



FOTO: ANDREAS BEDNARECK

Hochleistungskupolofenanlage bei Georg Fischer Mettmann.

Lohnt sich Abwärmennutzung beim Kupolofen?

Hinter der Absicht, Energie zu sparen, stehen neben Nachhaltigkeit und besserer Umweltverträglichkeit fast immer auch handfeste wirtschaftliche Motive. So auch bei Gießereien mit Kupolöfen, die hohe Kokspreise für ihren Schmelzbetrieb aufbringen müssen. Das Schmelzaggregat birgt aber auch große Potentiale zur Abwärmennutzung.

VON JOACHIM WÜRZ UND JÖRG RACHNER, WILLICH, HANS-JAAN RACHNER UND MICHAEL LEMPERLE, ESSEN

In Zeiten, wo Sparlampen gesetzlich vorgeschrieben sind, Windkraftwerke und Solaranlagen boomen sowie Kohlendioxidemissionen gehandelt werden, muss sich auch der Kupolofenbetreiber fragen lassen, wie und wo er Energie einspart. Aufgrund extrem hoher Kokspreise ver-

sucht er, mit immer weniger Koks auszukommen, Koksersatzstoffe wie Anthrazit einzusetzen, manchmal auch Erdgas mit Sauerstoff oder auch billige Kohlenstoffträger in den Ofen einzublasen. Alle diese Bemühungen können in der Regel die Kosten nur wenig senken, dafür aber den Ofenbetrieb oft negativ beeinflussen. Daneben fallen in einer Gießerei noch zusätzliche Energiekosten zum Heizen, Trocknen, Vorwärmen etc. an, für die oftmals

unnötigerweise Erdgas oder Strom eingesetzt werden. Immerhin wird heute der Heißwind nicht mehr durch Verbrennung von Erdgas erzeugt, wie das noch in den 1960-iger Jahren üblich und bequem war. Nach dem Wärmeaustausch zur Winderhitzung muss die überschüssige Energie der verbrannten Gichtgase systembedingt ausgekoppelt werden, um die Gase auf eine für den Tuchfilter akzeptable Temperatur abzukühlen. Bei der nassen Gaswäsche



ist der Sachverhalt energetisch gesehen ähnlich. Die sinnvolle Nutzung dieser ausgekoppelten Energie soll im Folgenden diskutiert werden.

Die wärmetechnischen Grundlagen

Für die folgenden Betrachtungen und Rechnungen wird ein Heißwindkupulofen mit einer Schmelzleistung von 10 t/h zugrunde gelegt. Für Anlagen anderer Schmelzleistung lassen sich die Daten dann näherungsweise linear extrapolieren, d. h. für eine 30 t/h Anlage sind die angegebenen Werte mit dem Faktor drei zu multiplizieren. **Tabelle 1** zeigt den hier benutzten exemplarischen Datensatz, der typisch ist für einen Heißwindofen mit feuerfester Auskleidung. Der Energieeintrag berücksichtigt hier die Verbrennungswärme des eingesetzten Kokes, den Abbrand der typischen Legierungszuschläge und die thermische Energie des Heißwindes [1].

Reingaswirtschaft

Die nasse Gaswäsche mit Gaskühler, Desintegrator und Tropfenabscheider ist heute hauptsächlich bei großen Schachtofenanlagen vom Typ OxyCup in Stahlwerken zu finden. In Gießereien ist sie mehr und mehr durch Trockenfilter verdrängt worden, obwohl die nutzbare sekundäre Energie in Form des gewaschenen unverbrannten

Tabelle 1: Basisdaten für Kupulofen und Gaswirtschaften.

| | |
|--|------|
| Schmelzleistung in t/h | 10 |
| Satzkoks in % | 10,5 |
| Windmenge in Nm ³ /h | 6000 |
| Kohlenmonoxid in Vol.-% | 16 |
| Wasserstoff in Vol.-% | 1 |
| Energieeintrag (Koks, Heißwind, Abbrand) in kW | 9800 |
| Energieaustrag (Gichtgas) in kW | 4550 |

Gichtgases vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bietet. **Bild 1** zeigt die Energieströme einer solchen Anlage ausgehend von der in Tabelle 1 angegebenen Gichtgasenergie von 4550 kW.

