

# Energetischer Vergleich von Kreisprozessen zur Verstromung von industrieller Abwärme bei niedrigem Temperaturniveau

G. BECKMANN

*Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik Beckmann, Wien, Österreich*

J. KRAIL, R. KROTIL

*Fachhochschule Burgenland, Pinkafeld, Österreich*

D. RIXRATH

*Forschung Burgenland, Pinkafeld, Österreich*

**ABSTRACT:** Power generation from industrial waste heat in the temperature range from 550 to 140 °C could be a significant contribution to raise energy efficiency and to abate emission of climate gases, as long as technologies for it are available, affordable, efficient and flexible. Different energy recovery concepts have been proposed and adjusted for these specific requirements. The Organic Rankine Cycle (ORC) technology represents the state of the art. Nevertheless, a more general use of waste heat for power generation has not yet been achieved.

As an alternative to conventional technologies, here we propose the use of an innovative and promising steam Rankine cycle which applies surplus flash steam generation and a novel triple pressure turbine. Based on the example of power generation from hot waste air emitted by clinker coolers used in the cement industry, our assessment evaluates mainly the yield in power and compares performance figures of the innovative steam cycle with other conventional figures such as the ORC process as benchmark, the supercritical ORC and the CO<sub>2</sub>-cycle as a possible future option. The comparison is based on equal assumptions and is carried out with a common simulation tool. The assessment shows that the innovative steam cycle has 29 % higher power output than the benchmark process, surpasses the considered future options and is able to supply more than one waste heat recovery source.

The presented assessment is part of an exploratory research project with the title: Rankine cycle for industrial waste heat ("RaCiA"). In a next phase, an industrial research is planned which is supposed to include further cooperation partners from areas of plant operating, component manufacturer and plant engineering companies.

## 1. EINLEITUNG

Die Verstromung von industrieller Abwärme mit einem Temperaturbereich von 550-140 °C könnte einen signifikanten Beitrag zur THG-Minderung und zur Substitution von fossilen Energien zur Stromerzeugung darstellen (Pehnt et al., 2001), sofern entsprechende Technologien verfügbar, leistbar, effizient und flexibel wären. Derzeit wird für diesen Einsatzbereich die dem Stand der Technik entsprechende Technologie des Organic Rankine Cycles (ORC) angeboten und verwirklicht. Eine weitgehende Nutzung der Abwärmen zur Stromerzeugung steht allerdings noch aus.

Als Alternative zu herkömmlichen Technologien wird für industrielle Abwärmen aus Abgas, Abluft und Druckluft ein innovativer und universell anwendbarer Dampf-Rankine-Cycle vorgeschlagen, welcher mit der Dreidruckdampf-Erzeugung sowie der Turbine unkonventionelle Wege geht und Vorteile gegenüber anderen Kreisprozessen erwarten lässt.

Ausgehend vom Beispiel der Stromerzeugung aus der Abluft von Klinkerkühlern in der Zementindustrie quantifiziert die vorliegende Evaluation vor allem die Ausbeute an Strom und vergleicht diese Energieeffizienz mit jener des herkömmlichen ORC-Prozesses als Benchmark, des herkömmlichen Wasser/Dampf-Kreislaufes, sowie des noch zu entwickelnden CO<sub>2</sub>-Kreislaufes. Der Vergleich basiert auf gleichen Ausgangsdaten, vergleichbaren Parameter der Komponenten und verwendet das gleiche Simulationswerkzeug IpsePro (SimTech GmbH, 2014). Als Ergebnis zeigt der Vergleich eine höhere Stromausbeute als

andere fortschrittliche Kreisprozesse und, verglichen mit der Benchmark, eine um ca. 29 % höhere Stromausbeute. Zudem kann die vorgeschlagene Technologie mehrere Abwärmequellen (prozessinterner oder hybrider Herkunft) gleichzeitig nutzen.

Die vorliegende Studie stellt einen Teil des Sondierungsprojektes „RaCiA - Rankine Cycle für Industrielle Abwärmen“ dar. Als weiterer Schritt ist eine industrielle Forschung mit Blick auf weitere Kooperationspartner aus dem Feld der Betreiber, der Komponentenhersteller, der Anlagenbauer anvisiert.

## 2. DIE ABWÄRMEQUELLE UND DIE AUSGANGSDATEN

Von den vielen Anwendungsmöglichkeiten im Einsatzbereich von 550 bis 140 °C wird die Nutzung der Abluft von Klinkerkühlern der Zementindustrie (mit einer um den Mittelwert von ca. 275 °C stark schwankender Temperatur) zur Stromerzeugung betrachtet. Abb. 1 zeigt schematisch die zur Nutzung verfügbare Abwärmequelle und Abb. 2. die beispielhafte Gesamtanordnung der Abwärmenutzung durch eine herkömmliche ORC-Technologie in einem Zementwerk (ABB, 2011; Heidelberger Zement AG, 2001).

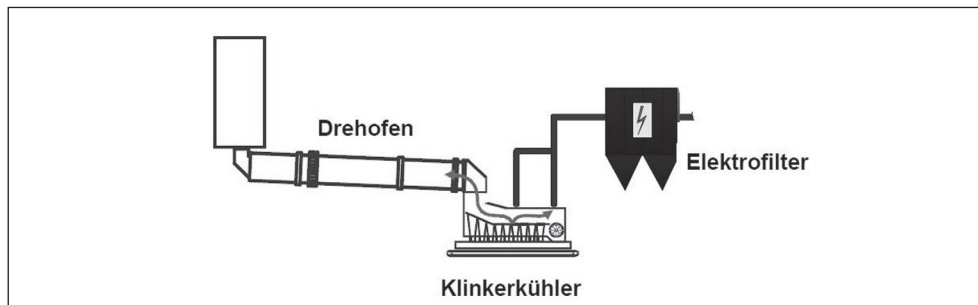


Abb. 1: Abwärmequelle - die ca. 275 °C heiße, im Elektrofilter entstaubte, Klinkerkühler-Abluft (Heidelberger Zement AG, 2001); in herkömmlichen Zementwerken wird diese über einen Kamin an die Atmosphäre abgegeben

