

# Aus Abwärme wird Strom

ORC (Organic Rankine Cycle) ist verwandt mit dem herkömmlichen Dampfkraftwerksprozess. Er läuft mit einem organischen Kältemittel, welches eine bedeutend tiefere Siedetemperatur aufweist als Wasser. Dies ermöglicht die Stromproduktion aus Industrieabwärme ab Temperaturen von 80 °C.

In der chemischen Industrie sowie in der Lebensmittel- oder Zementherstellung wird viel Wärme benötigt. Dabei kühlt sich der Wärmeträger im Verlauf des Prozesses auf ein Temperaturniveau ab, bei dem sich die Restwärme für den primären Prozess nicht mehr nutzen lässt. Kann die Restwärme nicht in anderen Prozessen, wie z. B. bei der Trocknung von Granulaten, eingesetzt werden, bietet sich die Umwandlung der Abwärme in elektrische Energie an. Diese kann für den Eigenbedarf genutzt oder leicht ins bestehende Stromnetz eingespeist werden. Der Organic Rankine Cycle (ORC) stellt eine Technologie dar, mit der sich thermische Energie auch bei relativ niedrigen Temperaturen, im Bereich 80 bis 350 °C, in elektrische Energie umwandeln lässt.

## Wirkungsgrad sinkt bei tiefen Temperaturen

Beim herkömmlichen Dampfkraftwerksprozess wird thermische Energie in elektrische Energie umgewandelt, indem Wasser eine Reihe von Zustandsänderungen durchläuft. Um die nötigen Zustandsänderungen zu realisieren, braucht es eine Turbine mit Generator, Kondensator, Speisepumpe und Dampfkessel. Der Wasserdampfprozess funktioniert sehr gut für Turbineneintrittstemperaturen über 350 °C. Bei bedeutend tiefer liegenden Temperaturen nimmt der Wirkungsgrad stark ab und die Gefahr von turbinenschädlichem Tropfenschlag zu, weil die Expansion bis tief in das Nassdampfgebiet reichen kann. Durch Absenken des Turbineneintrittsdrucks kann der Nass-

dampfgehalt verkleinert aber nicht zum Verschwinden gebracht werden. Durch die Druckabsenkung verschlechtert sich der realisierbare Wirkungsgrad zusätzlich.

