

C. Schäffer\*

# Power-to-X: Hybride Energieversorgung keramischer Tunnelöfen

## KURZFASSUNG

Dieser Beitrag beleuchtet die Möglichkeiten, wie keramische Tunnelöfen zukünftig betrieben werden können, um einerseits maximale Energieeffizienz zu erreichen und andererseits der schwankenden Verfügbarkeit von elektrischer Energie Rechnung zu tragen. Gleichzeitig wird ein

gesamtwirtschaftlicher Beitrag zur Energiewende geliefert. In Anlehnung an das Konzept Industrie 4.0 der Bundesregierung, das primär die Vernetzung von Fertigungsprozessen zum Inhalt hat, werden Lösungen zur vernetzten Nutzung von Energie aufgezeigt.

## 1. Einleitung

Nicht nur Energieeffizienz ist ein Thema, das sowohl im politischen als auch ökonomischen Fokus steht, sondern auch die Speicherung bzw. die flexible Nutzung von Energie gewinnt zunehmend an Bedeutung. Durch den Ausbau erneuerbarer Energie mit zum Teil erheblich schwankenden Verfügbarkeiten besteht ein großer Bedarf an Technologien, die es ermöglichen, Verfügbarkeit und Bedarf vor allem von elektrischer Energie optimal aufeinander abzustimmen.

In diesem Artikel soll aufgezeigt werden, wie keramische Tunnelöfen zukünftig betrieben werden können um einerseits maximale Energieeffizienz zu erreichen und andererseits der schwankenden Verfügbarkeit von elektrischer Energie Rechnung zu tragen bzw. ein gesamtwirtschaftlichen Beitrag zur Energiewende geliefert wird. In Anlehnung an das Konzept Industrie 4.0 der Bundesregierung, das primär die Vernetzung von Fertigungsprozessen zum Inhalt hat, geht es dabei um eine vernetzte Nutzung von Energie.

Aus ökonomischen Gründen werden dabei nur Technologien berücksichtigt, die in bestehende Anlagen integriert werden können bzw. mit diesen kompatibel sind. Damit kann erreicht werden, dass Amortisationszeiten betriebswirtschaftlich sinnvoll sind und das technologische Risiko begrenzt ist.

## 2. Grundlagen

Ein grundsätzliches Problem der Energieeffizienz von im Wärmeverbund betriebenen Tunnelöfen und Trocknern besteht darin, dass die Wertigkeit von Energie nicht berücksichtigt wird. Indem die Energie der Ofen-Kühlung für die Trocknung verwendet wird, erscheint in einer Energiebilanz der Gesamtwirkungsgrad des Wärmeverbundes zwar günstig, eine optimale Nutzung der Energie wird dadurch aber nicht erreicht. In den letzten Jahren hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass es ungünstig sein kann, die Kühlzone des Ofens als Wärmetauscher für die Trocknung zu verwenden [1].

Entscheidend für eine energetische Optimierung ist die Berücksichtigung der Wertigkeit der eingesetzten Energie. Ausgedrückt kann diese Wertigkeit durch den Exergiegehalt der Energie werden.

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 beträgt dabei fast 60 % und setzt sich aus den Verlusten der Verbrennung, der Wärmeübertragung und der Abgas- und Abstrahlverluste zusammen [2].

Der Exergie-Gehalt von Wärmeenergie steigt mit zunehmender Temperatur und man kann daher von hochwertiger Wärmeenergie mit hoher Temperatur und hohem Exergie-Anteil und von minderwertiger Wärmeenergie mit niedriger Temperatur und niedrigem Exergie-Gehalt sprechen.

Betrachtet man nun den Wärmeverbund zwischen Ofen und Trockner 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 Energie-Verlust des Ofens auszugleichen muss dem Ofen zum Ausgleich hochwertige Wärmeenergie über Brennstoffe zugeführt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Wertigkeit von Energie wäre es sinnvoll, thermische Prozesse nicht mit Primärenergie zu versorgen, sondern die Primärenergie zur Stromerzeugung und Abwärme der Stromerzeugung für thermische Prozesse zu nutzen.

Daneben wäre es günstig immer dann wenn günstige elektrische Energie aus regenerativen Quellen zur Verfügung steht, diese anstelle von primären Energieträgern zu verwenden. Durch den Ausbau der Stromerzeugung von Windkraftanlagen und Photovoltaiksystemen treten phasenweise Perioden auf, in denen der Strompreis sogar negativ wird [3]. Dies ist vereinfacht so zu erklären, dass in Zeiten hoher Sonneneinstrahlung und großem Windaufkommens, das Angebot die Nachfrage übersteigt (Bild 1).

Würde der keramischen Industrie die Technologie zur Verfügung stehen kurzfristig und kurzzeitig zwischen Brennstoffen und elektrischer Energie zu wechseln, könnte dies zu einer deutlichen Reduktion der Energiekosten führen.

Wenn zudem die Möglichkeit bestehen würde, in Zeiten hoher Stromnachfrage aus primären Energieträgern Strom zu erzeugen und die Abwärme für thermische Prozesse zu nutzen, könnten Ziegelwerke als Energiepuffer fungieren und darüber sowohl betriebs- als auch volkswirtschaftlich erhebliche Energieeinsparungen ermöglichen.

