

C. Schäffer*

Thermoökonomische Optimierung und Steigerung der Exergie-Effizienz keramischer Produktionsprozesse am Beispiel eines Rollenofens

KURZFASSUNG

Am Beispiel eines Rollenofens werden Möglichkeiten aufgezeigt, durch eine Optimierung der Exergie-Effizienz Energiekosten zu reduzieren. Dazu wird in einem ersten Schritt durch eine Entkoppelung des Wärmeverbundes von Ofen und Trockner die Möglichkeit geschaffen, die Ener-

gieversorgung der Trocknung unabhängig vom Ofen zu gestalten. Somit wird eine optimierte Energieversorgung der Trockner mit Kraft-Wärme-Koppelung verwirklicht. Daneben kann die Stromversorgung über ORC-Anlagen oder thermoelektrische Generatoren ermöglicht werden.

1. Einleitung

Ressourcen und insbesondere Energieeffizienz ist ein Thema, das sowohl im politischen als auch ökonomischen Fokus steht. Politisches Ziel ist es dabei, den Ausstoß von Treibhausgasen bis 2030 um 40 % gegenüber 1990 zu senken. Die keramische Industrie ist durch den großen Energiebedarf besonders davon betroffen. Bis zum Jahre 2019 ist die keramische Industrie zwar noch vom Emissionshandel ausgenommen [1], doch steht zu befürchten, dass dies längerfristig nicht mehr der Fall sein wird, da andernfalls die gesetzten Ziele schwer zu erreichen sein werden.

In diesem Artikel soll am Beispiel eines Rollenofens aufgezeigt werden, durch welche technischen Maßnahmen eine signifikante Reduktion der Energieverbräuche erzielt werden kann. Dabei soll berücksichtigt werden, dass aus ökonomischen Gründen eine möglichst geringe Amortisationszeit von Investitionen erzielt werden muss und deswegen die Optimierung bestehender Anlagen durch additive Einzelmaßnahmen erfolgen soll.

2. Grundlagen

Der beim Brand keramischer Erzeugnisse theoretisch erforderliche Energiebedarf ist die Summe positiver und negativer Reaktionsenthalpie. Bei keramischen Fliesen ist dies z. B. ein Energiebedarf von ca. 200 kJ/kg Brenngut.

Der tatsächliche Energiebedarf für das Brennen beträgt dem gegenüber ca. 2060 kJ/kg Brenngut [2]. Üblicherweise werden Öfen und Trockner im Wärmeverbund betrieben, wobei die Kühlluft des Ofens zum Trocknen der Rohlinge oder für die Sprühtrocknung der Rohstoffe verwendet wird. Ohne die Energie für die Trocknung würde sich damit für den keramischen Brand ein „effektiver Wirkungsgrad“ von lediglich 10 % der eingesetzten Energie ergeben. Indem die Energie der Ofen-Kühlung für die Trocknung verwendet wird, erscheint in einer Energiebilanz der Gesamtwirkungsgrad des Wärmeverbundes deutlich besser. Dieser Wärmeverbund wur-

de lange Zeit als optimale Lösung betrachtet. Erst in den letzten Jahren setzt sich die Erkenntnis durch, dass es energetisch ungünstig ist, die Kühlzone des Ofens als Wärmetauscher für die Trocknung zu nutzen [3]. Entscheidend ist dabei, dass für eine weitergehende Betrachtung nicht nur die Wärmebilanz nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik – **„Energie kann in einem geschlossenen System zwar ineinander umgewandelt aber nicht gebildet oder vernichtet werden.“** – berücksichtigt werden muss, sondern dass auch der 2. Hauptsatz der Thermodynamik – **„Nicht jede Energieform ist beliebig in eine andere Energieform umwandelbar, denn Entropie kann nicht vernichtet werden.“** – von entscheidender Bedeutung ist. Dazu ist es notwendig, die Exergie der eingesetzten Energien zu betrachten. Unter Exergie versteht man den maximalen Anteil der Energie, der reversibel in Arbeit umgewandelt werden kann. Der verbleibende Teil der Energie wird als Anergie bezeichnet und die Summe von Anergie und Exergie ist gleich der Energie (**Energie = Anergie + Exergie**).

