

Wirtschaftliche Verstromung mittels Organic Rankine Cycle

# Stromerzeugung aus Niedertemperaturwärme

Sowohl industrielle Abwärme als auch Geothermie stellen eine bislang kaum genutzte CO<sub>2</sub>-freie Energiequelle dar. Für eine wirtschaftliche Verstromung dieser Niedertemperaturwärme bietet sich die ORC-Technologie an.

Eine leistungsstarke Weiterentwicklung der kompakten ORC-Module der Münchener Orcan Energy AG wurde gemeinsam mit der Technischen Universität München am Standort Garching in Betrieb genommen und intensiv getestet.

**D**er Wandel des maßgeblich auf fossilen Energieträgern basierenden deutschen Energiesystems hin zu einem erneuerbaren und CO<sub>2</sub>-neutralen Energiesystem stellt eine große Herausforderung für die Energiebranche dar. Um den gesamten deutschen Strombedarf von etwa 500 TWh/a [1] regenerativ zu erzeugen, müssen alle zur Verfügung stehenden Quellen mit maximaler Effizienz ausgeschöpft werden. Ein bisher nur zum Teil zur Stromerzeugung genutztes Potenzial sind Niedertemperaturwärmequellen aus industrieller Abwärme oder auch der Tiefengeothermie. Eine mögliche Technologie zur Ausnutzung dieser Wärmequellen ist der Organic Rankine Cycle (ORC). Campana et al. [2] bestimmten das technische Potenzial zur Ausnutzung der Abwärme einiger energieintensiver Industrien (Glas, Ziegel, Stahl, Erdgastransport und -lagerung) in der EU mithilfe der ORC-Technologie auf eine mögliche installierte elektrische Leistung von 2 705 MW. Das wirtschaftliche Potenzial der regenerativen Stromerzeugung aus hydrothermaler Geothermie in Deutschland wurde von Eyerer et al. [3] auf 1 800 MW bestimmt. Davon waren 2019 jedoch erst 37,13 MW in geothermischen Kraft- und Heizkraftwerken realisiert [4]. Diese regenerativen Wärmequellen sind darüber hinaus im Gegensatz zu Wind oder Photovoltaik nicht von schwanken-

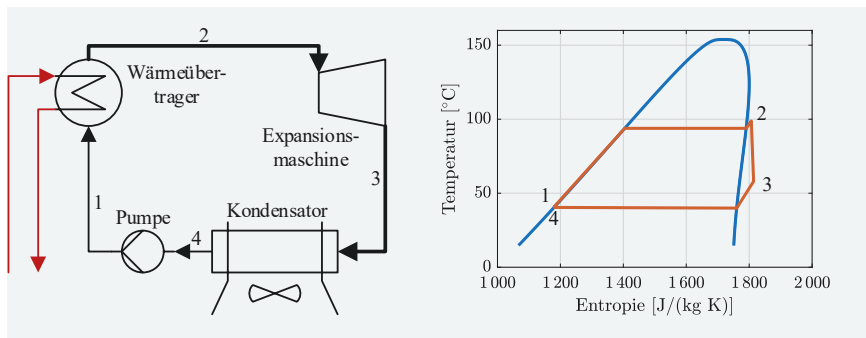


Der „efficiency Pack eP 150.200“ der Orcan Energy AG mit einer elektrischen Leistung bis 200 kW(el.) an der Versuchswärmequelle der Technischen Universität München in Garching. Bild: Orcan Energy

den Witterungsverhältnissen abhängig und können dadurch einen wichtigen plan- und regelbaren Beitrag zur Energieverwendung leisten.

