Abb. 7: elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Massenanteils von Isobutan

Die lokalen Optima des elektrischen Wirkungsgrades treten bei einer Gemischkonzentration von 12,5 % und 90 % Isobutan auf. Im Vergleich zum effizientesten Reinstoff bedeutet das eine Effizienzsteigerung von rund 10 %. Die Maxima beruhen auf einer besseren Anpassung der Temperaturprofile von Kühlwasser und ORC-Medium im Kondensator. Abb. 8 zeigt, dass die Exergieverluste im Kondensator für die Gemischkonzentrationen mit höchster Effizienz minimal sind. Zusätzlich ist das Druckverhältnis der Expansion aufgetragen, welches qualitativ dem Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades entspricht.

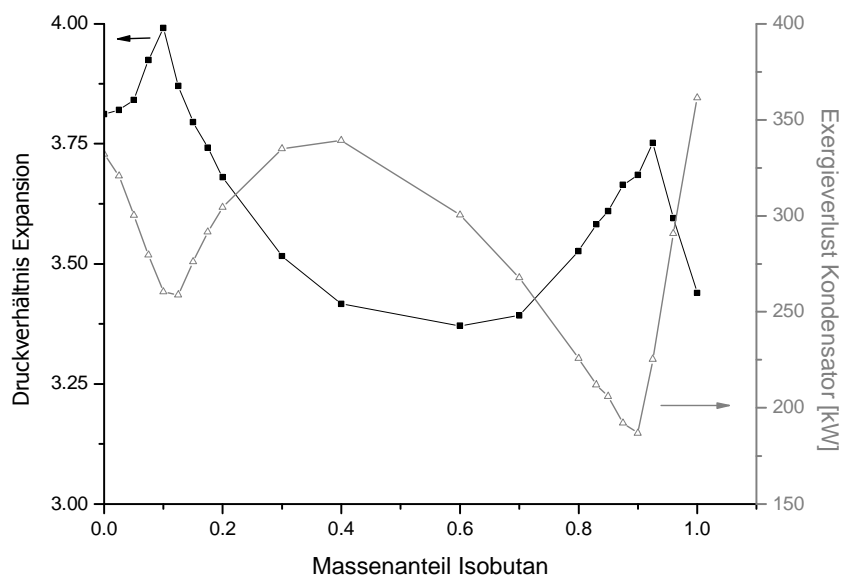


Abb. 8: Druckverhältnis der Expansion und Exergieverlust im Kondensator in Abhängigkeit des Massenanteils von Isobutan

Für die geringen Exergieverluste im Bereich von 10 % und 90 % Isobutan ist die gute Anpassung der Temperaturprofile im Kondensator verantwortlich. Eine Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs von Gemisch und Reinstoff liefert Abb. 9.

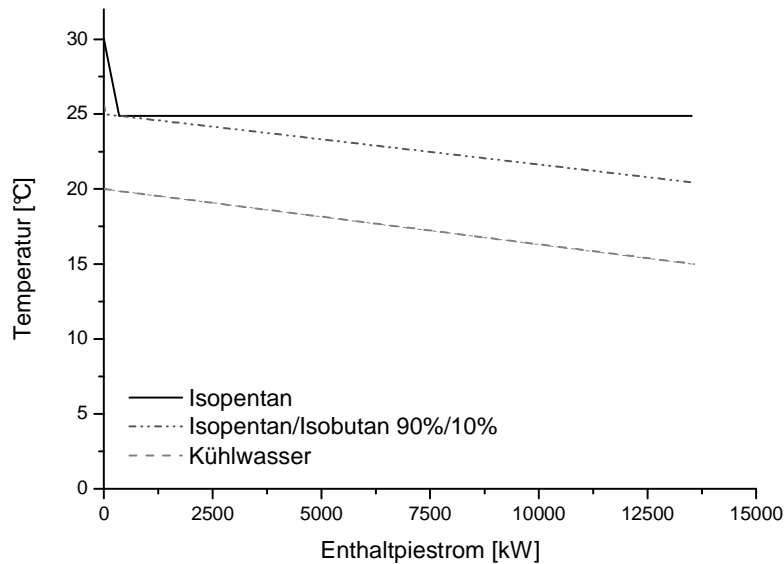


Abb. 9: Temperaturprofil im Kondensator für Reinstoff Isopentan und Isobutan/Isopentan-Gemisch