So ist es z. B. möglich, elektrische Energie theoretisch vollständig in mechanische Energie umzuwandeln und umgekehrt. Wärme kann demgegenüber nur zu einem Teil, z. B. in einer Dampfkraftanlage, in mechanische Arbeit umgewandelt werden, woraus Strom erzeugt werden kann. Der Exergie-Verlust setzt sich aus den Verlusten der Verbrennung, der Wärmeübertragung und der Abgas- und Abstrahlverluste zusammen und beträgt dabei fast 60 % [4].

Der Exergiegehalt von Wärmeenergie steigt mit zunehmender Temperatur (Bild 1). Man kann daher von hochwertiger Wärmeenergie mit hoher Temperatur und hohem Exergie-Anteil sowie von minderwertiger Wärmeenergie mit niedriger Temperatur und niedrigem Exergiegehalt sprechen.

Betrachtet man nun den in der keramischen Industrie häufig anzutreffenden Wärmeverbund zwischen Ofen und Trockner, so stellt man fest, dass dabei aus hochwertiger Wärmeenergie der Kühlzone mit hoher Temperatur minderwertige Wärmeenergie für die Trocknung mit niedriger Temperatur erzeugt wird. Dadurch wird Exergie vernichtet. Um den bilanztechnischen Energieverlust des Ofens auszugleichen, muss dem Ofen hochwertige Wärmeenergie über Brennstoffe zugeführt werden. Energetisch betrachtet ist dies nicht jedoch sonderlich sinnvoll.

* Hochschule Koblenz, Fachrichtung Werkstofftechnik, Glas und Keramik, Rheinstraße 56, D-56203 Höhr-Grenzhausen

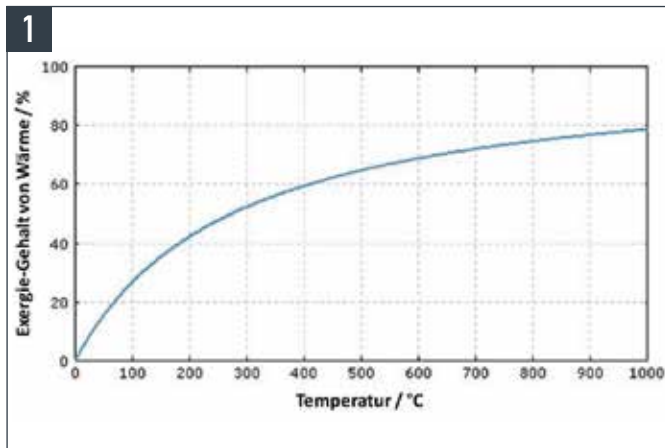


Bild 1 • Relativer Exergiegehalt von Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Werte beziehen sich auf eine Umgebungstemperatur von 0 °C [5]

3. Entkopplung von Ofen und Trockner

Exergetisch sehr viel günstiger wäre es, den Wärmeverbund zwischen Ofenkühlung und Trockner aufzulösen und die Abfuhr von Wärmeenergie aus der Kühlzone zu reduzieren oder gänzlich zu unterbinden. Es gibt eine Reihe von technischen Optionen, um dies zu verwirklichen. So kann die Kühlluft für die Vorwärmung der Verbrennungsluft verwendet oder in Bypass-Leitungen in die Aufheizzone geleitet werden. Eine technisch sehr einfache Variante wäre, Öfen zu verlängern und dadurch die gesamte Kühlenergie im Ofen zu belassen und der Brennzone zuzuführen [6]. Die Energieversorgung der Trockner könnte dann über andere Energiequellen mit niedrigerem Exergiegehalt verwirklicht werden. Damit würde der Exergie-Verlust reduziert und der Einsatz hochwertiger Wärmeenergie optimiert werden.