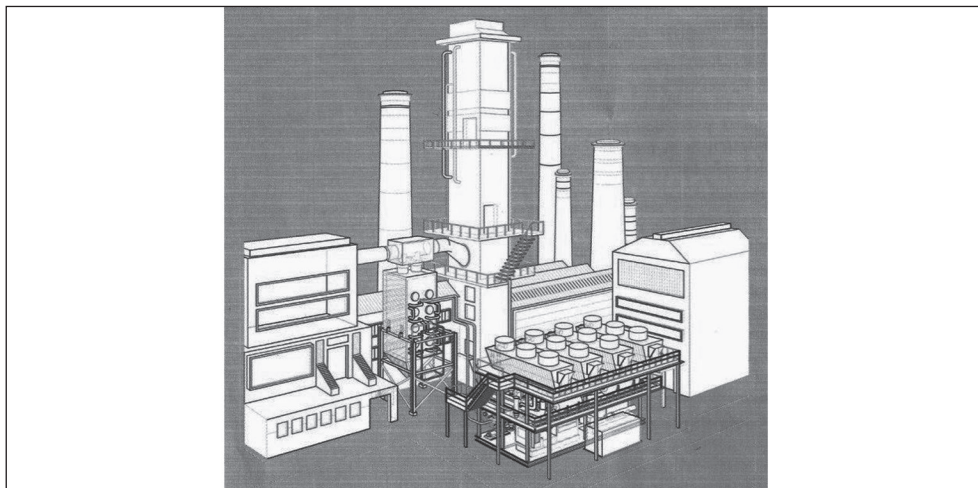


Abb. 2: Gesamtanordnung der Abwärmenutzung einer ORC-Technologie, integriert in einem Zementwerk: diese besteht im Wesentlichen aus dem Thermoöl-Abhitzekeessel (links, hinten), dem Maschinenhaus (rechts, vorne) mit den darüber liegenden Luftkühlern und Ventilatoren zur Rückkühlung (ABB, 2011)

Die Festsetzung der Prozessbedingungen für den Vergleich und die Simulation folgt nach bereits umgesetzten Best-Practice Anlagen im zu untersuchenden Segment der Zementindustrie. Eine der ersten Anlagen, die in Europa errichtet wurden und welche nach wie vor als Best-Practice Beispiel genannt wird, ist die ORC-Anlage der Heidelberg Zement AG am Standort Lengfurt (Heidelberger Zement AG, 2001). Die Auslegungsbedingungen (siehe Tab. 1) werden in Anlehnung an diese Anlage wie folgt festgesetzt:

Tab. 1: Auslegungsbedingungen Prozesssimulation

Wärmequelle: Abluft Klinkerkühler	Einheit	Auslegung	Schwankungsbreite	
Temperatur	[°C]	275	von 220	bis 350
Massenstrom	[kg/s]	54,4		
Volumenstrom	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	150.000		
Abwärme-Input, bezogen auf 25 °C	[MW]	14	11 ... 13	17 ... 18
Wärmesenke: Umgebungsluft				
Temperatur	[°C]	11	saisonbedingt	
Massenstrom	[kg/s]	470		

Für die in den unterschiedlichen Prozessen eingesetzten Wärmetauscher werden die folgenden Randbedingungen definiert (siehe Tab. 2). Die Bezeichnung Primärseite gibt dabei die Seite des heißen Mediums, die Bezeichnung Sekundärseite die Seite des kalten Mediums an. Die angegebenen Daten beziehen sich auf den Auslegungsfall, der für die Dimensionierung der Komponenten relevant ist. Ausgehend von diesem Auslegungsfall werden für die unterschiedlichen Prozesse Optimierungsrechnungen bzw. Parametervariationen durchgeführt. Des Weiteren wurden Wirkungsgrade gemäß Tab. 3 für Maschinen gewählt.

Tab. 2: Zugrunde gelegte Daten für Wärmetauscher

Wärmetauscher Typ	Medium Primärseite	Medium Sekundärseite	Pinch-point [K]	Druckverlust Primärseite [mbar]	Druckverlust Sekundärseite [mbar]
Abhitzeessel Dampf- kreislauf	Abluft	Wasser/ Dampf	25	7	2.000
Abhitzeessel ORC unterkritisch	Abluft	Thermoöl	45	7	4.500
Abhitzeessel CO <sub>2</sub> überkritisch	Abluft	CO <sub>2</sub> überkritisch	25	7	2.000
Vorwärmer & Verdampfer	Thermoöl	organisches Arbeitsmittel	13,8	5.000	2.000
Rekuperator ORC unterkritisch	organischer Dampf	organische Flüssigkeit	31	50	1.000
Rekuperator CO <sub>2</sub> überkritisch	CO <sub>2</sub> gasförmig	CO <sub>2</sub> überkritisch	31	2 % vom Eintrittsdruck	2 % vom Eintrittsdruck
Kondensator/ Kühler alle Prozesse	Dämpfe: Wasser-/ organisch/CO <sub>2</sub>	Umgebungs- luft	11	2 % vom Eintrittsdruck	1,5

Tab. 3: Zugrunde gelegte Daten für Maschinen

Maschine	Wirkungsgrad [%]		
	innerer $\sim$	mechanischer $\sim$	elektrischer $\sim$
Pumpe	78,5	97,0	-
Ventilator	85,0	97,0	-
Verdichter	78,5	97,0	-
E-Motor unter 7kW	-	97,0	95,0
E-Motor ab 7 kW	-	98,0	98,0
Generator	-	97,0	98,0
Dampfturbine	gem. Abb. 5	98,0	-
ORC- und CO <sub>2</sub> - Turbine	74,5	98,0	-

### 3. DIE UNTERSUCHTEN KREISPROZESSE

#### 3.1 DER INNOVATIVE DAMPFPROZESS RACIA

Der innovative Dampfprozess RaCiA hat mit dem unter Kapitel 3.3 beschriebenen konventionellen Ein-druck-Dampfprozess nur die Kondensation und das Prozessmedium Wasser/Dampf gemein. Das Q-T-Diagramm seines „Abhitzekeessels“ (siehe Abb. 3) zeigt die Temperaturabnahme der heißen Klinkerabluft über die vom Prozessmedium aufgenommene Wärme; der Speisewasserstrom wird derart gesteigert („Überspeisung“), bis die Abluftlinie und die Vorwärmlinie parallel verlaufen; damit wird folgendes erreicht: die Abluftaustrittstemperatur sinkt, womit die ausgekoppelte Wärme steigt, weiters ist für eine Druckoptimierung auf der Kreislauflseite „Luft nach oben“. Naturgemäß kann in der Siedezone nur eine Teilverdampfung erreicht werden, sodass der betrachtete Bauteil eher die Funktion eines Ecos mit Vorverdampfung hat, eine durchgehende Heizfläche aufweist und ein Dampf/Wassergemisch liefert.

