

03 | 2016

# gwi

gaswärme  
international

Zeitschrift für gasbeheizte Thermoprozesse

# PROZESSWÄRME

www.prozesswaerme.net

Intensiv-Seminar der PROZESSWÄRME



## Wärmebehandlung von Stahl

### Prozess- und Anlagentechnik

26.-29. September 2016, Mercure Hotel Dortmund Centrum  
www.prozesswaerme-akademie.de

ISSN 0340-3521

Vulkan-Verlag



### Deutscher Umweltpreis 2011 für die FLOX®-Erfinder.

Das Innovationspotenzial von WS ist ausgezeichnet. FLOX®. Die Entwicklung dieses besonders emissionsarmen Verbrennungsverfahrens – ganz ohne Flamme – eine umweltentlastende Schlüsseltechnologie im Bereich der energieeffizienten Hochtemperaturprozesse erfährt 2011 Europas höchstdotierte Würdigung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

## Deutscher Umweltpreis

[www.flox.com](http://www.flox.com)

Neue patentierte WS Technologie

## WS REKUMAT®s mit Spaltstrom-Rekuperator.

Deutscher  
Umweltpreis

# FLOX®



### INNOVATIVE BRENNER TECHNOLOGIE

WS Wärmeprozess-technik GmbH · Dornierstraße 14 · D-71272 Renningen / Germany  
Telefon: +49 (71 59) 16 32-0 · Fax: +49 (71 59) 27 38 · E-mail: ws@flox.com

WS Inc. 8301 West Erie Avenue · Lorain, OH 44053 / USA  
Phone +1 (440) 385 6829 · Fax +1 (440) 960 5454 · E-mail: wsinc@flox.com

## SCHWERPUNKT

Energieeffizienz in der industriellen Wärmebehandlung

## INTERVIEW

Alexander C. Hanf,  
Geschäftsführer der Firma  
LT Gasetechnik

## FACHBERICHT

Betriebstechnische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

# Nutzung von Abwärme aus industriellen Prozessen durch ORC-Kraftwerke

von **Michael Schmidt**

In vielen industriellen Prozessen entsteht Abwärme, die bisher oft nicht effizient zurückgewonnen werden konnte oder gar ungenutzt an die Umwelt abgegeben werden musste. ORC-Abwärmekraftwerke wandeln diese Abwärme in elektrischen Strom um. Die hier beschriebenen Abwärmekraftwerke, die im Besonderen auch bei Teillast effizient arbeiten, haben sich nach umfangreichen Feldversuchen in unterschiedlichen Industrien bewährt und sind jetzt als Serienprodukte verfügbar. Sie erzeugen nicht nur elektrischen Strom, sondern liefern darüber hinaus auch Nutzwärme im Sinne des KWKG, die in weiteren Anwendungen zum Einsatz kommen kann.

## Use of valuable waste heat from industrial processes via ORC-power plants

In many industrial processes, waste heat is produced that often could not be efficiently recovered or even had to be discharged into the environment unused. ORC waste heat power plants convert this valuable waste heat into electricity. Waste heat power plants, which also work particularly efficiently even under partial load conditions, have proven their worth after extensive field tests in various industries and are now available as series-produced products. Not only do they produce electricity, they also deliver useful heat within the meaning of Germany's Combined Heat and Power Act (KWKG), which can be used in other applications.

Überschüssige Prozesswärme entsteht in vielen Bereichen: in den energieintensiven Prozessen der Metall-, Glas-, Keramik-, Chemie- oder Zementindustrie ebenso wie beim Betrieb von großen Motoren, zum Beispiel in Blockheizkraftwerken oder auch auf Schiffen. Nach umfangreicher Grundlagenforschung hat das Unternehmen Devetec ein Abwärmekraftwerk entwickelt, das auf dem Grundprinzip des Kolbenmotors basiert. Es kann sehr schnell auf wechselnde Abwärmeebedingungen reagieren und so einen außergewöhnlich hohen Anteil der Abwärme verwerten. Hinzu kommt, dass gerade die Kolbenexpansionsmaschine sehr effizient arbeitet, da sie bauartbedingt sehr hohe Differenzdrücke realisieren kann. Dies führt dazu, dass man hohe Temperaturspreizungen von mehr als 150 °C und

daraus resultierend auch eine große Enthalpiespreizung realisieren kann, was zu einer hohen Energieausbeute führt.