Wärmebilanztechnisch würde dies bedeuten, dass der Energieverbrauch des Ofens proportional mit der Reduktion der abgeführten Wärmeenergie sinkt. Optimal wäre dabei eine Verlängerung von 25–30 % im Vergleich zu herkömmlichen mit Sturzkühlung betriebenen Öfen. Bei herkömmlicher Bauweise stößt die Ofenlänge jedoch aufgrund der erforderlichen Druckverhältnisse und Druckverluste bzw. der Strömungsverhältnisse im Ofen an Grenzen. Ferner ergibt sich dabei das Problem, dass neben den Kosten für die längeren Öfen bzw. die Ofenverlängerung auch die Kosten für die Erweiterung der Produktionshallen, sofern dies überhaupt möglich ist, anfallen würden. Insgesamt kann dies dazu führen, dass eine herkömmliche Ofenverlängerung zwar energetisch sinnvoll, aber bei den derzeitigen Energiekosten unwirtschaftlich ist.

In Bild 2 ist eine Lösung dargestellt, wie ein Rollenofen mit nachgeschaltetem Ofentunnel in Etagenbauweise verlängert werden kann, ohne dass dafür die Grundfläche der Produktionshallen vergrößert werden muss. In dieser Bauausführung ist es auch möglich, den Ofen strömungstechnisch zu unterteilen und die Druckverhältnisse im ursprünglichen Ofen so einzustellen, dass ohne Sturzkühlung eine ausreichende Zufuhr von Energie aus der Kühlzone in der Brennzone verwirklicht werden kann.

Bei Rollenöfen, die einen Brennhilfsmittel-Umlauf haben, bzw. bei Tunnelöfen können die nachgeschalteten Ofentunnel sehr einfach in den Rücklauf der Ofenwagen bzw. der Brennhilfsmittel integriert werden.

4. Energieversorgung der Trockner

Durch die Entkopplung von Öfen und Trockner wird es erforderlich, die Energieversorgung der Trocknung durch andere Energiequellen zu gewährleisten. Konsequenterweise soll dazu der Exergiegehalt von Energieträgern optimal genutzt werden. Dazu würde sich anbieten, die Brennstoffe zunächst für die Erzeugung elektrischer Energie mittels Kraft-Wärme-Koppelung und die Abwärme dieser Energieerzeugung für die Trocknung zu nutzen. Dies ist seit vielen Jahren in südeuropäischen Ländern Stand der Technik und wird in jüngster Vergangenheit auch in Deutschland praktiziert. Darüber kann der gesamte elektrische Energiebedarf eines Betriebes kostengünstig gedeckt werden.

Sinnvollerweise wird dabei die Abwärme beispielsweise eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) entsprechend ihrer thermischen Wertigkeit genutzt. Üblicherweise setzt sich diese Abwärme aus höherwertiger Wärmeenergie des Abgases mit z. B. 500 °C und minderwertiger Wärmeenergie des Kühlwassers mit z. B. 90 °C zusammen. Die höherwertige Wärmeenergie des Abgases sollte dabei zunächst für die Vorwärmung von Verbrennungsluft des Ofens genutzt werden, da dadurch der Energieverbrauch des Ofens weiter reduziert werden kann. Die danach resultierende Wärmeenergie – zusammen mit der minderwertigeren Wärmeenergie des Kühlwassers – kann dann für die Trocknung verwendet werden.

Der thermische Wirkungsgrad von Blockheizkraftwerken beträgt ca. 55 %. Das bedeutet, dass die Abwärme bei vollständiger Selbstversorgung mit elektrischer Energie unter Umständen nicht für die Trocknung ausreicht. In diesem Fall wäre es wieder unter optimaler Nutzung von Exergie sinnvoll, die fehlende Wärmeenergie über Wärmepumpen zu erzeugen. Mit Wärmepumpen kann unter Nutzung von Exergie eine große Wärmemenge zu Verfügung gestellt werden. Der „Coefficient of Performance“ (COP), der das Verhältnis von eingesetzter elektrischer Energie zu abgegebener Wärmeenergie darstellt, liegt je nach Bauart üblicherweise zwischen 3 und 5. Dies bedeutet, dass aus 1 kWh elektrischer Energie 3 bis 5 kWh Wärmeenergie erzeugt werden kann. Bei einem Gaspreis von z. B. 3,8 ct/kWh, einem Strompreis von z. B. 8,6 ct/kWh und eigenen Gestehungskosten von 1ct/kWh wäre es bereits ab einem COP von 3 günstiger, die Trocknung über elektrische Wärmepumpen zu versorgen, anstatt sie mit Erdgas zu beheizen. Wird die elektrische Energie für eine Wärmepumpe über Kraft-Wärme-Koppelung erzeugt und die Abwärme der KWK zusätzlich für die Trocknung verwendet, können die Energiekosten der Trocknung dadurch mehr als halbiert werden.