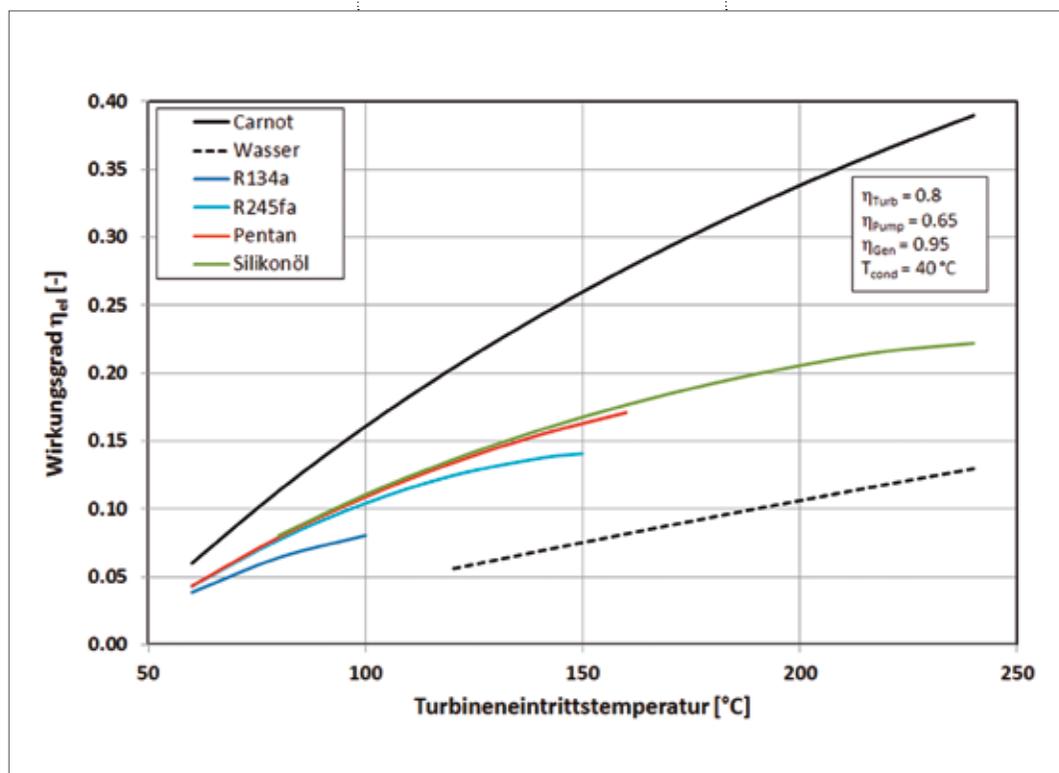
## Robuste Technik

Im Unterschied zum herkömmlichen Dampfkraftwerksprozess wird beim Organic Rankine Cycle ein organischer Stoff, z. B. Pentan, an Stelle von Wasser als Arbeitsmedium eingesetzt. Durch die Anpassung des Arbeitsmediums an eine vorhandene Abwärmtemperatur z. B. Abwärme eines bestehenden industriellen Prozesses lassen sich höhere Wirkungsgrade realisieren. Der Carnot-Prozess beschreibt einen idealen Kreisprozess und zeigt den theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad bei der Umwandlung

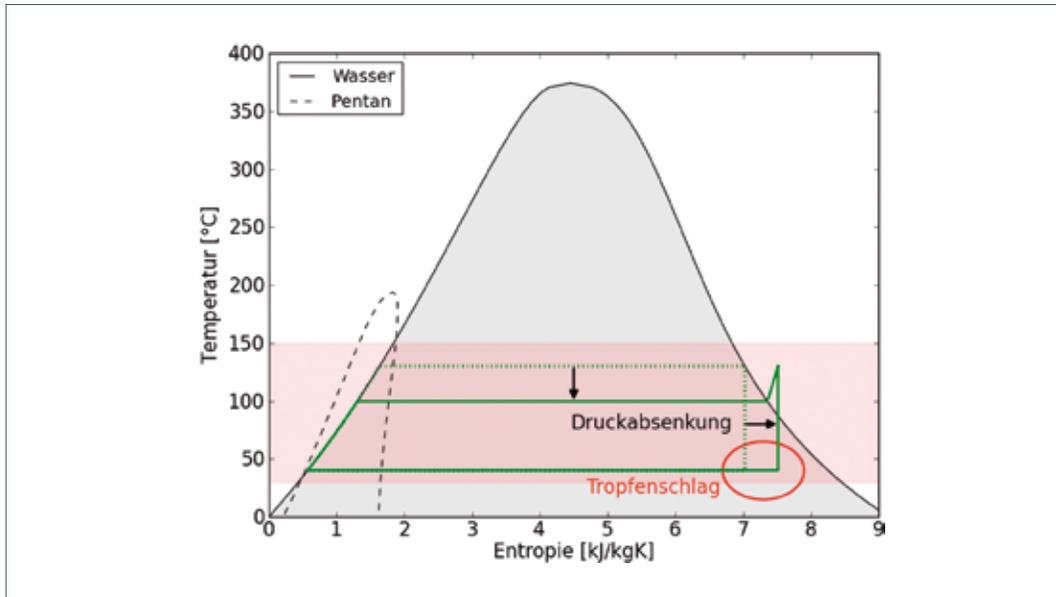
von Wärmeenergie in mechanische bzw. elektrische Energie. Viele organische Arbeitsmedien besitzen eine «überhängende» Sattdampfkurve mit dem Vorteil, dass die Expansion stets im überhitzten und somit trockenen Bereich endet. So wird Tropfenschlag ausgeschlossen und ein wartungsarmer Betrieb von ORC-Turbinen sichergestellt. Insgesamt zeichnet sich die ORC-Technik durch ihre Robustheit, die kompakte Bauweise, die hohe Automatisierbarkeit und den vergleichsweise hohen Wirkungsgrad aus.