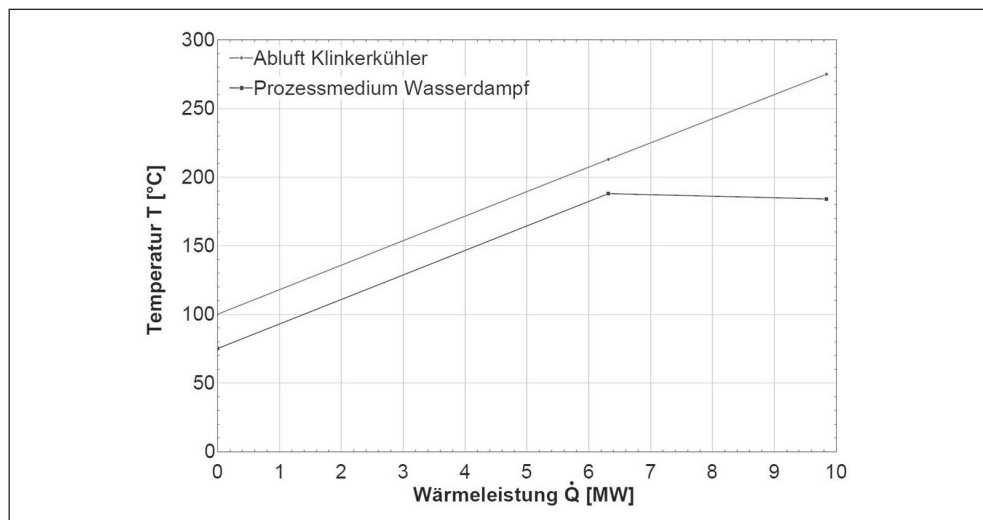


Abb. 3: Q-T-Diagramm des Abhitzekeessels für den innovativen Dampfkreislauf

Gemäß dem Fließbild (Abb. 4) gelangt dieses Dampf/Wassergemisch in die Hochdruck-Abscheideflasche, der entfeuchtete Hochdruckdampf wird in der Dampfturbine verstromt, während das abgeschiedene Hochdruckwasser energetisch weiter genutzt wird (Beckmann, 2005). Im Falle der kompletten Verstromung der Abwärme wird das Hochdruckwasser im Ablaufregelventil gedrosselt, wobei ein Flash-Dampf/Wassergemisch entsteht, welches in der nachfolgenden Mitteldruck-Abscheideflasche in dem Mitteldruckdampf zwecks Verstromung und in dem Mitteldruckwasser getrennt wird. Im gezeigten Fließbild ist noch eine Niederdruckstufe nachgeschaltet, sodass insgesamt drei Dämpfe mit verschiedenen Druckstufen zur Verstromung bereitgestellt werden.

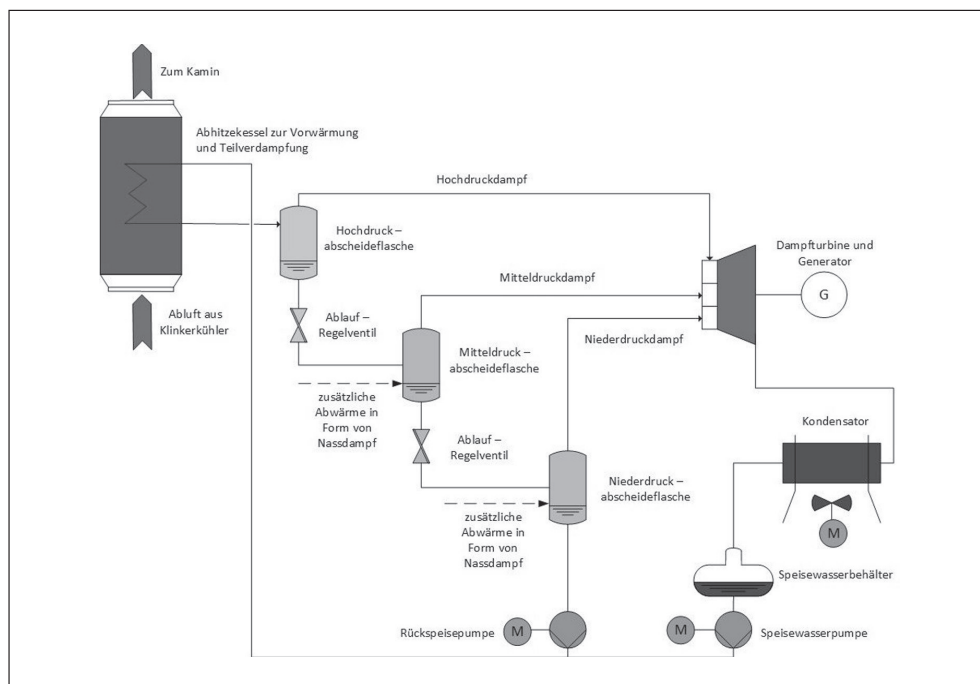


Abb. 4: Innovativer Dampfsprozess mit drei Druckniveaus (11 bar, 184 °C; 3 bar, 134 °C und 0,7 bar, 90 °C) zur Nutzung der 275 °C heißen Abluft