Da einerseits Wärmepumpen zum Betrieb mechanische Arbeit benötigen und andererseits bei der Kraft-Wärmekoppelung zunächst mechanische Arbeit generiert wird, macht es Sinn, die Wärmepumpen nicht elektrisch zu betreiben. Es ist günstiger die mechanische Arbeit der Gasmotoren direkt für den Antrieb der Wärmepumpen zu nutzen. Selbst bei hohen Wirkungsgraden des Generators und des elektrischen Antriebes würde dies die Energieverluste um mindestens 10 % reduzieren. Die Abwärme der Gasmotoren oder Gasturbinen als auch die über Wärmepumpen erzeugte Wärme höherer Temperatur könnten dadurch optimal für die Trocknung zu verwendet werden.

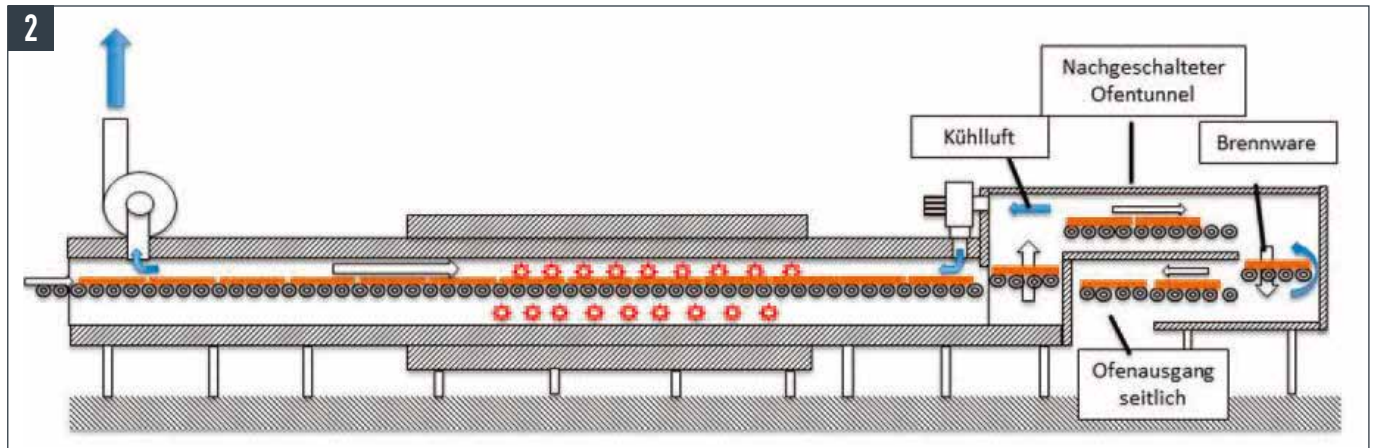


Bild 2 • Skizze eines Rollenofens mit nachgeschaltetem Ofentunnel in Etagenbauweise zur Entkoppelung des Wärmeverbundes Ofenkühlung-Trockner. Die Brennware wird nach dem ursprünglichen Ofen in einen höher liegenden Ofentunnel gehoben, nach diesem in einen weiteren Ofentunnel abgesenkt und schließlich zum ursprünglichen Ofenausgang transportiert. Die nachgeschalteten Ofentunnel werden im Gegenstrom mit Kühlluft durchströmt und die gesamte Kühlenergie der Brennzone zugeführt. Der bilanztechnische Energieverbrauch des Ofens reduziert sich um den Betrag der reduzierten Kühlluftmenge

5. Nutzung der Ofenabgase

Energetisch betrachtet wäre es natürlich besonders sinnvoll, auch die Abwärme der Öfen zu nutzen. Da die Abgase korrosive Bestandteile enthalten und der Exergiegehalt gering ist, ist dies nicht ohne Weiteres möglich. Nachfolgend werden 2 Optionen vorgestellt, wie die Nutzung der Ofenabgase erfolgen kann.