Stand der Technik zur effizienten Nutzung solcher Niedertemperaturwärmequellen ist die ORC-Technologie. Der ORC-Prozess ähnelt dem klassischen Clausius-Rankine-Kreisprozess, der in Dampfkraftwerken zum Einsatz kommt. Im Gegensatz dazu wird im ORC-Prozess allerdings nicht Wasser, sondern ein organisches Fluid als Arbeitsmedium verwen-

det. Diese organischen Arbeitsmedien finden in der Kältetechnik bereits seit langem Anwendung und weisen im Vergleich zu Wasser deutlich geringere Verdampfungstemperaturen auf, was bei gleichen Temperaturen zu höheren Dampfdrücken führt. Dies ermöglicht eine effiziente Nutzung von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau. In **Bild 1** sind links das Prozessfließbild des ORC-Prozesses und rechts das entsprechende T-s-Diagramm abgebildet. Als Arbeitsmedium wurde für die Abbildung exemplarisch R245fa ver-



**Bild 1** Prozessfließbild (links) und T-s-Diagramm (rechts) des ORC-Prozesses mit dem Arbeitsmedium R245fa (eigene Darstellung).

wendet, das häufig in geothermalen ORCs in Deutschland im Einsatz ist. Die Nummerierung in Bild 1 markiert die vier thermodynamischen Zustände, die das Arbeitsfluid im Kreisprozess durchläuft. Zwischen Zustand 1 und 2 wird das Arbeitsmedium vorgewärmt, vollständig verdampft und gegebenenfalls überhitzt, während die Wärmequelle abgekühlt wird. Als Wärmeübertrager werden in kleinskaligen ORCs aufgrund der geringen Baugröße in der Regel Plattenwärmeübertrager verwendet, für größere ORCs im MW-Bereich kommen Rohrbündelwärmeübertrager zum Einsatz. Wie im T-s-Diagramm zu sehen, wird das Arbeitsmedium im ORC-Prozess häufig nur leicht überhitzt, da es aufgrund der positiven Steigung der Taulinie nicht zu Tröpfchenbildung während der Expansion (Zustand 2 → 3) und dadurch auch nicht zur Gefährdung durch Tropfenerosion kommen kann. Die an der Welle der Expansionsmaschine anliegende Wellenleistung wird im Weiteren mithilfe eines Generators in Strom umgewandelt und in das Stromnetz eingespeist. Als Expansionsmaschinen werden in größeren ORC-Kraftwerken meist Axialturbinen verwendet. In kleineren Anlagen werden häufig Scroll- oder Schraubenkompressoren aus der Kältetechnik in umgekehrter Strömungsrichtung als Expansionsmaschinen betrieben. Die Expanderdrehzahl wird häufig mithilfe eines Frequenzumrichters geregelt, wodurch eine effizienzoptimierte Anpassung an die jeweilige Wärmequelle ermöglicht wird. Der expandierte Abdampf wird anschließend vollständig kondensiert (Zustand 3 → 4), dafür werden in ORCs in der Regel luftgekühlte Kondensatoren mit berippten Rohren oder aus der Automobiltechnik bekannte Microchannel-Coils verwendet. Das kondensierte Arbeitsmedium wird abschließend mithilfe einer Pumpe wieder auf den Verdamp-

fungsdruck gebracht und zum Verdampfer gefördert (Zustand 1 → 4), um den Kreisprozess zu schließen.

Niedertemperaturwärmequellen weisen häufig starke zeitliche Schwankungen sowohl in Temperatur als auch Massenstrom auf. ORC-Prozesse die diese Wärmequellen effizient nutzen sollen, sind deshalb starkem Teillastbetrieb ausgesetzt. ORCs in geothermalen Anwendungen sind beispielsweise häufig in Heizkraftwerken installiert. Diese Anlagen werden in der Regel wärmegeführt betrieben, wodurch ein in Abhängigkeit des Fernwärmebedarfs schwankender Wärmestrom zur Verstromung im ORC zur Verfügung steht. Darüber hinaus ist auch das Kondensationsdruckniveau aufgrund der fluktuierenden Umgebungslufttemperatur Schwankungen unterworfen. Dies gilt ebenso für ORC-Anlagen zur Verstromung von industrieller Abwärme, wobei für diese Anwendungen häufig die Temperatur oder auch der Volumen- beziehungsweise Massenstrom der Wärmequelle abhängig vom Industrieprozess starken Schwankungen ausgesetzt sind. Ein Zusammenschluss von mehreren kleinen modularen ORC-Einheiten kann in solchen Anwendungen vorteilhaft sein, da nur ein Modul in Teillast betrieben werden muss. Alle anderen Module fahren entweder in Volllast oder sind nicht aktiv. Dadurch lassen sich Wirkungsgradeinbußen aufgrund von Teillast signifikant reduzieren. Die größte derartige Installation von Orcan Energy umfasst 70 ORC-Module in einem 90-MW(el.)-Kraftwerkspark im südostasiatischen Myanmar.