Somit erzeugen diese Abwärmekraftwerke auch bei Teillastbetrieb sehr effizient elektrischen Strom. Darüber hinaus stellen sie Wärme auf einem Temperaturniveau von etwa 80 °C anderen Abnehmern zur Verfügung. So kann ein Gesamtnutzungsgrad von mehr als 90 % erzielt werden. Die rückgewonnene Energie kann zum Beispiel genutzt werden, um Anlagen zu heizen, Materialien zu trocknen oder Prozesse zu temperieren. Die Abwärmekraftwerke eignen sich für alle Prozesse, bei denen Temperaturen von mehr als 230 °C entstehen. Neuerdings stehen auch einige Fluide zur Verfügung, die bereits ab 170 °C eine beachtliche Effizienz erzielen.



Bild 1: Kolbenexpansionsmotor

## ENERGETISCHE GESAMTBILANZ UND ÖKOLOGISCHER NUTZEN

Auch die wirtschaftliche Bilanz kann sich sehen lassen: Die hier beschriebenen Abwärmekraftwerke reduzieren die Kosten für den Kauf fremdbezogener Brennstoffe und elektrischer Energie. Hinzu kommt, dass eigenproduzierter Strom zum Teil oder sogar ganz frei von EEG-Umlagen oder sonstigen Abgaben ist. Zusätzliche Einnahmen erzielen die Betreiber durch den KWK-Bonus, denn die Abwärmekraftwerke sind KWK-Anlagen entsprechend dem Kraftwärmekopplungsgesetz (KWK-G). Da sie automatisch arbeiten und keine Überwachung vor Ort erfordern, entstehen auch keine Kosten für Personal.

Industrieanwender bestätigen, dass die Anlagen sich bei gleichzeitiger Stromerzeugung und Wärmenutzung innerhalb von weniger als vier bis fünf Jahren, je nach Konstellation auch in weniger als drei Jahren amortisieren.

## DIE ORC-TECHNOLOGIE

Die Maschinen von Devetec nutzen das als Organic Rankine Cycle (ORC) bekannte Verfahren, das nach dem schottischen Physiker und Ingenieur William Rankine (1820 bis 1872) benannt ist. Er gilt als einer der Mitbegründer der Thermodynamik.

Das Verfahren des unternehmensspezifischen ORCs ist ein klassischer Dampfkreisprozess: Der Abwärmestrom eines Prozesses wird genutzt, um ein organisches Medium – in diesem Fall Bioethanol – zu verdampfen, das anschließend in einem Dampfexpansionsmotor entspannt wird und seine Arbeit verrichtet. Der nunmehr drucklose Dampf wird dann in einen Kondensator geleitet, um dort verflüssigt zu werden. Danach wird das flüssige Ethanol mit einer Pumpe wieder dem Verdampfer zugeführt und erneut verdampft.

Somit ist der Prozess geschlossen und der Kreislauf startet von vorne. Die am häufigsten zum Einsatz kommenden ORC-Systeme basieren auf einstufigen Turbinen. Diese Turbinen sind im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass nur ein geringes Enthalpiegefälle ( $\Delta H$ ) umgesetzt werden kann, was sich mit der geringen Druckdifferenz (ca. 5 bar) begründen lässt.

Als potenzielle Alternative wurden vermehrt sowohl Schraubenexpander als auch Wälzkolbensysteme erprobt, wobei sich hier die Leckage als großes Problem gezeigt hat. Beide Systeme können bisher nur geringe elektrische Wirkungsgrade ( $\eta_{el}$  ges.) – meist deutlich unter 10 % – bezogen auf die zur Verfügung stehende Abwärme im unteren Temperaturbereich ( $< 600$  °C) realisieren.