5.1 Organic Rankine Cycle (ORC-Anlagen)

Eine Methode zur Nutzung der Wärmeenergie von Abgasen besteht darin, die restliche Exergie der Abgase für die Stromerzeugung zu nutzen. Da jedoch für einen herkömmlichen Wasserdampfprozess mit nachgeschalteter Turbine relativ hohe Abgastemperaturen erforderlich sind, bietet sich insbesondere die Abwärme-Nutzung über einen Organic Rankine Cycle (ORC) an [6, 7]. Dabei werden anstelle von Wasser Kohlenwasserstoffe oder Silikonöle mit niedrigen Verdampfungstemperaturen verwendet. Damit kann auch bei Abgastemperaturen von z. B. 200 °C – in der Regel jedoch bei 300 bis 450 °C – noch Strom erzeugt werden. Der thermische Wirkungsgrad beträgt dabei jedoch nur 10–20 % [8], und der Wirkungsgrad nimmt mit niedrigeren Abgas-Temperaturen deutlich ab. Mit solchen Anlagen kann bei Abgastemperaturen von 400–600 °C eine Amortisationszeit von 5 Jahren und bei Abgastemperaturen von 300 °C eine Amortisationszeit von 10 Jahren erzielt werden [9]. Da es jedoch energetisch ungünstig ist, keramische Öfen mit hohen Abgastemperaturen zu betreiben und die geforderten Amortisationszeiten in der keramischen Industrie deutlich kürzer sind, erscheint dieses Verfahren als Einzellösung ungünstig. Würde jedoch, wie am Beispiel der Kraft-Wärme-Koppelung dargestellt, die mechanische Arbeit des Organic Rankine Cycle nicht in elektrische Energie umgewandelt, sondern direkt für den Betrieb von Wärmepumpen genutzt werden, ließe sich sowohl der energetische Wirkungsgrad als auch die Wirtschaftlichkeit signifikant erhöhen.

5.2 Thermoelektrischer Generator

Eine noch weiter in die Zukunft weisende Technologie stellt die Nutzung

des Seebeck- bzw. Peltier-Effektes dar. Der nach Thomas Johann Seebeck benannte Seebeck-Effekt tritt in Erscheinung, wenn zwei verschiedene, elektrisch leitende Materialien, beispielsweise zwei Metalle oder zwei Halbleiter, miteinander verbunden und deren beiden Kontaktstellen auf unterschiedliche Temperaturen gebracht werden (Bild 3). Auf Grund dieser Temperaturdifferenz ($\Delta T = T_1 - T_2$) entsteht eine elektrische Spannung (U). Die Höhe der Spannung wird dabei nicht nur durch die Temperaturdifferenz, sondern auch durch die Eigenschaften der einzelnen Materialien und deren Kombination bestimmt [10, 11]. In der Keramik ist die Nutzung dieses Effektes hinlänglich bei Thermoelementen bekannt. Die elektrische Spannung ist dabei der Temperaturdifferenz proportional, wodurch bei großen Temperaturdifferenzen auch größere elektrische Spannungen erzeugt werden. Eine nennenswerte Stromerzeugung ist jedoch schon bei Temperaturunterschieden von 50 °C möglich. Das bedeutet, dass diese thermoelektrischen Generatoren zur Nutzung der Abwärme industrieller Prozesse genutzt werden können [12]. So könnte z. B. aus der Abwärme von Brenn- oder Trockenprozessen elektrische Energie gewonnen werden, indem an den Abgasrohren thermoelektrische Generatoren angebracht werden. Vorteilhaft ist dabei, dass keinerlei bewegliche Teile erforderlich sind und damit keine Wartung erfolgen muss. Der Wirkungsgrad dieser Generatoren hat sich durch Fortschritte in der Forschung in jüngster Zeit deutlich erhöht und liegt im Bereich von 5–10 %. Diese Technologie kann sich zu einer wirtschaftlich sinnvollen Option entwickeln, je nachdem welche Fortschritte in der Forschung auf diesem Gebiet erzielt werden.