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

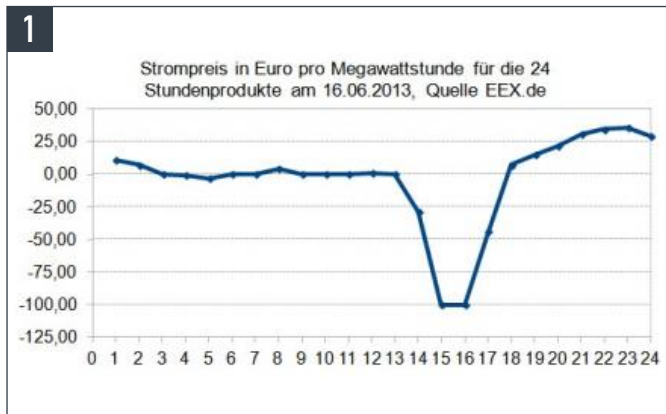


Bild 1 • Strompreise am 16. Juni 2013 [3]

### 3. Entkoppelung des Wärmeverbundes Tunnelöfen und Trockner

Voraussetzung für eine optimale Auslegung des Energie-Mix von Tunnelöfen ist eine Entkoppelung des Wärmeverbundes zwischen Ofen und Trockner, da dadurch die Wertigkeit von Energie besser berücksichtigt werden kann und insbesondere eine Steigerung der Exergie-Effizienz ermöglicht wird.

Es gibt eine Reihe von technischen Optionen 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 [4]. Die Energieversorgung der Trockner könnte dann z.B. über Blockheizkraftwerke erfolgen, die eine bessere Nutzung des Exergie-Gehalt ermöglichen. Wärme-Bilanztechnisch würde dies bedeuten, dass der Energieverbrauch des Ofens proportional mit der Reduktion der abgeführten Wärmeenergie sinken würde.

Optimal wäre bei einer Ofenverlängerung, auch die Ausfahrverluste der Ofenwagen zu reduzieren. Bei herkömmlicher Bauweise stößt die Ofenlänge jedoch aufgrund der erforderlichen Druckverhältnisse und Druckverluste bzw. der Strömungsverhältnisse im Ofen an Grenzen. Ferner stellt 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 derzeitigen Energiekosten unwirtschaftlich ist.

Eine herkömmliche Ausführung ist in Bild 2 dargestellt. Ofen und Trockner werden im Wärmeverbund betrieben und die Wärmeenergie aus der Sturzkühlung wird zur Trocknung verwendet.

In Bild 3 ist eine Lösung dargestellt, wie ein Tunnelofen mit nachgeschaltetem Ofentunnel 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. Der große Vorteil besteht darin, dass bestehende Produktionsflächen genutzt werden können und praktisch keine Änderung der Fundamente erfolgen müsste. Durch die reduzierte Entnahme von Kühlenergie in der Kühlzone würde sich am ursprünglichen Ofenausgang die Temperatur erhöhen.

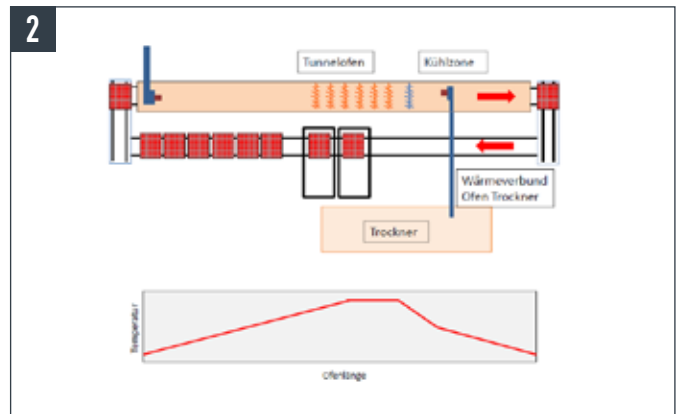


Bild 2 • Skizze eines im Wärmeverbund betriebenen Werkes, bei dem die Wärmeenergie aus der Kühlzone (Sturzkühlung) zur Trocknung verwendet wird. Der Temperaturverlauf über der Ofenlänge ist schematisch dargestellt