Durch die Abkühlung von rund 250 °C auf 35 °C im Wäscher verliert das Gichtgas zunächst 650 kW der fühlbaren Wärme. Es wird dann im Rekuperator vorgewärmt und der Brennkammer zugeführt. Im Beispiel in Bild 1 wird das gesamte Gichtgas verbrannt. Alternativ kann auch nur eine Teilmenge verbrannt werden, die für die Winderhitzung benötigt wird. Der Über-

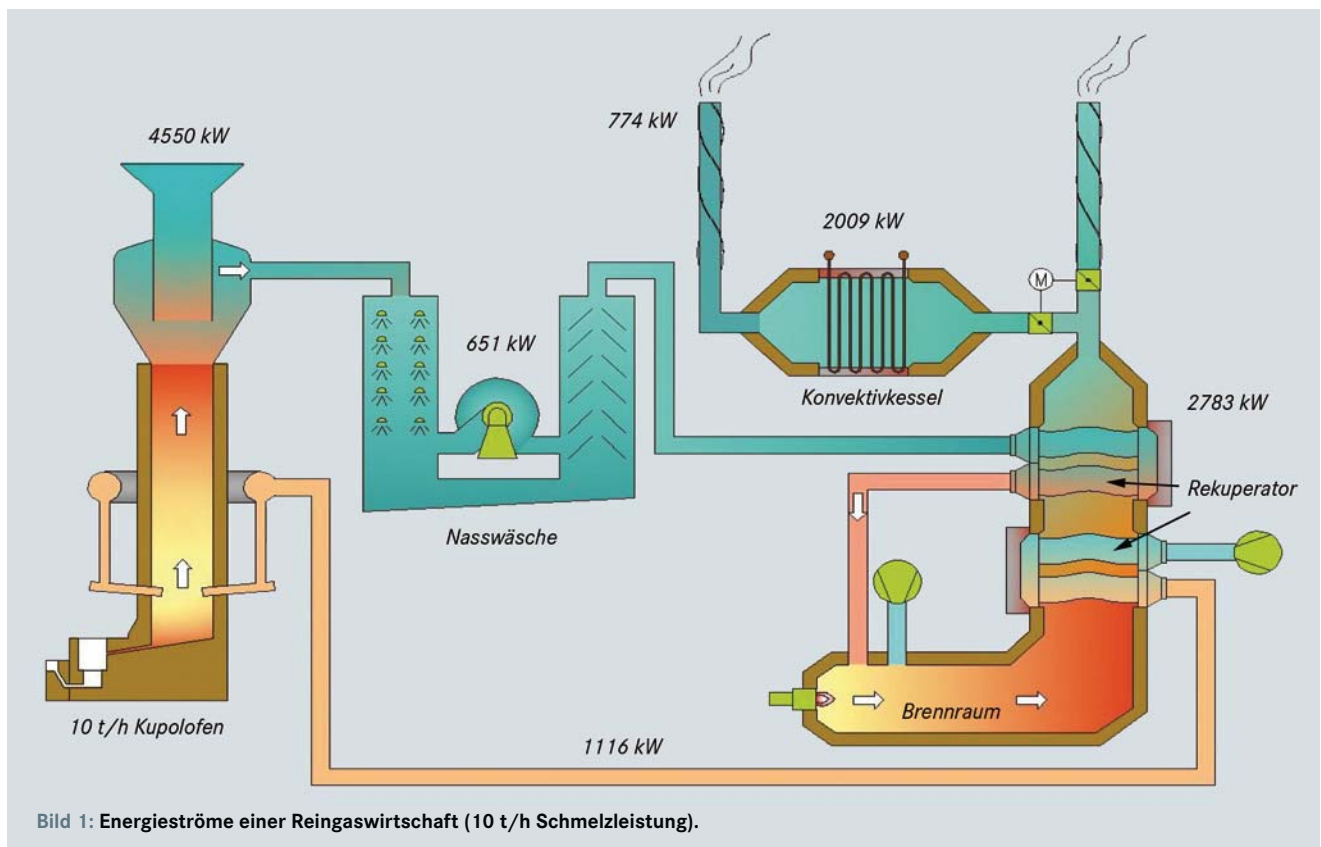
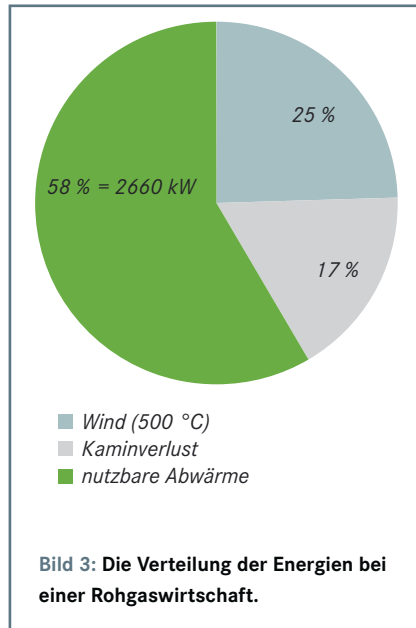
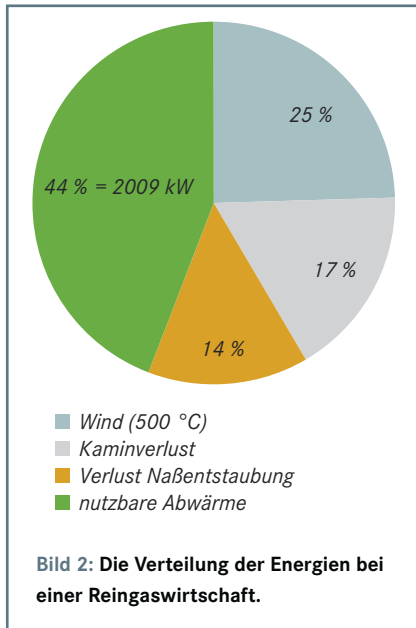