## ORC in der Schweiz

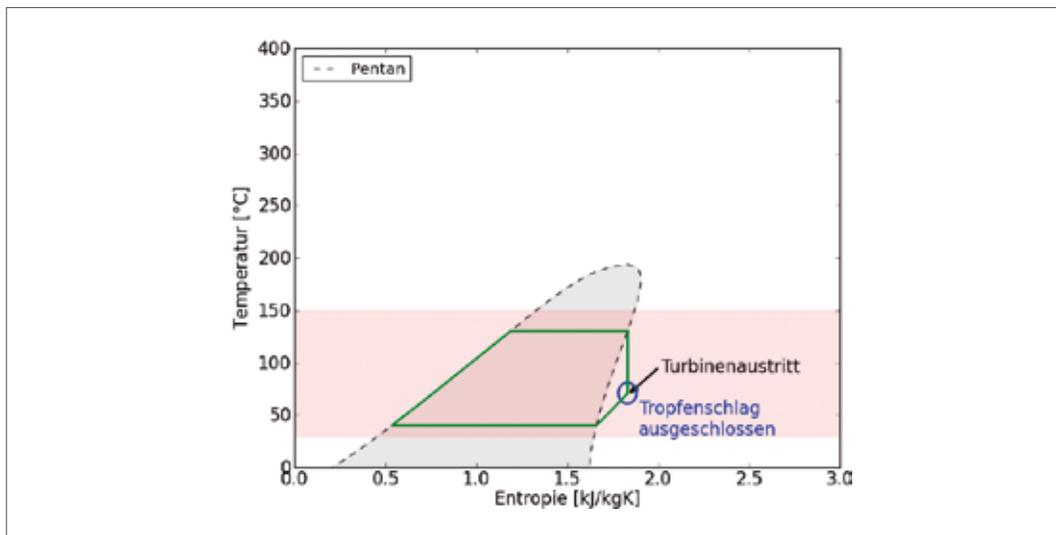
Interessant sind momentan Anwendungen bei relativ hohen Temperaturen und grossen Leistungen mit entsprechend hohen Wirkungsgraden und geringen spezifischen Investitionskosten. Spezielle Einspeisevergütungen für Biomasseanlagen begünstigen zudem den wirtschaftlichen Betrieb. Folglich zeigt eine durchgeführte Internetrecherche, dass es sich bei fünf von sieben realisierten bzw. sich im Bau befindenden ORC-Anlagen in der Schweiz um holzbefeuerte Wärme-Kraft-Kopplungsprozesse (WKK) handelt. Die Nutzung industrieller Abwärme zur Stromproduktion wird in der Schweiz noch nicht angewandt. Eine entsprechende Pilotanlage beim Zementwerk in Untervaz GR geht voraussichtlich Ende Jahr in Betrieb. Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss fallweise erstellt werden, da sich die Anforderungen je nach Anwendung stark unterscheiden können. An dieser Stelle wird nur eine grobe Abschätzung für die Amortisationszeit und Rentabilität für einfache Anlagen ohne hohen Anlagenintegrationsaufwand in Abhängigkeit der Modulgrösse