Zu erkennen ist der parallele Verlauf des Thermalwasserprofils und der Kurve des ORC mit dem Isobutan/Isopentan-Gemisch. Eine Gemischkonzentration von 10 % bzw. 90 % Isobutan ist in diesem Fall optimal, da die Vorgabe einer Temperaturdifferenz von 5 °C des Kühlmediums im Kondensator mit dem Temperaturgleit des Gemisches während der Kondensation übereinstimmt. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass bei einer höheren Temperaturdifferenz im Kondensator Konzentrationen mit gleichen Massenanteilen eine bessere Profilanpassung aufweisen. Es gilt festzuhalten, dass der höchste elektrische Wirkungsgrad bei einer Gemischkonzentration erreicht wird, für die eine Übereinstimmung der Temperaturdifferenz des Kühlmediums und des Temperaturgleits auftritt.

Analog zu den bisher betrachteten Optimierungsansätzen wird in Abb. 10 der elektrische Wirkungsgrad gegenüber der Thermalwassertemperatur aufgetragen. Exemplarisch werden neben den Reinstoffen Isobutan und Isopentan die Gemischkonzentrationen 90 % und 30 % Massenanteil Isobutan dargestellt.

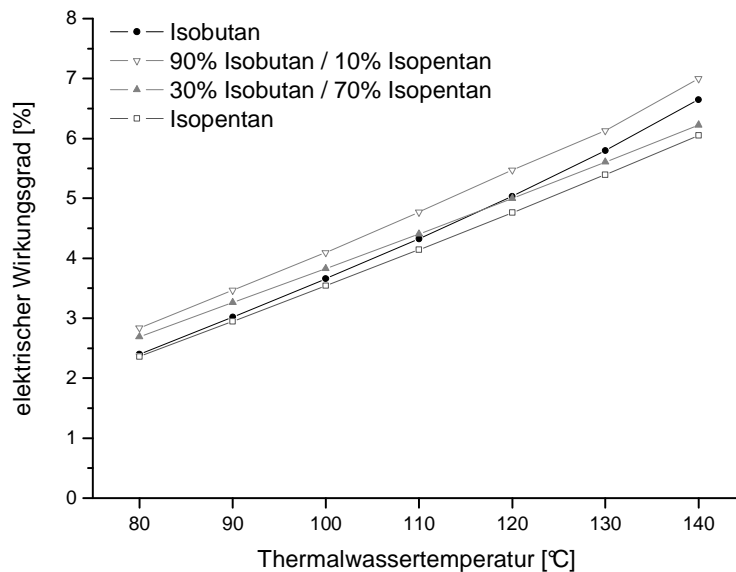


Abb. 10: elektrischer Wirkungsgrad Isobutan/Isopentan-Gemisch und Reinstoffe in Abhängigkeit der Thermalwassertemperatur

Das Fluidgemisch mit einem Massenanteil von 90 % Isobutan weist über den gesamten Temperaturbereich die höchste Effizienz auf. Im Vergleich zum Standardmedium Isopentan liegen die Wirkungsgradsteigerungen im Bereich von 15 % bis 20 %. Besonders hervorzuheben sind die relativ hohen Effizienzsteigerungen für Thermalwassertemperaturen unter 130 °C. Im Vergleich zu Reinstoffen wird durch den Einsatz von Fluidgemischen in diesem Temperaturbereich eine deutliche Leistungssteigerung erreicht. Für höhere Thermalwassertemperaturen liegt die Effizienzsteigerung im Bereich von rund 5 % im Vergleich zu reinem Isobutan.

Die gewonnenen Erkenntnisse bestätigen sich auch für andere Gemischkomponenten. Prozesssimulationen der Systeme R152a/R245fa, Butan/Pentan und Pentan/Hexan bestätigen das Auftreten der Effizienzmaxima für Konzentrationen bei denen der Temperaturleit des Phasenübergangs mit der Temperaturdifferenz des Kühlmediums im Kondensator übereinstimmt. Auch die erreichbaren Leistungssteigerungen liegen im Bereich der durch den Einsatz von Isobutan/Isopentan berechneten Werte. Der elektrische Wirkungsgrad des Systems R152a/R245fa bei einer Thermalwassertemperatur von 120 °C ergibt Effizienzsteigerung um 18 % im Vergleich zu Isopentan.