Bild 1: Energieströme einer Reingaswirtschaft (10 t/h Schmelzleistung).



Rohgaswirtschaft

Bei der Rohgaswirtschaft (**Bild 3**) verbrennen die meisten Kupolofenanlagen zunächst das staubbeladene Gichtgas und entstauben erst vor dem Kamin mit einem Tuchfilter (**Bild 4**). Die Wärmetauscher für die Heißwinderzeugung und Wärmeauskopplung befinden sich dann ebenfalls im staubbeladenen Gasstrom und müssen deshalb mit einer Kugelregenanlage sauber gehalten werden. Weil das Gichtgas ungekühlt in die Brennkammer eintreten kann, entfallen hier jedoch die Wäscherverluste der Reingaswirtschaft. Aus diesem Grund ist bei der Rohgaswirtschaft die ausgekoppelte Wärme um 651 kW größer und die nutzbare Abwärme beträgt hier 2660 kW bzw. 58 % der Gichtgasenergie (**Bild 3**).

schuss wird dann z. B. in einem Kraftwerk zur Stromerzeugung genutzt. In den der Brennkammer nachgeschalteten Wärmetauscherbündeln werden dem Gas 1116 kW für die Heißwinderzeugung entzogen. Somit verbleiben hinter den Wärmetauschern noch 2783 kW, die einer externen Nutzung zugeführt werden können. Es werden davon 2009 kW in einem Wärmetauscher z. B. als heißes Wasser oder als heißes Thermalöl ausgekoppelt; der Rest von 774 kW geht als sogenannter Kaminverlust verloren, weil das Gas den Kamin noch mit thermischer Energie bei Temperaturen um die