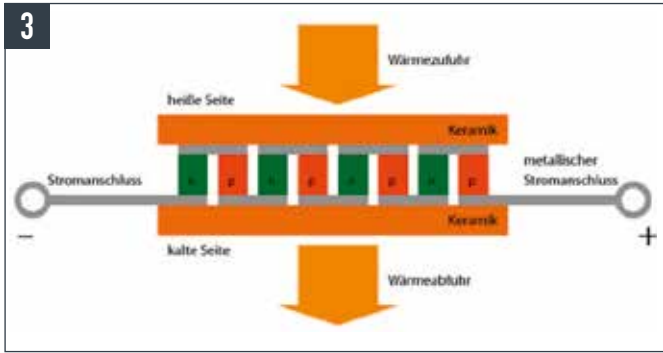


Bild 3 • Aufbau eines thermoelektrischen Generators: Kernstück sind die „Schenkel“ aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleitermaterialien, die in der Abbildung rot bzw. grün gekennzeichnet und über metallische elektrische Kontakte miteinander verbunden sind. Wenn sich die Temperatur der oberen und unteren Seite erheblich unterscheidet, entsteht eine elektrische Spannung zwischen den Stromanschlüssen links und rechts. Dabei findet ein Wärmefluss von der heißen zur kalten Seite statt, der von der genannten Temperaturdifferenz angetrieben wird [13]

6. Ökonomische Bewertung

Mit den hier vorgestellten technischen Verfahren wird es ermöglicht, bestehende Fertigungsanlagen stufenweise umzubauen und zu optimieren. Dabei kann der technische Entwicklungsstand der Einzel-Konzepte berücksichtigt werden. Ein Schlüssel dazu besteht in einer kostengünstigen energetischen Entkoppelung von Ofen und Trocknung. Damit kann die Energieversorgung der Trocknung durch gasbetriebene Wärmepumpen mit Nutzung der Abwärme bzw. die Nutzung der Abwärme von Kraftwärmekoppelung erfolgen. Wird z. B. in einem Rollenofen 50 % der Wärmeenergie als Kühlluft entnommen [2] und vollständig zur Trocknung verwendet, wird dieser Wärmeverbund aufgelöst. Dabei wird sich der Energieverbrauch des Ofens genau um diesen Betrag reduzieren.

Die Erzeugung der Trockenenergie mit mechanisch über Gasmotoren betriebenen Wärmepumpen würde bei einem mechanischen Wirkungsgrad von 40 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 50 % den Energieverbrauch für die Trocknung mehr als halbieren. Dies würde zu einer direkten Energieeinsparung von 25 % führen. Unter der Annahme, dass z. B. bei einer Fliesenfertigung 25 % der Energiekosten bzw. 10–15 % des Energiebedarfes elektrische Energie ist, würde eine vollständige Eigenproduktion über Kraft-Wärmekoppelung bzw. ORC-Anlagen zu einer zusätzlichen Kostenersparnis von ca. 10 % führen. Somit könnten die Energiekosten um 30–35 % gesenkt werden.