Aus der Kältetechnik sind technische und wirtschaftliche Herausforderungen bekannt, die es im Zusammenhang mit dem Einsatz von Fluidgemischen zu beachten gilt. So kommt es aufgrund der Anreicherung der leichter flüchtigen Komponente im Verdampfer zu Konzentrationsverschiebungen im zirkulierenden Gemisch. Chen und Kruse zeigen jedoch, dass die Änderung für Gemische mit geringen Siedepunktunterschieden, wie sie hier eingesetzt werden, unter 3 % liegen und experimentell bestimmbar sind [9]. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Zunahme der Wärmeübertragungsfläche durch einen zusätzlichen Diffusionseinfluss auf die Wärmeübertragung. Untersuchungen zur Verdampfung und Kondensation von Kältemittelgemischen zeigen, dass die Abnahme des Wärmeübergangskoeffizienten bei gleichen Massenanteilen der Gemischkomponenten je nach Gemisch bis zu 30 % beträgt. Durch die Vielzahl potentieller Gemischkombinationen sollte für die herrschenden Randbedingungen stets die Gemischkonzentrationen identifiziert werden, die zu einer geringen Abnahme der Wärmeübertragungseigenschaften führen. Des Weiteren kann durch ein turbulentes Strömungsfeld der Einfluss der Diffusion auf die Wärmeübertragung verringert werden.

8. Endergebnisse

Die dargestellten Optimierungsstrategien des ORC zeigen, dass durch innovative Anlagenverschaltung, Betriebsweise und Mediumwahl die Effizienz des ORC signifikant gesteigert werden kann. Ausgehend vom Standardkonzept mit dem Arbeitsmittel Isopentan liefert ein an die Wärmequelle angepasstes Arbeitsmittel eine Effizienzsteigerung von bis zu 30 %. Als alternative Fluide sind das Kältemittel R227ea und der natürliche Kohlenwasserstoff Isobutan zu nennen. In Verbindung mit einem apparativen Mehraufwand hinsichtlich der Wärmeübertragung, dem Entspannungsaggregat und der Turbine führt eine zweistufige Entspannung zu einer Leistungssteigerung rund 25 % im Vergleich zur einstufigen Betriebsweise. Eine überkritische Fahrweise ist bei Einhaltung der Temperaturdifferenz am Pinch-Punkt erst ab Thermalwassertemperaturen von 130 °C möglich. Im Vergleich zum Standardkonzept bietet dieser Optimierungsansatz jedoch das höchste Potential mit bis 35 % Effizienzsteigerung im Vergleich zum Standardkonzept. Ein vielversprechender Ansatz ist der Einsatz von zeotropen Fluidgemischen. Speziell für Thermalwassertemperaturen im Bereich von 80 °C bis 120 °C sind die Wirkungsgradsteigerungen von bis zu 18 % im Vergleich zu reinem Isopentan hervorzuheben. Auf diesem Temperaturniveau führt die Wahl eines reinen Arbeitsmediums zu keinen vergleichbaren Effizienzsteigerungen. Zusätzliche Investitionen für größere Wärmeübertragungsflächen, die durch den Diffusionseinfluss im Verdampfer erforderlich sind, können durch die Zusatzeinnahmen überkompensiert werden.

Quellenangaben

- [1] DIPIPPO, R.: Geothermal Power plants: principals, applications and case studies, *Elsevier Science*, Oxford (2005)
- [2] WOULDSTRA, N., & VAN DER STELT T.P.: Cycle-Tempo: a program for the thermodynamic analysis and optimization of systems for the production of electricity, heat and refrigeration, *Energy Technology Section, Delft University of Technology*, The Netherlands (2002)
- [3] LEMMON, E.W., ET AL.: NIST Standard Reference Database 23 – Version 8.0. *Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology*, Boulder, Colorado, US Department of Commerce, USA (2002)
- [4] TCHANCHE, B. F., ET AL.: Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, 29, (11-12) (2009), 2468-2476
- [5] SALEH, B., ET AL.: Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, *Energy*, 32, (7) (2007), 1210-1221
- [6] DRESCHER, U. & BRÜGGEMANN, D.: Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants, *Applied Thermal Engineering*, 27, (1), (2007), 223 – 228
- [7] GU, Z. & SATO, H.: Performance of supercritical cycles for geothermal binary design, *Energy Conversion and Management*, 43, (7) (2002), 961-971
- [8] KARELLAS, S. & SCHUSTER, A.: Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Applications, *International Journal of Thermodynamics*, 11, (3) (2008), 101-108
- [9] CHEN, J. & KRUSE, H: Concentration shift simulation for the mixed refrigerants R-404a, R32/134a and R-407c in an air conditioning system, *International Journal of heating, ventilating, air-conditioning and refrigeration*, 3, (2) (1997), 149-157

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT), Universitätsstraße 30,
95440 Bayreuth
florian.heberle@uni-bayreuth.de