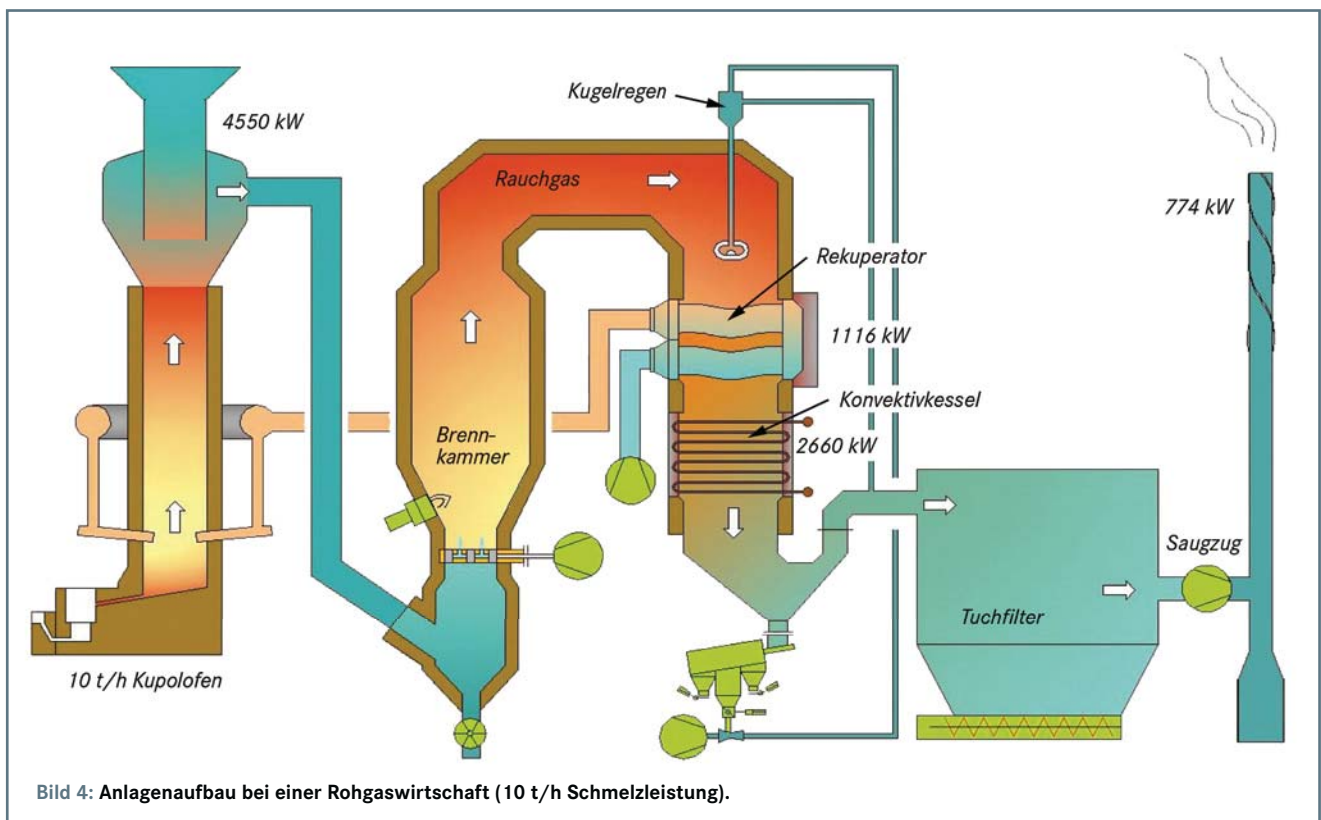
250 °C verlässt. Stellt man die Energieverteilung für die Reingaswirtschaft in Prozentsätzen dar, so ergibt sich der in **Bild 2** dargestellte Zusammenhang.

Demnach werden rund 25 % der Energie für die Heißwinderzeugung genutzt und 44 % stehen für eine Nutzung zur Verfügung. Der Rest geht systembedingt verloren. Der Vollständigkeit halber soll nicht unerwähnt bleiben, dass eine Reingaswirtschaft unter gewissen Bedingungen auch mit einem Tuchfilter verwirklicht werden kann. Beispiele hierzu finden sich aber nur in der Mineralwolle-Industrie.

Abwärmenutzung

Heißwinderzeugung

Die Möglichkeiten der Abwärmenutzung sind vielfältig. Sie reichen von der Heißwinderzeugung über die Stromerzeugung bis hin zu den Verwendungen zum Trocknen oder Heizen. Die Heißwinderzeugung ist seit vielen Jahren Stand der Technik und spart dem Kupolofenbetreiber einen Teil des teuren Kokses ein. Man kann davon ausgehen, dass pro 100 °C Windvorwärmung etwa 1,4 % Koks eingespart werden können [2]. Das macht bei einer Heißwindtemperatur von 500 °C immerhin rund 7 % Einsparung aus. Bei der Rohgaswirtschaft ist die maximal mögliche Wind-



temperatur auf 650 °C aufgrund des Abreinigungssystems für die Heizflächen begrenzt. Die Kokseinsparung beträgt in diesem Fall aber bereits 10 %. Bei der Reingaswirtschaft ist das Potential noch größer. Hier konnten in den letzten Jahren Heißwindtemperaturen von 800 °C hinter dem Rekuperator erreicht werden. Anlagen mit dieser neuen Technik finden sich bisher allerdings nur in der Stahl- und Mineralwolle-Industrie.