Kleindampfturbinen in der betrachteten Leistungsklasse von größenordnungsmäßig 1,5 MW<sub>el</sub> werden als Gleichdruckturbinen, oft nur mit einem Turbinenrad, neuerdings auch ohne Untersetzungsgetriebe (Hampel, 2008) ausgeführt. Die Bezeichnung Gleichdruckturbine besagt, dass das gesamte Druckgefälle in einer Düse oder einem Düsenkasten in Geschwindigkeit umgewandelt wird und das Gleichdruckrad die Strömungsumlenkung nutzt. Das innovative Dampfturbinensystem weist für jede Dampfmenge, mit ihrem Druckniveau, einen eigenen Düsenkasten auf, welche auf das gemeinsame Gleichdruckrad wirken. Die Düsenkästen haben angepasste Düsenwinkel, um Verluste am Laufradeintritt zu minimieren (Beckmann, 2014). Die Turbinenwirkungsgrade einer derartigen Anordnung ergeben sich gemäß der Abb. 5, welche zeigt, dass in einem weiten Bereich des Gefälles passable Wirkungsgrade erreicht werden (z.B. Wirkungsgrade über 70 % im Gefälle-Bereich von 175 und 760 kJ/kg).

Die Prozesssimulation, mit der Druckoptimierung, ergab folgende Drücke: Hochdruck/Mitteldruck/Niederdruck = 11/3/0,7 bar; die Ergebnisse sind in der Tab. 4 des Kapitel 4, Spalte 3, für den druckoptimierten Auslegungsfall dargestellt. Die aussagekräftigste Effizienz-Ziffer, welche auch für den Vergleich mit

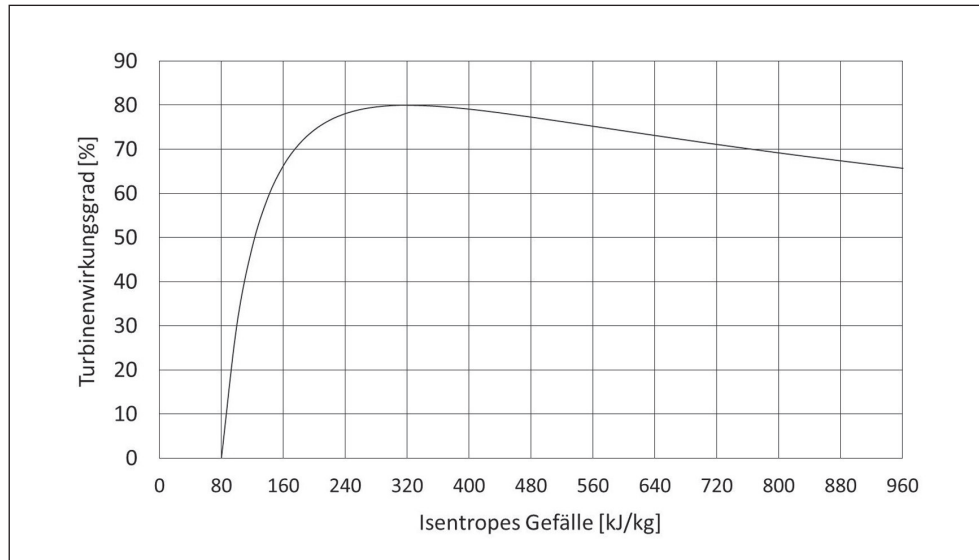


Abb. 5: Turbinenwirkungsgrad in Abhängigkeit des isentropen Gefälles bei 80 % Schaufelwirkungsgrad und 400 m/s Umfangsgeschwindigkeit

den restlichen simulierten Prozessen herangezogen wird, ist der Netto-Wirkungsgrad, bezogen auf eine Abwärmeleistung mit der Referenztemperatur 25 °C. Dabei werden, von der Brutto-Leistung des Generators die Antriebsleistungen der folgenden Komponenten abgezogen, um zu einer Nettoleistung des Gesamtprozesses zu kommen:

- Kühlluftventilatoren des Kondensators
- Alle Pumpenantriebe
- Fiktiver Saugzugventilator am Ende des Abhitzekeessels, um seinen Druckverlust zu kompensieren.

Der Netto-Wirkungsgrad beträgt 10,1 %.

### 3.2 DER HERKÖMMLICHE (UNTERKRITISCHE) ORC-PROZESS

Der ORC-Prozess geht einen anderen Weg, sich dem Angebot der Abwärmequelle anzupassen, nämlich durch die Wahl eines (organischen) Kreislaufmediums mit einer vergleichsweise geringeren Verdampfungswärme als Wasser. Die durch Simulation nachgerechneten Daten beziehen sich auf eine ausgeführte und vermessene Industrieanlage (Heidelberger Zement AG, 2001).

Wie die Abb. 6 zeigt wird im Abhitzekeessels die Kühlerabluft (im Auslegungsfall von 275 °C auf 125 °C) abgekühlt und Thermoöl aufgeheizt, welches über einen Zwischenkreis den eigentlichen ORC beheizt. Zwischenkreis: Thermoöl: Mobiltherm 594; 84,6 t/h; Eintrittstemperatur 85 °C; Austrittstemperatur 230 °C; Gesamtinhalt 25 m<sup>3</sup>.

ORC-Kreislauf mit Vorwärmer und Verdampfer; Kreislaufmedium: n-Pentan; 60 t/h; Frischdampfzustand: 19,4 bar, 162 °C; Kondensation: 0,98 bar, 35 °C; Gesamtinhalt von 6 m<sup>3</sup>. Turbine: 2- stufig; Leistung an der Klemme, gemäß Auslegung: 1,32 MW. Da der organische Dampf bei der Expansion überhitzt, ist vor dem luftgekühlten Kondensator (Antriebsleistung der Ventilatoren insgesamt 72 kW) ein Rekuperator vorzusehen.

Es galt, diese Daten möglichst genau nachzurechnen und der Simulation zugrunde zu legen und gemeinsame Datensätze für die Vergleichssimulationen herzustellen.

Gemäß der im Kapitel 3.1 beschriebenen Definition des Netto-Wirkungsgrades beträgt der Netto-Wirkungsgrad nur 7,8 %, wobei auch der Antrieb der Thermoölpumpe mit berücksichtigt wurde.