## Wärmequelle an Fernwärmeleitung der TUM

Eine besondere Herausforderung für einen realitätsnahen Test stellen die Leis-

tung und auch die Temperatur der Wärmequelle dar, übliche Heißwasser-Wärmeerzeuger arbeiten nur bis 110 °C, Heizungsanlagen von Gebäuden in der Regel nur bis 95 °C. Die TUM betreibt an ihrem Campus in Garching ein Fernwärmenetz, das durch ein Cheng-Cycle-Kraftwerk gespeist wird. Der Cheng Cycle selbst besteht aus einer „Allison 501-KH 5“-Gasturbine und einem Abhitzedampferzeuger. Der Abhitzedampferzeuger wird bei einem Druck von 12,5 bar betrieben. Nach dem Verdampfer kann durch Überhitzung und Dampfeindüsung entweder die Leistung der Gasturbine erhöht werden oder durch Drosselung die Wärme bei 4,5 bar über einen Wärmeübertrager ins Fernwärmenetz eingespeist werden. Das Fernwärmenetz bietet mit Vorlauftemperaturen von bis zu 150 °C ideale Betriebsparameter, um eine tiefegeothermische Wärmequelle zu simulieren. Dadurch lassen sich bis zu 2,5 MW(th.) aus dem Fernwärmenetz auskoppeln und als Wärmequelle für verschiedenste Zwecke nutzen. Gemeinsam mit dem Technischen Betrieb der TUM und dem Lehrstuhl für Energiesysteme konnte Orcan Energy mit diesem Aufbau zwei ihrer ORC-Module unter realitätsnahen Bedingungen testen. Es handelte sich dabei zum einen um einen „efficiency Pack eP 050.100“ (eP IP 050.100) mit einer elektrischen Leistung bis etwa 100 kW(el.) und um einen „efficiency Pack eP 150.200“ (eP IP 150.200) mit einer elektrischen Leistung bis etwa 200 kW(el.). Die Leistungsparameter sind in der **Tabelle** aufgeführt. Beide Systeme eignen sich für flüssige Wärmequellen ab 80 °C und für gasförmige Wärmequellen ab 150 °C und sind sowohl mit als auch ohne Frequenzumrichter verfügbar.

## Wirtschaftliche Lösung zur Verstromung von Niedertemperaturwärme

Die „efficiency Packs“ von Orcan Energy zeichnen sich durch eine hohe Wirtschaftlichkeit aus. Ihre üblichen Amortisationszeiten liegen zwischen zwei und vier Jahren. Erreicht wird dies durch den Aufbau des ORCs aus standardisierten, und vielfach bewährten Industriekomponenten, die den Betrieb besonders stabil und wartungsarm machen, einen kompakten Aufbau und eine einfache Installation. Intelligente Regelungsalgorithmen garantieren eine optimale Nutzung

vorhandener Abwärme. Die ORC-Module kommen überall dort zur Anwendung, wo Abwärme entsteht: also in der Industrie, wie zum Beispiel der Metallurgie, der Keramik- oder Zementindustrie, oder auch zur Verwertung von Überschusswärme von Müllverbrennungsanlagen. Für die flexible Nutzung von Geothermie eignet sich aufgrund seiner Leistungsgröße besonders der eP IP 150.200.

Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Nutzung von Abgas- und Kühlwasserwärme von Verbrennungsmotoren, die häufig in Schwellenländern oder aber auf Inseln zur flexiblen Deckung der Nachfrage an elektrischer Energie eingesetzt werden. Hier bieten sich die efficiency Packs mit Vorwärmer an, so können das Motorkühlwasser für die Vorwärmung und die Hochtemperaturwärme des Abgases für die Verdampfung des Arbeitsmediums genutzt werden. Neben zusätzlicher Stromerzeugung werden dadurch das Kühlsystem des Motors entlastet und der Eigenbedarf reduziert.

Die sehr kompakte wassergekühlte Version des „eP M 050.100 HP“ wurde für den Einsatz in der Schifffahrt zur Rückgewinnung von Abgas- und Motorkühlwasserwärme entwickelt und erzeugt zusätzliche elektrische Energie für die Stromversorgung des Schiffes.

Abhängig von der Temperatur der Wärmequelle bietet Orcan Energy ein für den jeweiligen Temperaturbereich

(Hoch-/Niedertemperatur) optimiertes Produkt an, sodass aus einer gegebenen Wärmequelle der maximale Kundennutzen generiert wird.

### Experimentelle Ergebnisse – Untersuchung von Leistung und Regelcharakteristik

In Garching wurden die Weiterentwicklung des Produkts eP IP 050.100 und die Neuentwicklung des Produkts eP IP 150.200, mit einer mehr als doppelt so großen Leistung, getestet. Fokus der Untersuchung war die Ermittlung von grundlegenden Leistungsparametern, wie zum Beispiel der elektrischen Leistung bei gegebenen Heißwassertemperaturen und -volumenströmen, um somit die Auslegungsdaten sowohl des Gesamtsystems als auch der einzelnen Komponenten zu validieren. So wurde beim eP IP 050.100 ein effizienterer Kühler eingesetzt, der den Eigenbedarf weiter reduziert und die Einsetzbarkeit in heißen Klimazonen oder auch die Stromerzeugung im Sommer weiter verbessert. Beim eP IP 150.200 wurde eine neuentwickelte Schraubenexpansionsmaschine eingesetzt, die in den Tests an der TUM in Zusammenarbeit mit dem Hersteller validiert wurde. Die Expansionsmaschine besitzt die doppelte elektrische Leistung wie die bisher im eP IP 050.100 eingesetzte Maschine und besitzt neben einem höheren Wirkungs-

grad auch ein optimiertes Start- und Teillastverhalten.

Beide Produkte erfüllten die an sie gestellten Anforderungen vollumfänglich und auch der hohe Kundennutzen konnte nachgewiesen werden. So lassen sich beispielsweise mit einem eP IP 150.200 bei einem Wasservolumenstrom von 60 m<sup>3</sup>/h und einer Temperatur von 150 °C im Jahresmittel 170 bis 180 kW durchschnittliche elektrische Leistung erzeugen. Bei einer Laufzeit von 8 000 h ergeben sich jährlich 1 400 MWh (el.).