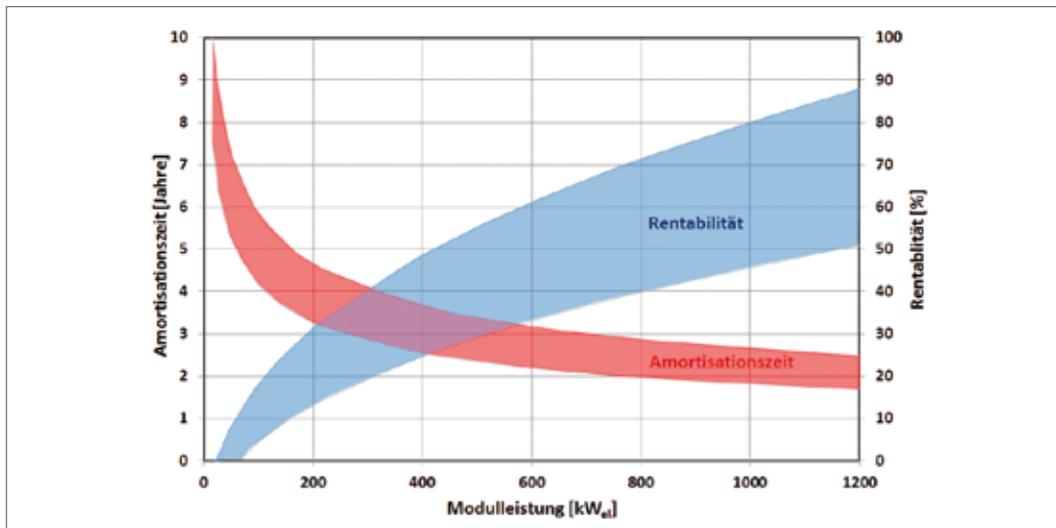
Carnot- und elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Turbineneintrittstemperatur für unterschiedliche Arbeitsmedien.



Idealisierter Dampfkraftwerksprozess mit Wasser bei tiefen Temperaturen. Die Tropfenschlaggefahr bleibt auch mit abgesenktem Druck bestehen.



Beim Prozess mit Pentan endet die Expansion im überhitzten und somit trockenen Bereich.



Amortisationszeiten und Rentabilität bezogen auf 10 Jahre in Abhängigkeit der Modulgröße; die untere Grenze der Amortisationszeit ergibt sich mit der abgeschätzten Kostenfunktion, die obere Grenze durch 50% höhere Investitionskosten.

berechnet. Diese Werte werden von den Investitionskosten beeinflusst, welche wiederum stark von den Modulleistungen abhängen. Vergleicht man die Daten mit jenen von Renz, ergeben sich Kostenreduktionen von 30 bis 40 % in den letzten 15 Jahren. Berücksichtigt man den sprunghaften Anstieg der F&E-Aktivitäten in den letzten fünf Jahren, kann aufgrund von Optimierungen, Standardisierungen und Lerneffekten in naher Zukunft mit weiteren Kostensenkungen gerechnet werden. Insbesondere für kleine Leistungsklassen mit vielen Anwendungen sollte mit der Zeit auch ein Skalenvorteil entstehen.

## Technologie mit Zukunft

ORC ist mittlerweile eine marktreife Technologie, die für einfache Anlagen über 100 kWel bereits heute vertretbare Amortisationszeiten und eine positive Rentabilität erreichen sollte. Die Energiepreise werden in Zukunft steigen, was die Attraktivität auch für kleinere ORC-Systeme verbessert.

Holzbefeuerte ORC-Systeme mit WKK werden sich in der Schweiz in den nächsten Jahren weiter verbreiten. Auch bestehende Anlagen aus der energieintensiven Industrie werden ORC vermehrt zur Energieeffizienzsteigerung einsetzen, auch wenn dafür komplexere Anlagenintegrationen mit entsprechend höheren Kosten und Amortisationszeiten nötig sind wie etwa in der Zementindustrie.

Ein grosses Potenzial liegt in der industriellen Abwärme bei eher kleinen Wärmemengen und relativ tiefen Temperaturen von 80 bis 120 °C. Die Hauptherausforderung liegt in der Kostensenkung kleiner ORC-Module. Es gibt Anbieter, die diese Herausforderung angehen, jedoch mangelt es momentan an Referenzprojekten. Entsprechende Projekte müssen zeitnah gestartet und wissenschaftlich begleitet werden. ☞

Adrian Rettig, Wissenschaftlicher Mitarbeiter ZHAW, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering [www.iefz.zhaw.ch](http://www.iefz.zhaw.ch)