Stromerzeugung

Wie in den Bildern 2 und 4 dargestellt, werden für die Koks einsparende Heißwinderzeugung nur etwa 25 % der ausgekoppelten Abwärme genutzt, während bis zu 58 % i. d. R. ungenutzt in die Umgebung abgegeben werden. Es stellt sich die Frage, ob diese Abwärme vorteilhaft zur Erzeugung von elektrischem Strom genutzt werden kann. Grundsätzlich stehen für die Verstromung die folgenden Varianten zur Verfügung:

- > Dampfkessel mit Kondensationsturbine
- > Dampfkessel mit Gegendruckturbine
- > Thermalölkessel mit ORC (Organic Rankine Cycle).

Eine Stromerzeugung mit Dampfkessel und Kondensationsturbine ist folgendermaßen möglich: Die Dampfüberhitzung auf 450 °C

| Tabelle 2: Vergleich potentieller Abwärmenutzung bezogen auf eine Schmelzleistung von 10 t/h. | | | |
|---|--------------------|----------------|--------------------|
| Kondensations-turbine | Gegendruck-turbine | ORC | Reine Wärmenutzung |
| Strom: 638 kW | Strom: 479 kW | Strom: 400 kW | |
| | Wärme: 2181 kW | Wärme: 2260 kW | Wärme: 2660 kW |

bei 40 bar Druck geschieht bei den beiden angegebenen Dampfkesselvarianten 1 und 2 in gleicher Weise über einen Wärmetauscher im oberen heißen Teil des Rekuperatorsturms. Die Turbine wandelt dann den Druckabfall über der Turbine in mechanische Energie um, die dann nahezu verlustlos in elektrische Energie überführt wird. Wird der Dampf hinter einer Kondensationsturbine bei 45 °C kondensiert, sinkt dort der Wasserdampfdruck auf 0,1 bar ab und das wirksame Druckgefälle ist nahezu 40 bar. Der Wirkungsgrad der Turbine ist dann mit 24 % relativ hoch. Allerdings sind 2022 kW Kühlenergie erforderlich, um den Dampf bzw. das Kondensat auf 45 °C abzukühlen. Diese Restenergie ist aufgrund der niedrigen Temperatur von 45 °C kaum mehr nutzbar. Bei der Gießerei Georg Fischer in Mettmann ist eine solche Anlage seit über 20 Jahren in Betrieb.

Bei der Gegendruckturbine verschieben sich die Energieanteile. Hier wird nur noch auf 150 °C, entsprechend einem Druck von 1 bar, hinter der Turbine gekühlt. Die hohe thermische Energie des Kühlwassers im Wärmetauscher, rund 82 % der Abwärme, ist in diesem Fall jedoch mit 90 °C, z. B. für Heizzwecke, gut nutzbar. Die Stromerzeugung sinkt dafür auf etwa 18 % der Abwärmeenergie.

Die dritte Variante ORC, ist eine typische Anwendung in der Holzindustrie, wo ca. 200 Anlagen in den letzten Jahren als Kombination von Kraft und Wärmekopplung, sogenannte KWK-Anlagen, errichtet wurden. Bei diesem Verfahren wird eine organische Flüssigkeit unter Druck verdampft, überhitzt und in einer Turbine entspannt. Nach der Entspannung muss die verdampfte Flüssigkeit ebenfalls kondensiert werden. Vom Verfahren her entspricht dies

OPTI.schmelze

Mit OPTI.schmelze lassen sich je nach Größe Ihres Schmelzbetriebes zwischen 50.000 und 500.000 Euro pro Jahr sparen.

Wie, das zeigen wir Ihnen!

Leitung Vertrieb:
Kai Bembek

WIR GESTALTEN PROZESSE.

RGU – Ihr starkes Team mit profundem Know-how für zielgerichtete IT-Beratung und -Programmierung in der Gießerei-Industrie.

Vom Guss zum Gewinn. Wir begleiten Sie.