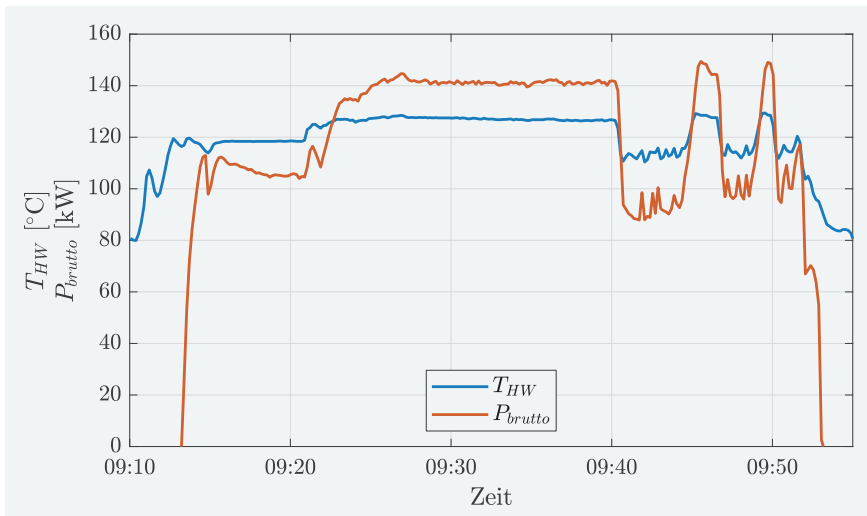
Ein besonderes Augenmerk lag zudem auf der Regelcharakteristik der Anlagen. In Europa müssen je nach Netzanschlusspunkt (Nieder-, Mittelspannung) bestimmte Netzeinspeiserichtlinien erfüllt werden. Diese regeln neben der Stromqualität auch Netzdienstleistungen, die eine Erzeugungseinheit erbringen muss, um das Stromnetz mit einer Vielzahl an dezentralen und fluktuierenden Einspeisern stabil zu halten. So muss beispielsweise bei Einspeisung ins Mittelspannungsnetz ab einer Schwelle der Netzfrequenz von 50,2 Hz die elektrische Leistung ausgehend von der aktuellen Leistung nach einem vorgegebenen Gradienten reduziert werden, und dies sowohl schnell (innerhalb von 2 s) als auch genau. Alternativ muss bei Anforderung durch den Netzbetreiber die Leistung innerhalb weniger Sekunden auf den gewünschten Sollwert in 10 %-Schritten ausgehend von der Nennleistung der Anlage reduziert und bei Bedarf wieder angehoben werden. Dies kann zum Beispiel bei BHKW mit Verbrennungsmotoren aufgrund der hohen Dynamik und der einfachen Steuerbarkeit der Brennstoffzufuhr unproblematisch realisiert werden. Bei ORC-Systemen handelt es sich jedoch um Systeme, die in der Regel Wärme eines vorgelagerten Prozesses aufnehmen oder auch aufnehmen müssen. Eine Änderung der elektrischen Leistung geschieht wegen der thermischen Trägheit des Systems aufgrund der Wärmekapazitäten der Komponenten und der eingesetzten Fluide erst verzögert. Eine schnelle und vor allem exakte Regelung der Leistung, ohne die Wärmequellen beeinflussen zu können, gestaltet sich schwierig.

Orcan Energy setzt hier auf eine Kombination von Reduktion der Wärmezufuhr durch Absenken der Heißwassertemperatur sowie Änderung der Leistung durch Anpassung der Kondensationsbedingungen. Man erkennt in **Bild 2** deutlich, dass

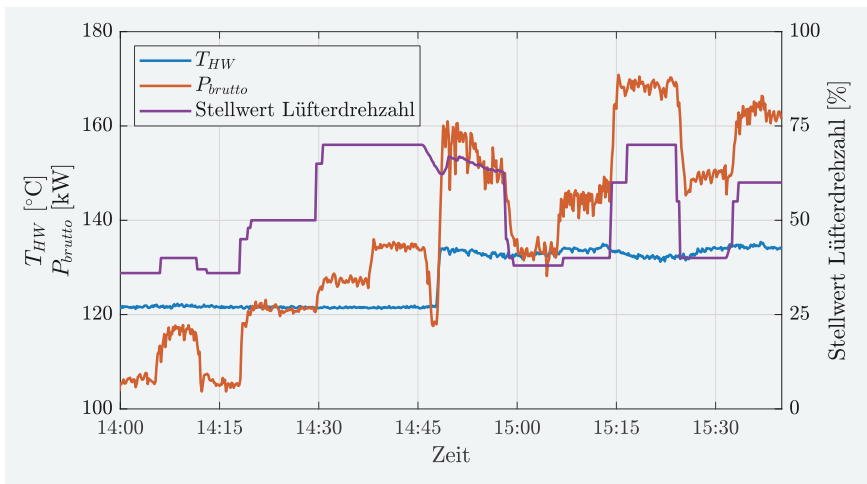
Temperaturbereich		eP IP 050.100		eP IP 150.200	
		NT	HT	NT	HT
Thermische Eingangsleistung [kW(th..)]	Min.	400	400	1 000	1 100
	Max.	1 300	1 100	2 300	2 500
Elektrische Nettoleistung [kW(el..)]	Max.	65	95	125	210
Heißwasser zulässige Temperatur [°C]	Min.	80	110	80	110
	Max.	125	150	125	150
Heißwasser Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	–	35 bis 45	25 bis 35	55 bis 65	
Warmwasser (optional) zulässige Temperatur [°C]	Min.	n. a.	70	n. a.	70
	Max.		109		109
Warmwasser Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	–	n. a.	8 bis 14	n. a.	15 bis 25
Abmessungen [m] (L x B x H)	–	6,1 x 2,5 x 2,9		12,2 x 2,5 x 2,9	
Anwendungen (Schwerpunkt)	–	Industrie, dezentrale Stromerzeugung		Industrie, dezentrale Stromerzeugung, Geothermie	