Das hier verwendete organische Fluid ist in der Regel Bioethanol, das sich aufgrund vieler Vorteile bewährt hat. Es ist umweltverträglich, denn es ist weder toxisch noch fällt es unter die von der EU herausgegebene F-Gas-Verordnung. Außerdem gefriert es nicht – gerade bei im Freien stehenden Anlagen ist dies von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus zeichnet Bioethanol sich durch einen günstigen Preis aus.

## DAS FLUID BIOETHANOL

Ethanol ist ein nassentspannendes Fluid. Bei der isentropen Expansion nähert es sich der Taulinie an und schneidet diese. Dadurch muss nur noch die Kondensationsenergie abgeführt werden um das Ethanol zu verflüssigen. Durch die hohen möglichen Druckdifferenzen der Verdrängungsmaschine kann die Energieumwandlung in einer einzigen Stufe realisiert werden. Das Fluid kann dadurch in seinem kältesten Zustand der Primärquelle zugeführt werden, wodurch diese maximal abgekühlt werden kann und ein hoher Wärmetausch realisiert wird.

Typische Fluide für ORC-Prozesse mit Turbinen sind trockenentspannend. Sie entfernen sich bei der isentropen Expansion immer weiter von der Taulinie, es wird weiter überhitzt. Das überhitzte Fluid muss zunächst im Rekuperator abgekühlt werden, bevor es im Kondensator verflüssigt werden kann. Um dabei die Energie nicht ungenutzt zu verlieren, wird diese zur Vorwärmung genutzt. Der Primärquelle wird dadurch aber bereits erhitztes Fluid zugeführt und sie kann deshalb nur noch teilweise abgekühlt werden. Der Wärmetausch in den ORC-Prozess ist dadurch eingeschränkt.

Von Beginn der Entwicklung an wurden die Anlagen in Kooperation mit dem TÜV so konzipiert, dass keinerlei Gefährdungspotenzial besteht, gerade auch im Hinblick auf das Thema Brand und Explosionsschutz.

Mit dem an Ort und Stelle erzeugten Strom reduzieren die Betreiber den Einkauf von Strom von Drittanbietern. Dabei sparen sie auch Umlagen wie Netzentgelte oder Haftungs- und EEG-Umlagen.

Die hier beschriebene Technologie eignet sich für Industriebetriebe mit energieintensiven Produktionsprozessen und die Energiewirtschaft. In Blockheizkraftwerken, die mit Gruben-, Deponie-, Klär- oder Erdgas betrieben werden, verbessern sie die Energiebilanz genauso wie in Biogas-, Solar- und Geothermieanlagen. In Verbindung mit einem Verbrennungsmotor entsteht ein sogenanntes G&D-Kraftwerk, das sich durch hohe Wirkungsgrade auszeichnet. Außerdem verbessern diese Abwärmekraftwerke die Energiebilanz von schweren, mobilen Arbeitsmaschinen, da sie elektrischen Strom und Wärme für den eigenen Bedarf erzeugen und so erhebliche Mengen an Treibstoff einsparen.

### DER ORC-DAMPF-EXPANSIONSMOTOR

Das Herzstück jedes hocheffizienten Abwärmekraftwerkes ist der Expander. Ergebnis diverser Grundlagenuntersuchungen im Rahmen der F&E-Aktivitäten war, dass die Kolbenmaschine das System mit der höchsten Effizienz ist.