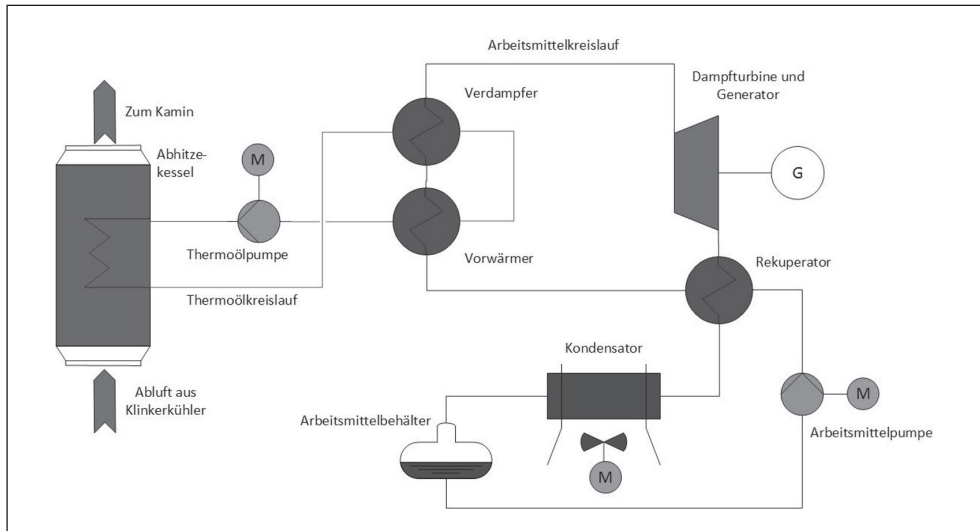


Abb. 6: ORC- Kreisprozess zur Nutzung von Klinkerabluft im Zementwerk Lengfurt der Heidelberger Zement AG (Turbineintritt: 19,4 bar, 162 °C; Kondensation: 0,98 bar, 35 °C)

Als Option zur weiteren Wirkungsgradsteigerung wird der überkritische ORC-Prozess genannt; dabei wird ein überkritisches Kreislaufmedium verwendet, welches während der Wärmeaufnahme seine Temperatur stets steigert. In der Schaltung hat der Dampferzeuger keine getrennte Vorwärm- und Verdampferzone. In einer ausführlichen Studie wird jedoch angegeben, dass eine derartige Prozessführung erst bei einer Wärmequelle mit Temperaturen über 300 °C Wirkungsgradvorteile gegenüber dem unterkritischen ORC-Prozess aufweist (Larsen et al., 2013).

Naturngemäß besteht auch beim ORC-Prozess die Möglichkeit, die Effizienz durch eine Mehrstufige Ausführung zu erhöhen. Die Abb. 7 zeigt einen derartigen Vorschlag, der noch zu entwickeln wäre. Bei diesem Vorschlag wird von der Wärmequelle her betrachtet einem unterkritischen ORC-Kreislauf ein zweiter ORC-Kreislauf zur Nach-Nutzung der Abwärme nachgeschaltet, welcher mit einer niederen Siedetemperatur arbeitet (was durch ein niedrigeres Druckniveau oder auch durch ein niedersiedendes organisches Arbeitsmedium zu erreichen ist).

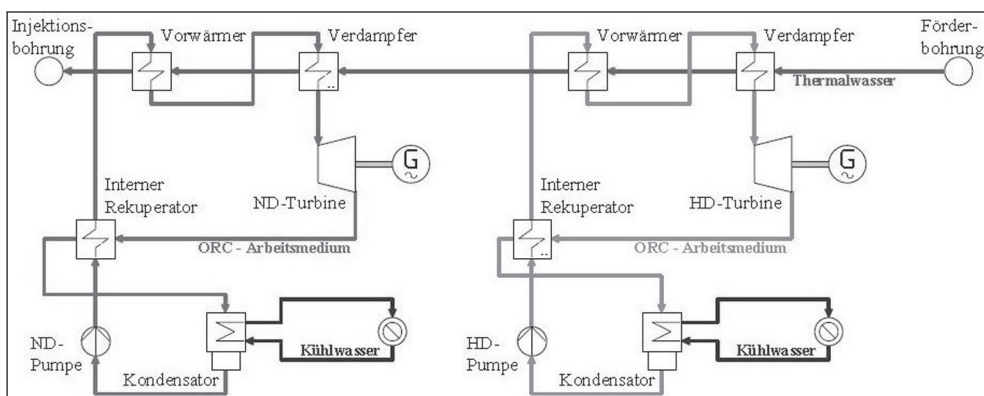


Abb. 7: Zweistufiger ORC- Prozess: Zwei hintereinander geschaltete ORC-Prozesse (HD/HT und ND/NT) (Heberle und Brüggemann, 2012); der Strom der Wärmequelle fließt von rechts nach links.



Die erreichbare Wirkungsgradsteigerung der angeführten ehrgeizigen Maßnahme wird mit bis zu 15 % (relativ) gegenüber dem konventionellen unterkritischen ORC-Prozess angegeben. Dann läge der Netto-Wirkungsgrad bei 9 %, also noch immer unter dem des innovativen Dampfkreislaufes.

### 3.3 DER EINDRUCK-WASSERDAMPFPROZESS

Der Eindruck-Sattdampfprozess stellt eine einfache und konventionelle Möglichkeit zur Stromproduktion aus Abwärme dar. Eine Dampfüberhitzung würde bei der vorliegenden Abwärmequellen nur im begrenzten Ausmaß möglich sein und bringt thermodynamisch keine wesentlichen Vorteile.

Das Q-T-Diagramm (Abb. 8) stellt die Wärmeübertragungsverhältnisse im Abhitzekeßel dar. Während sich die Abluft von 275 °C auf ca. 135 °C abkühlt, kommt es an der wärmeaufnehmenden Seite sowohl am Ende des Ecos als auch am Anfang der Verdampfung zur Temperaturannäherung („Pinch-Punkt“), welche prozessentscheidend ist: ein höherer Dampfdruck würde zwar zu einer besseren Thermodynamik des Kreisprozesses führen, jedoch steigt dann die Abgastemperatur und damit die ausgekoppelte Wärmeleistung des Abhitzekeßels. Dieses Dilemma ist bei Endruck-Dampfprozessen jedenfalls unter einer Heißgastemperatur von 650 °C vorgegeben, weshalb sich für diesen Temperaturbereich Kreisprozesse mit alternativen Kreislaufmedien etablieren konnten.