Nimmt man Investitionskosten von im Durchschnitt 1000 €/kW installierter Leistung für BHKW, ORC und Wärmepumpen an und geht von einer Jahreslaufzeit von 8400 h aus, würden sich die Investitionskosten auf ca. 12ct/kWh belaufen. Bei einem Gaspreis von 3,5 ct und einem Strompreis von 8,5 ct würde sich damit eine Amortisationszeit zwischen 2 und 3 Jahren ergeben. Damit würde aus thermoökonomischer Sicht eine Umsetzung sowohl energetisch als auch wirtschaftlich Sinn machen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Bei konsequenter Berücksichtigung der Exergie-Effizienz energetischer Prozesse ist es möglich, eine deutliche Reduktion der Energiekosten in keramischen Produktionsprozessen zu erzielen. Dabei können bestehende Anlagen stufenweise umgebaut und insgesamt mit bekannten Tech-

nologien eine Energiekostenreduktion von 30–35 % erzielt werden. Die Amortisationszeiten bewegen sich dabei im Bereich von 2–3 Jahren und liegen dadurch selbst ohne Subventionen in einer betriebswirtschaftlich sinnvollen Größenordnung. Der Schlüssel dazu ist eine kostengünstige Entkoppelung des Wärmeverbundes von Ofen und Trockner, eine energetisch optimierte Bereitstellung von Trocknungsenergie und der Eigenerzeugung von elektrischer Energie. Diese verfahrenstechnischen Optimierungen sind im Wesentlichen mit bestehenden Technologien möglich. Allerdings gibt es einen überschaubaren Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die Auswirkung geänderter Kühlkurven auf die Endprodukte, die Auslegung von nachgeschalteten Ofentunneln sowie die Wirkungsgrade und die Wärmeversorgung mechanisch betriebener Wärmepumpen detaillierter zu untersuchen. Ferner besteht ein mittel- bis längerfristiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um in dieser Anwendung neue Technologien wie thermoelektrische Generatoren weiterzuentwickeln. Neben den hier vorgestellten Möglichkeiten gibt es weitere Optionen, Energie- und Exergie-Effizienz zu erhöhen. Diese werden in nächster Zeit in weiteren Fachartikeln veröffentlicht. Für interessierte Unternehmen besteht die Möglichkeit, sich an Forschungsvorhaben der Hochschule Koblenz zu beteiligen. Daneben besteht die Möglichkeit, über ein Netzwerk von Industrie-Experten – basierend auf einer individuellen Energiebilanz und Analyse – ein Optimierungskonzept für Fertigungslinien bzw. komplette Werke anfertigen zu lassen.

Literatur

- [1] Amtsblatt der Europäischen Union Aktenzeichen C (2014) 7809, 27.10.2014
- [2] www.keramikinstitut.com/fileadmin/Dokumente/Eurosymposium/EURO08/Eu08_vortr5_Reh.pdf
- [3] Junge, K., Telljohann, U.: Entkoppelung von Ofen und Trockner durch Verbrennungsluftvorwärmung und Zwischenspeicherung der Verbundwärme. *Zi Ziegelindustrie International* **55** [8] (2002) 12–22
- [4] Baehr, H.D., Kabelac, S. (Hrsg.): *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*, 13. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg (2006), 542–543. ISBN-13: 978-3642005558
- [5] www.energie-lexikon.info/exergie.htm
- [6] Siefke, C.: Abwärmenutzung und Energieverbund im Ziegelwerk. *Zi Ziegelindustrie International* **66** [6] (2013)
- [7] Little, A.B., Garimelli, S.: Comparative assessment of alternative cycles for waste heat recovery and upgrade. *Energy* **36** [7] (2011) 4492–4499
- [8] www.ltt.uni-bayreuth.de/de/download/Infoblaetter/ORCA-2.pdf
- [9] Preißinger, M.: Thermoökonomische Bewertung des Organic Rankine Cycles bei der Stromerzeugung aus industrieller Abwärme. Dissertation Universität Bayreuth (2014)
- [10] www.physik.uni-muenchen.de/lehre/vorlesungen/sose_14/seminar_nano1/vorlesung/04_Andreas_Bauer_Thermoelektrik.pdf
- [11] www3.physnet.uni-hamburg.de/TUHH/Peltiereffekt.pdf
- [12] www.ipm.fraunhofer.de/en/ideas-expertise/thermoelectrics/energy-harvesting.html
- [13] www.energie-lexikon.info/thermoelektrischer_generator.html