Kolbenexpansionsmotoren (**Bild 1**) erzielen in einer Stufe eine sehr hohe Druckdifferenz, womit das Enthalpiegefälle deutlich steigt und somit viel mehr Strom erzeugt werden kann, als dies mit verwandten Technologien möglich ist. Ein weiterer erheblicher Vorteil des Kolbenexpansionsmotors ist seine echte Teillastfähigkeit. In Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Abwärmemenge arbeitet der V8 Motor in einer Spanne von 0 bis 130 kW, der V12 Motor in einer Spanne von 0 bis 200 kW oder der V16 Motor von 0 bis 266 kW mit annähernd konstantem Wirkungsgrad. Sollten andere Wärmequellen mit tieferen Temperaturen erschlossen werden, lässt sich der Motor auch mit anderen organischen Fluiden betreiben, ohne dass er hierzu verändert werden muss.

Nach einer intensiven Entwicklungs- und Erprobungszeit mit industriellen Anwendungspartnern von über fünf Jahren stehen die Abwärmekraftwerke jetzt in einer Produktfamilie mit drei Leistungsklassen zur Verfügung. Damit können ungenutzte Abwärmeströme zwischen 800 kW und 2 MW auf einem Temperaturniveau von insgesamt mehr als 230 °C hocheffizient verstromt werden. Die Abwärmekraftwerke können genau auf die Anforderungen der Kunden angepasst werden.

Die Abwärmekraftwerke werden als mobile Containereinheiten mit der Expander-Generator-Einheit, der Pumpeneinheit und der Steuerungseinheit geliefert. Auf diese



**Bild 2:** Abwärmekraftwerk an einer Glasschmelze

Weise ist es möglich, sie einfach in bestehenden Werken nachzurüsten. Auf Wunsch bietet das Unternehmen auch die gesamte Wärmeübertragungstechnik an. Werden höhere Leistungen benötigt, können mehrere Anlagen parallel geschaltet werden.

Die Anlagen arbeiten vollautomatisch und werden fernüberwacht. Der eigens dafür entwickelte Noise & Vibration Guard überwacht Verschleißerscheinungen, schützt den Motor vor potenziellen Schäden und minimiert im Rahmen der vorbeugenden Wartung das Risiko von Störungen.

### BEISPIEL GLASINDUSTRIE

Ende 2013 wurde an der erdgasgefeuerten Glasschmelze der Noelle und von Campe Glashütte GmbH in Boffzen im Weserbergland ein Abwärmekraftwerk in Betrieb genommen (**Bild 2**). Die Abwärmequelle dieser Referenzanlage stellt ganzjährig ein konstantes Wärmeniveau zur Verfügung und bietet daher optimale Voraussetzungen für eine hohe Strom- und Nutzwärmeproduktion. Mit einem V12-Dampfexpansionsmotor, der hier erstmals eingesetzt wurde, erzeugt das Abwärmekraftwerk eine Leistung von etwa 200 kW<sub>el</sub>.



**Bild 3:** Kühlluft aus einer Säurespaltanlage dient als Abwärmequelle

Die nach dem Prozess verbleibende Kühlwärme aus dem Kondensator, die mit einer Temperatur von 70 °C noch zur Verfügung steht, nutzt das Unternehmen, um Hallen auf dem Werksgelände zu heizen und so im Winter den Verbrauch von fossilen Brennstoffen für die Werksbeheizung deutlich zu senken.

### BEISPIEL CHEMIEWERK

Anfang 2013 wurde am Standort Worms von der Evonik Industries ein weiteres Abwärmekraftwerk in Betrieb genommen (**Bild 3**). Als Abwärmequelle dient hier die Kühlluft aus einer Säurespaltanlage zur Aufbereitung von Schwefelsäure. Diese Abwärme steht mit einem Temperaturniveau von 350 °C zur Verfügung.

Eine Besonderheit dieser Anlage ist, dass der Heißluftstrom starken Schwankungen unterworfen ist. Die Anlage läuft also sehr häufig im Teillastbetrieb und hat sehr viele Phasen. Das System ist in einen komplexen Industrieproduktionsprozess integriert und muss hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen. Dennoch hat Devetec die Anlage in weniger als vier Monaten installiert, unmittelbar anschließend wurde sie technisch abgenommen.