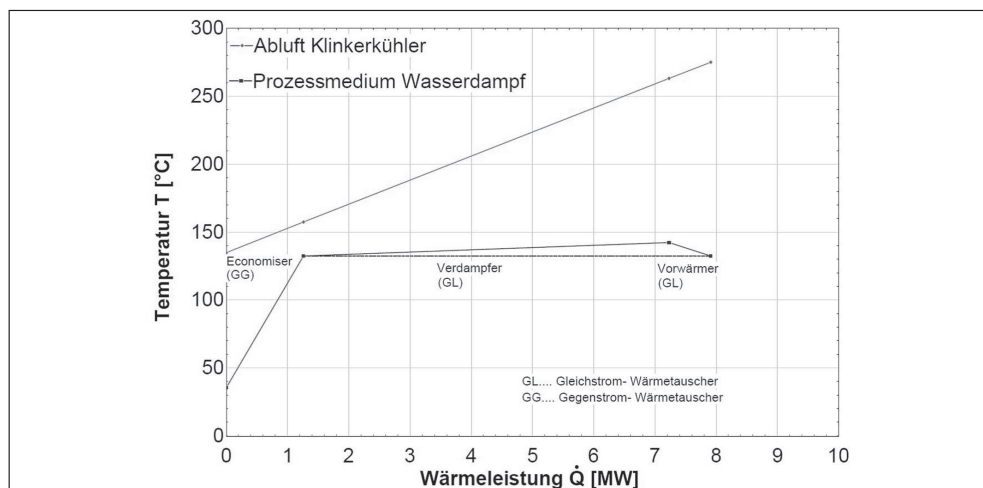


Abb. 8: Q-T-Diagramm des Abhitzekeßels für einen Eindruck-Sattdampfprozess

Das Verfahrensfließbild (siehe Abb. 9) zeigt den Abhitzekeßel zur Vorwärmung und zur Verdampfung, mit einer Dampftrommel und einem Umlaufsystem. Der darin produzierte Sattdampf wird in der Turbine verstromt. Nach der Turbine gelangt der Abdampf in den luftgekühlten Kondensator und kondensiert. Das Kondensat gelangt in den Speisewasserbehälter und wird aus diesem mit der Speisewasserpumpe hochgepumpt.

Im ersten Schritt der Prozesssimulation wurde eine Optimierung der Frischdampf- Zustandes durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass der optimale Turbineneintrittsdruck nur 3 bar beträgt. Die Ergebnisse der Prozesssimulation sind in der Tab. 4 des Kapitels 4, Spalte 5, dargestellt. Der Netto-Wirkungsgrad beträgt nur 7,7 %.



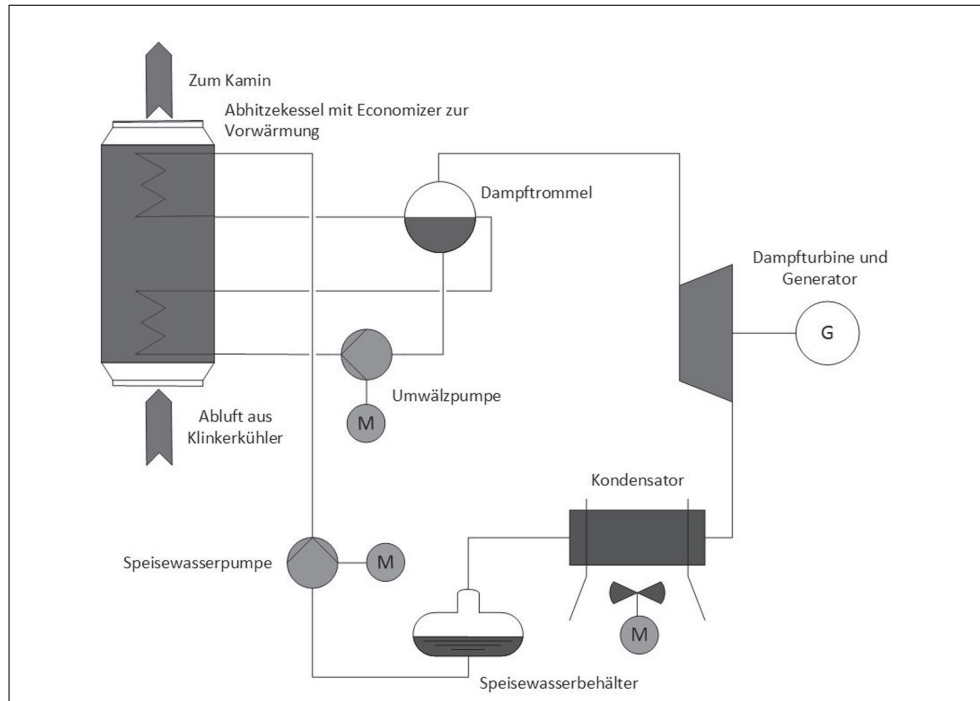


Abb. 9: Eindrucks-Dampfprozess (3 bar, 134 °C) zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung

### 3.4 DER ÜBERKRITISCHE CO<sub>2</sub>-PROZESS

Der überkritische CO<sub>2</sub>-Kreisprozess arbeitet druckseitig im überkritischen, gasförmigen Bereich. Der Kreisprozess beginnt vor dem Verdichter, der Verdichtung, der Aufheizung im Rekuperator, der Endaufheizung im Abhitzeessel, der Expansion in der Turbine, der Abkühlung des entspannten CO<sub>2</sub>-Gases bzw. Dampfes (nun unterkritisch) im Rekuperator, der Enthitzung und der anschließenden Kondensation unter Abgabe der Überhitzungs- und Kondensationswärme an die Wärmesenke (siehe Abb. 10). Die kritischen Daten von CO<sub>2</sub> liegen bei 73,8 bar und 31,1 °C, sodass die Zustände des entspannten Dampfes bei seiner Kondensation unterhalb diesen Daten liegen müssen und dass zudem die Wärmesenke ein genügend tiefes Temperaturniveau haben muss. Von der Thermodynamik betrachtet entspricht dieser Kreisprozess einer Kombination von einem geschlossenen Gasturbinenprozess (Brayton-Prozess), mit Rekuperation und einem Dampfprozess mit Kondensation (Rankine-Prozess) und er ist darin dem überkritischen ORC-Kreisprozess ähnlich.