NT = Niedertemperatur; HT = Hochtemperatur; n. a. = nicht anwendbar.

**Tabelle** Wesentliche Parameter der „efficiency Packs“.



**Bild 2** Änderung der elektrischen Leistung bei Änderung der Heißwassertemperatur (eigene Darstellung).



**Bild 3** Änderung der elektrischen Leistung bei Änderung des Stellwerts der Lüfterdrehzahl (eigene Darstellung).

eine Absenkung der Temperatur zu einem unmittelbaren Sinken der elektrischen Leistung führt, bei einem erneuten Erhöhen steigt die Leistung schnell wieder an. **Bild 3** zeigt die Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Drehzahl der Lüfter. Durch Reduktion der Lüfterdrehzahl lässt sich bei annähernd gleichbleibender thermischer Leistung die elektrische Bruttoleistung reduzieren. In der Praxis werden beide beschriebenen Verfahren zur Verbesserung der Regelgenauigkeit kombiniert.

## Fazit

Durch die Anzapfung des Fernwärmenetzes der TUM konnte Orcan Energy

eine Wärmequelle mit einer Leistung von 2,5 MW(th.) und 150 °C zur Verfügung gestellt werden, die Validierungsversuche und die Untersuchung der Regelcharakteristik zweier ORC-Module ermöglicht hat. Die beiden kompakten ORC-Systeme mit Leistungen von rund 100 beziehungsweise rund 200 kW(el.) wurden intensiv getestet und zeigten die erwarteten Leistungsparameter. So können mit dem größeren eP IP 150.200 im Jahresmittel 1 400 MWh elektrische Energie emissionsfrei aus ungenutzter Wärme erzeugt werden. Neben der Validierung von Komponenten und des erreichbaren Wirkungsgrades konnten auch Strategien für präzise Laständerungen untersucht werden. ■

## Literatur

- [1] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. 2020. Entwicklung des Nettostromverbrauchs.
- [2] Campana, F.; Bianchi, M.; Branchini, L.; De Pascale, A.; Peretto, A.; Baresi, M.; Fermi, A.; Rossetti, N.; Vescovo, R.: ORC waste heat recovery in European energy intensive industries. Energy and GHG savings. Energy Conversion and Management 76, 244-252, 2013.
- [3] Eyerer, S.; Hofbauer, S.; Schifflachner, C.; Wieland, C.; Spliethoff, H.: Potenzial der Geothermie im deutschen Energiesystem. BWK Bd. 69 (2017), Nr. 10, S. 47-50.
- [4] Tiefe Geothermieprojekte Deutschland. Projekte in Betrieb. www.geotis.de (Zugriff am 12.6.2020).

### Fabian Dawo



Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiesysteme der Technischen Universität München

fabian.dawo@tum.de

Bild: Privat

### Dr.-Ing. Christoph Wieland



Abteilungsleiter Thermodynamische Kreisprozesse und Wärmeübergang am Lehrstuhl für Energiesysteme der Technischen Universität München

wieland@tum.de

Bild: Sonja Allgaier

### Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff

Lehrstuhl für Energiesysteme der Technischen Universität München

### Dr.-Ing. Andreas Schuster

CTO und Gründer bei der Orcan Energy AG

### Fabian Weigand

Produktmanager bei der Orcan Energy AG