Da die Wärme aus dem ORC-Kondensator nicht mehr in einem Heizkreis benutzt werden kann, kommt erstmalig ein Ethanol-Luftkondensator zum Einsatz. Dieser ermöglicht selbst im Sommerbetrieb bei 42 °C Außentemperatur eine zuverlässige Verflüssigung des Bioethanols, ohne die

elektrische Nutzleistung der ORC-Anlage gravierend zu reduzieren.

### BEISPIEL STOSSOFEN IN DER STAHL-INDUSTRIE

Auf dem Werksgelände der Badischen Stahlwerke in Kehl ist seit Anfang 2014 ein weiteres Abwärmekraftwerk von Devetec in Betrieb, das die Abwärme eines mit Erdgas befeuerten Stoßofens nutzt, um daraus elektrischen Strom zu erzeugen. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse wurde das Abwärmekraftwerk in einer Höhe von 8 m und in einer Entfernung von 80 m zum ORC-Wärmeüberträger aufgestellt.

Es gibt Überlegungen, die Abwärme des ORC-Prozesses zum Betrieb einer Absorptionskältemaschine zu verwenden. Durch die Verwendung eines Saugzuggebläses in der Rauchgasstrecke des ORC-Wärmetauschers konnte der Einfluss des Abwärmekraftwerkes auf die bestehende Druckregelung des Stoßofens ausgeschlossen werden.

### BEISPIEL HAUBENGLÜHE IN DER STAHL-INDUSTRIE

Bei der Bilstein GmbH & Co. KG in Hagen-Hohenlimburg ist eine Anlage von DeVeTec seit 2014 Bestandteil eines umfassenden Energieeffizienzprogramms: Hier wird die Glüherei nicht isoliert betrachtet, sondern das gesamte Werk wird einbezogen. Der grundlegend neue Ansatz ist,



**Bild 4:** ORC-Modul mit Dampfexpansionsmotor

die beim Kühlen der bis zu 700 °C heißen Coils überschüssige Energie auszukoppeln und sie in Form von elektrischem Strom und thermischer Energie anderen Verbrauchern im Werk zur Verfügung zu stellen.

Wenn der Kühlprozess startet, wird der als Inertgas verwendete Wasserstoff von 700 bis auf 350 °C abgekühlt. Die dabei entzogene Energie erwärmt in einem speziellen Bypass-Kühler Thermalöl auf eine Temperatur von bis zu 270 °C. Dieses Öl wird genutzt, um das Ethanol zu verdampfen, mit dem das ORC-Modul mit seinem Dampfexpansionsmotor elektrischen Strom erzeugt (**Bild 4**). Die bei der Kondensation des Ethanols anfallende Wärme wird zur Hallenheizung und zum Erwärmen eines Emulsionsbades genutzt. Auch diese Anlage ist ein Beispiel für hohe Effizienz bei stark schwankendem Wärmeangebot. Pro Heizzyklus der Glühe erzeugt die ORC-Anlage etwa 350 kWh<sub>el</sub> elektrischen Strom, der nicht mehr vom Energieversorger zugekauft werden muss.

Die Anlage wurde durch das Bundesumweltministerium im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms gefördert.

## FAZIT

Abwärmekraftwerke gewinnen ein Maximum an Energie aus industriellen Prozessen zurück, indem sie gleichzeitig elektrischen Strom erzeugen und die danach noch vorhandene Energie auf unterschiedliche Temperaturniveaus nutzen. So leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz. Außerdem sind sie ein Musterbeispiel für CO<sub>2</sub>-neutrale und emissionsfreie Stromerzeugung, denn ein Abwärmekraftwerk kann bei einer Nennleistung von 200 kW<sub>el</sub> bis zu 3.000 t/CO<sub>2</sub> pro Jahr einsparen.

## AUTOR



### Michael Schmidt

DeVeTec GmbH

Saarbrücken

Tel.: 0681 / 8307880

info@devetec.de