Verschiedentlich werden dem überkritische CO<sub>2</sub>-Kreisprozess zukünftige Entwicklungs-Chancen eingeräumt, bei der Verstromung von Abwärmern einen substantiellen Beitrag leisten zu können (Moser et al., 2014). Der überkritische CO<sub>2</sub>-Kreisprozess, seit Jahrzehnten ein Thema, wird z.B. in einer Studie des Jahres 1968 (Angelino, 1968) sehr ausführlich behandelt. Dabei werden die thermodynamischen Restriktionen klar genannt: für Wärmequellen tiefer als 400 bis 550 °C wäre der überkritische CO<sub>2</sub>-Kreisprozess bezüglich der Effizienz dem Dampfprozess unterlegen. Bezüglich der Wärmesenke wäre der überkritische CO<sub>2</sub>-Kreisprozess nur für Gegenden anwendbar, wenn jahresdurchgängig Kühlwasser für die Kondensation von 12 bis 15 °C verfügbar ist.

Dennoch wurde der in Rede stehende überkritische CO<sub>2</sub>-Kreisprozess mit den gleichen Ausgangsparametern wie bei den anderen Prozessen verwendet, simuliert und optimiert, um auch etwaige, konkurrierende Entwicklung zu erkennen und evaluieren zu können.

Wie bei Gasturbinenprozessen zu erwarten ist, wird ein erheblicher Anteil der Turbinenleistung zum Antrieb des Verdichters verwendet. Der Netto-Wirkungsgrad beträgt nur 7,5 %, zudem liegen Betriebsbeschränkungen insofern vor, als dass die Außentemperatur unter 13 °C liegen muss.

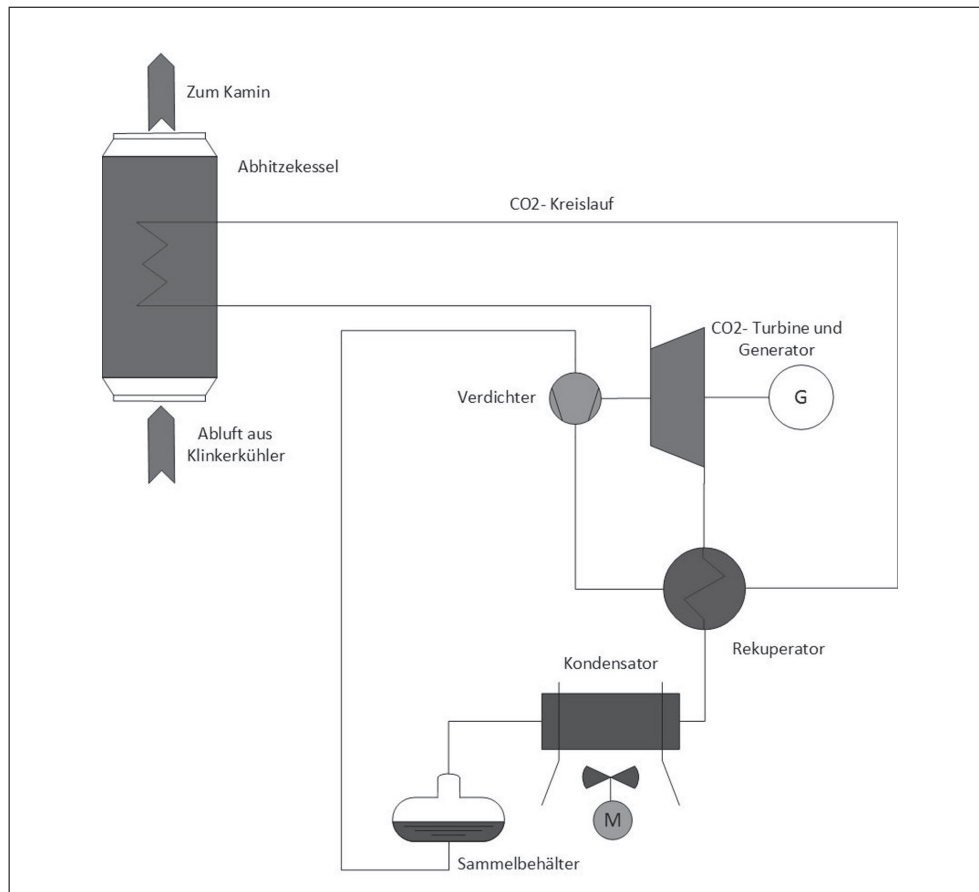


Abb. 10: Überkritischer CO<sub>2</sub>-Kreisprozess zur Nutzung der Abluftwärme zur Stromerzeugung

#### 4. DER ENERGETISCHE VERGLEICH

Die Tab. 4 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der durchgeführten Prozesssimulationen. Eine Überlegenheit des Innovativen Dampfkreislaufes hinsichtlich seines Netto-Wirkungsgrades bedarf einer Erklärung: zum einen entfallen die Exergieverluste und die parasitären Verluste in einem etwaigen Zwischenkreislauf, zum anderen bringt die Dreistufigkeit thermodynamische Vorteile. Die Wirkungsgrade, bezogen auf die Kesselleistung, bewegen sich noch in einem engeren Bereich, jedoch kann der innovative Dampfkreislauf wesentlich mehr Kesselleistung aus der Abwärmequelle auskoppeln als alle anderen Prozesse. Deshalb ist der Nettowirkungsgrad, bezogen auf den Abwärme-Input, des Innovativen Dreidruckprozesses relativ um ( $=10,1/7,8-1$ ), also um 29 % höher als jene des nächstgereihten ORC-Prozesses. Selbst wenn der ORC in Richtung eines Zweistufenprozesses weiter entwickelt wird, bleibt für den innovativen Dampfprozess ein Plus, relativ, von ( $=10,1/9-1$ ), also von 12 %, wie in den Zielen des Vorhabens „RaCiA“ festgeschrieben wurde.