RGU GmbH
Karl-Harr-Straße 1
44263 Dortmund
kbe@rgu.de
www.rgu.de



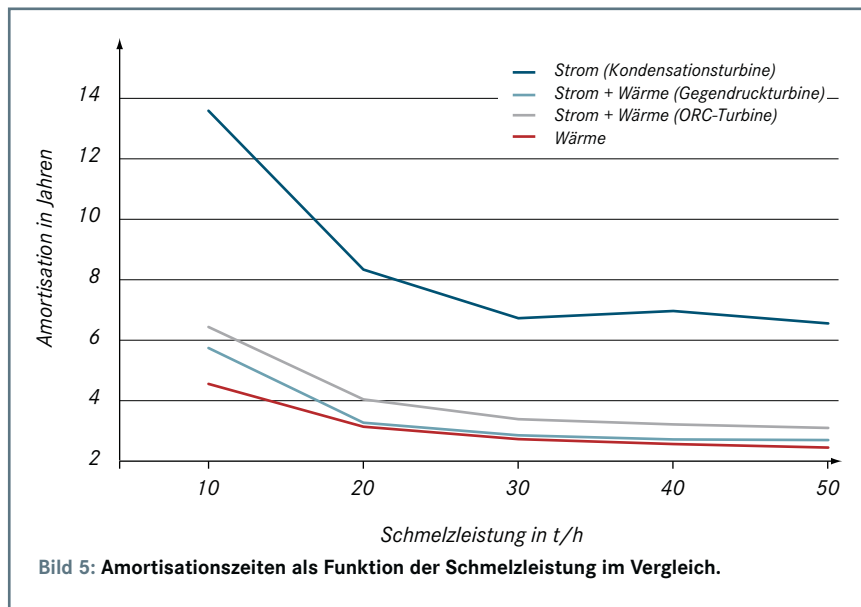


Bild 5: Amortisationszeiten als Funktion der Schmelzleistung im Vergleich.

dem Wasser-Dampf-Kreislauf. Bei realistischen Thermoöltemperaturen für Kupolofenanlagen ergibt sich eine Abwärmeumwandlung von 15 % in Strom und von 85 % in Heizenergie.

Erwärmen und Heizen

Als dritte Variante lässt sich die ausgekoppelte Abwärme sehr einfach zum Erwärmen und Heizen nutzen, z. B. für:

- > Heizung und Brauchwasser
- > Hallenbeheizung
- > Trocknungsanwendungen
- > Dampferzeugung.

Die Realisierung solcher Anwendungen ist im Gegensatz zur Stromerzeugung weit weniger aufwendig.

Bei der heute üblichen Rohgaswirtschaft wird in der Regel ein Thermalölsystem eingesetzt, das in erster Linie die Aufgabe hat, das Rauchgas auf Trockenfiltereintrittstemperatur abzukühlen. Im Prinzip können genauso gut Heißwasser- oder Dampfabbitzesysteme als Alternative zum Thermalöl eingesetzt werden. In den letzten 20 Jahren wurden allerdings über 90 % der Neuanlagen mit Thermalöl ausgeführt. Natürlich lässt sich auch beim Thermalölsystem über Wärmetauscher warmes Wasser für Heizzwecke oder heiße Luft etwa für die Kernetrocknung oder Hallenheizung realisieren. Der Kupolofenbetreiber sollte deshalb immer prüfen, an welchen Stellen im Werk Erdgas, das zur Heizung oder Trocknung eingesetzt wird, durch Abwärme ersetzt werden kann. Aus Gründen der Verfügbarkeit wird man bei gewissen Anwendungen die Erdgasanwendung bestehen lassen und nur dann nutzen, wenn bei Stillständen keine Abwärme verfügbar ist. Alternativ kann auch das Thermalölsystem mit Erdgas auf Temperatur gehalten werden. In selteneren Fällen ist auch eine Dampferzeugung sinn-

voll, weniger für den eigenen Gebrauch als für potentielle Abnehmer in der Nachbarschaft [3]. Nicht zuletzt sollte die Möglichkeit geprüft werden, ob die Abwärme in ein Fernwärmenetz eingespeist werden kann.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Für eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sind die drei Varianten der Stromerzeugung und die reine Wärmenutzung noch einmal in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Zur Abschätzung der Amortisationszeit für die aufzubringenden Investitionen wurden folgende Annahmen getroffen:

- > Strompreis 0,1 Euro/kWh elektrisch
- > Wärmepreis 0,035 Euro/kWh thermisch
- > Betriebszeit des Schmelzbetriebes 6000 h (typischer Dreischichtbetrieb)
- > Stromerzeugung in 75 % der Betriebszeit (Mit diesem Wert werden An- und Abfahrprozeduren sowie Schmelzpausen berücksichtigt. Vorstellbar wären bis zu 90 %, dies hängt aber von der Kontinuität des Schmelzprozesses ab)
- > Wärmenutzung (thermisch) in 40 % der Betriebszeit (typische Heizperiode). Die Nutzung der Abwärme für die Beheizung von Trocknern oder der Wärmeverkauf an Anrainerfirmen würden zu besserer Auslastung und damit zu einem deutlich höheren Nutzeffekt führen.

In **Bild 5** sind die Amortisationszeiten in Abhängigkeit von der Schmelzleistung des Kupolofens für die beschriebenen Verfahren graphisch dargestellt.

Danach hat die Stromerzeugung auf der Basis einer Kondensationsturbine selbst bei großen Anlagen mit Schmelzleistungen oberhalb von 30 t/h noch Amortisationszeiten von etwa sieben Jahren. Solche Zeitspannen werden heute nur in Ausnah-

mefällen akzeptiert. Deutlich besser stellen sich die anderen Varianten dar. Für diese Varianten ist die teilweise oder vollständige Nutzung der Wärme zu Heizzwecken etc. der wesentliche Einflussfaktor. Die Amortisationszeiten für die Gegendruckturbine und die ORC-Turbine, beide gekoppelt mit direkter Wärmenutzung, sind von gleicher Größenordnung. Die ORC-Technik hat dabei den Vorteil, dass bei ihr die hohen Auflagen der TRD (Technische Regeln Dampf) nicht zum Tragen kommen. Nicht von ungefähr nutzen rund 200 Anlagen in der Holzindustrie diese Technik.

Bei der reinen Wärmenutzung werden die Amortisationszeiten nochmals gesenkt. Das ist natürlich im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die Investitionskosten für diese Anwendungen nur bei etwa einem Drittel der Investitionskosten einer Gegendruckturbinenlösung liegen. Bei bestehenden Anlagen mit schon vorhandenen Abhitzeesseln sind die Investitionsaufwendungen zur Nutzung der Abwärme naturgemäß noch geringer und die Amortisationszeiten mit unter zwei Jahren deutlich kürzer.

Zusammenfassung

Bei den heutigen Stromgutschriften ist eine Investition zur Nutzung der Abwärme für eine reine Stromerzeugung nicht zu empfehlen. Es werden damit keine akzeptablen Geldrückflusszeiten erzielt. Wird aber neben der Stromerzeugung auch die überschüssige Wärme genutzt, wie bei der Anwendung von Gegendruck- oder ORC-Turbine, so ergeben sich akzeptable Geldrückflusszeiten von zwei bis vier Jahren. Speziell im Hinblick auf die steigenden Energiepreise und den CO₂-Handel werden solche Investitionsmaßnahmen immer attraktiver. Muss bei einem bereits vorhandenen Abhitzeessel nur der Verbraucher für die Nutzung der Wärme installiert werden, liegen die Amortisationszeiten unter zwei Jahren.

Joachim Würz und Dr.-Ing. Jörg Rachner, Würz GmbH, Willich-Münchheide, Hans-Joan Rachner und Dr.-Ing. Michael Lemperle, Küttner GmbH & Co. KG, Essen

Literatur:

- [1] Würz, J.: Nutzung der Abwärme eines Kupolofens: Lässt sich das rechnen?, Vortrag auf der Kupolofen-Konferenz 2012 in Dresden.
- [2] Neumann, F.: Gußeisen. Kap. 2.3.3, S.38. Expert Verlag 1999.
- [3] Greibig, R.: Klimaschutz durch Energieeffizienz: Abwärmenutzung am Kupolofen für die Lebensmittelindustrie, Vortrag auf der Kupolofen-Konferenz 2012 in Dresden.