Tab. 4: Prozessvergleich, Ergebnisse der Prozesssimulation

	Einheit	Innovativer Dampf-Prozess RaCiA	ORC-Prozess unterkritisch	Eindruck-Wasserdampf Prozess	Überkritischer CO <sub>2</sub> -Prozess <sup>(1)</sup>
Temperatur Abwärmestrom	[°C]	275			
Abwärme-Input, bez. auf 25 °C	[kW]	14.000			
Ausgekoppelte Kesselleistung	[kW]	9.841	8.458	7.910	8.967
Umgebungslufttemperatur	[°C]	11,0	11,0	11,0	11,0
Arbeitsmedium		Wasserdampf	n-Pentan	Wasserdampf	CO <sub>2</sub>
Brutto- Leistung Generator	[kW]	1.564	1.353	1.220	2.174
Netto- Leistung Gesamtprozess	[kW]	1.408	1.094	1.082	1.046
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf Kesselleistung	[%]	14,3	12,9	13,7	11,7
Netto- Wirkungsgrad, bezogen auf 25 °C	[%]	10,1	7,8	7,7	7,5

<sup>(1)</sup> Einsatzgrenze Kühllufttemperatur 13 °C. Darüber überkritische Bedingungen im Kondensator.

Neben den ponderablen Kriterien der Leistung und Effizienz sind für einen Verfahrensvergleich weitere Kriterien von Bedeutung, nämlich die Anpassungsfähigkeit und die Vielseitigkeit der Verwendung.

## 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Der innovative Dreidruckprozess zeigt gegenüber der Benchmark, dem konventionellen, unterkritischen ORC-Prozess, für den betrachteten Anwendung Fall ein Mehr an Stromausbeute von 29 %, was durch den Entfall eines Zwischenkreislaufes, dem Konzept mit der Überspeisung der Flash-Dampferzeugung und der Mehrstufigkeit erklärt werden kann. Die Stromausbeute hat nicht nur einen Einfluss auf die Energieeffizienz, sondern auch auf die Kosten und die Ökologie. Durch diese aus Abwärme produzierte elektrische Energie können fossil gefeuerte Energieerzeugungsanlagen substituiert werden.

Selbst ein Vergleich mit weiterentwickelten ORC-Prozessen fällt mit einem Mehr der Stromausbeute von 12 % zu Gunsten des innovativen Dreidruckprozesses aus.

Die Mehrstufigkeit ist ein Schlüsselfaktor zur Energie-Effizienzsteigerung und die Publikation zeigt Wege auf, diese kosteneffizient, durch die Flashdampferzeugung und die Mehrdruckturbine, zu erreichen. Die Anwendbarkeit dieser Technologie ist nicht auf das Arbeitsmedium Wasser/Dampf beschränkt, sondern auch auf andere Kreislaufmedien (z. B. ORC); binäre und absorptive Medien wurden zwar ausgeklammert, jedoch wäre prinzipiell der innovative Dampfprozess auch für diese Medien anwendbar.

Die Hindernisse zum Realisieren des innovativen Dampfprozesses sind vielfältig: Frostsicherheit? Dampfkessel-Richtlinien? Sowie die Erfahrung, dass die Dreidruckturbinen, obwohl technologisch schon immer möglich, derzeit am Markt nicht verfügbar ist.

Es verbleibt also, als einen weiteren Schritt zu einer industriellen Forschung, weitere Kooperationspartner aus dem Feld der Betreiber, der Komponentenhersteller, der Anlagenbauer zu finden, Hindernisse zu überwinden und auf die Realisierung einer erfolgversprechenden Technologie zur Verstromung von Abwärmern zuzugehen.

## DANKSAGUNG

Das Projekt „RaCiA – Rankine Cycle für Industrielle Abwärmern“ wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „ENERGY MISSION AUSTRIA“ durchgeführt.

## LITERATUR

- ABB. 2011. Abwärmern in saubere Energie umwandeln. ZementKalkGips International. 2011, 2-2011.
- Angelino, G. 1968. Carbon dioxide condensation cycles for power production. *Journal of Engineering for Power*. 1968.
- Beckmann, Georg. 2014. Mehrdruckdampfturbine zur Stromerzeugung. AT513548B1 Österreich, 15. 01. 2014.
- Beckmann, Georg. 2005. Verfahren und Einrichtung zur Erzeugung von Kraft und Wärmern. EP1584798B1 Europa, 31. 03. 2005.
- Hampel, Jens. 2008. Getriebefreie Kleindampfturbine - Wirkungsgradsteigerung bei Teillast durch variable Drehzahl. VGB PowerTech. VGB PowerTech e.V., 2008, 04.
- Heberle, Florian und Brüggemann, Dieter. 2012. Thermodynamische Grundlagen des ORC und aktuelle Forschungsaktivitäten. Bayreuth : Jahrestagung des ORC-Fachverbandes e.V, 2012.
- Heidelberger Zement AG. 2001. Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG. Augsburg : Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, 2001.
- Larsen, Ulrik, et al. 2013. Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications using the principles of natural selection. *Energy - The international Journal*. 2013, 55-2013.
- Moser, Simon, Leitner, Karl-Heinz und Steinmüller, Horst. 2014. F&E Fahrplan - Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie. Wien : Klima- und Energiefonds, 2014.
- Pehnt, Martin, et al. 2010. Die Nutzung industrieller Abwärmern - technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Heidelberg, Karlsruhe : s.n., 2010.
- SimTech GmbH. (2014). IPSEpro. (Version 5.1 und 6.0).

Kontaktaten Autor:

Georg BECKMANN Dr. techn.

Technisches Büro Beckmann

Anton Baumgartner Str. 44/B7/016

1230 Wien

E-Mail: georg.beckmann@chello.at