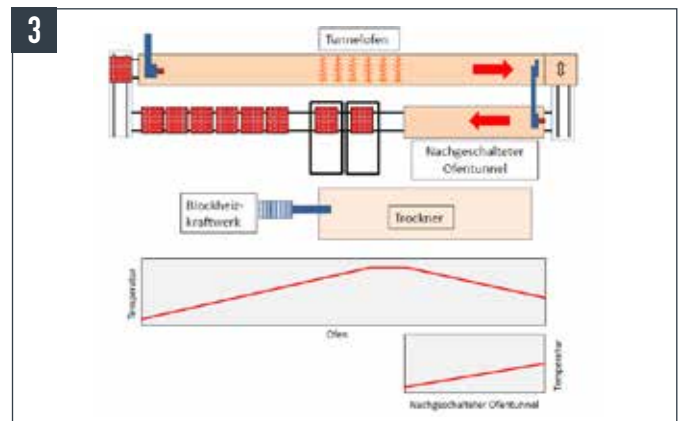


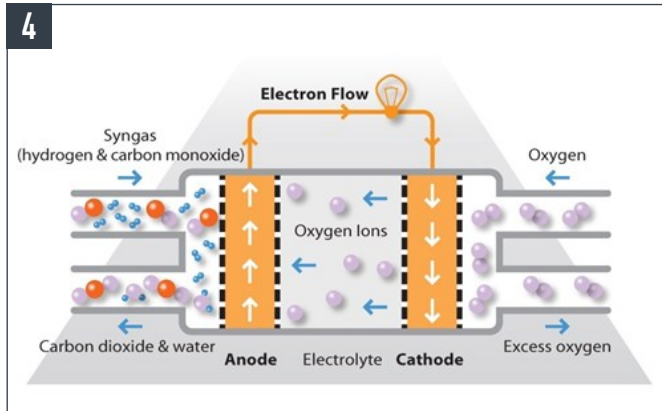
Bild 3 • Skizze eines Tunnelofens ohne Wärmeverbund Ofen und Trockner bzw. ohne Sturzkühlzone, bei dem der Ofen durch einen nachgeschalteten Ofentunnel verlängert ist. Die heißen Ofenwagen am ursprünglichen Ofenausgang werden mit einer isolierten Schiebebühne zum nachgeschalteten Ofentunnel transportiert. Dadurch reduziert sich bilanztechnisch der Energieverbrauch um den Betrag, der üblicherweise als Kühlluft in der Kühlzone entnommen wird. Die Energieversorgung der Trockner erfolgt über ein Blockheizkraftwerk

Mit einer wärmeisolierten Schiebebühne werden die heißen Ofenwagen verlustarm in den nachgeschalteten Ofentunnel, der sich auf den Rücklaufgleisen befindet, transportiert.

### 4. Hybride Energieversorgung

Durch die Entkoppelung von Ofen und Trockner wird es ermöglicht, die Brennstoffe zunächst für die Erzeugung elektrischer Energie mittels Kraft-Wärme-Koppelung zu verwenden 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.

Der thermische Wirkungsgrad von Blockheizkraftwerken beträgt ca. 55 %. Das bedeutet, dass bei vollständiger Erzeugung der Trocknungsenergie durch Blockheizkraftwerke mehr Strom erzeugt wird, als üblicherweise im Werk selbst verbraucht wird. Dieser überschüssige Strom



**Bild 4** • Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle. Sauerstoffionen diffundieren durch die keramische Elektrolytschicht, die z.B. aus Yttrium dotiertem Zirkonoxid besteht. Auf der Anodenseite oxidiert dieser Sauerstoff den Brennstoff und Wärmeenergie wird entsprechend der Reaktionsenthalpie frei gesetzt. Da dabei Elektronen freigesetzt werden, die Elektrolytschicht aber elektrisch nicht leitend ist, wird zwischen Anode und Kathode elektrischer Strom erzeugt [6]

kann mit entsprechender Vergütung in öffentliche Netze eingespeist und damit eine zusätzliche Einkommensquelle eröffnet werden. Wie eingangs dargestellt verursacht die unterschiedliche Verfügbarkeit von Strom aus Windkraftanlagen und Solarsystemen kurzzeitige Schwankung der Strompreise. Es ist daher besonders sinnvoll nur zu Zeiten in denen der Strompreis hoch ist, in öffentliche Netze einzuspeisen. In Zeiten mit kostengünstigem Strom oder negativen Strompreisen wäre es demgegenüber sinnvoll Strom zu verbrauchen. Bei einer Entkopplung von Ofen und Trockner wäre es sehr einfach möglich in diesen Zeiten z.B. ein Blockheizkraftwerk abzustellen bzw. dessen Leistung zu reduzieren und die Trocknerenergie elektrisch zuzuführen.

Es besteht ferner die Möglichkeit die Energieversorgung des Ofens kurzzeitig bzw. kurzfristig elektrisch zu verwirklichen. Dazu muss aber sichergestellt werden, dass sich bei einem Wechsel des Energieträgers die Strömungsverhältnisse im Ofen nicht signifikant ändern, da andernfalls die Brennkurve bzw. der Wärmeübergang durch Konvektion negativ beeinflusst werden würde. Da bei der Verbrennung von z.B. 1  $\text{m}^3$  Erdgas ca. 10  $\text{m}^3$  Verbrennungsgas erzeugt wird und dieses einen erheblichen Anteil der Gas-Strömung im Ofen verursacht, muss sichergestellt werden, dass bei einer elektrischen Beheizung eine ähnliche große Luftmenge in den Ofen geführt wird.

In Fällen in denen die Ofenatmosphäre einen deutlichen Einfluss auf das Brennergebnis hat, ist es zudem erforderlich diese weitestgehend konstant zu halten. Insbesondere der Wasserdampfgehalt, der bei der Verbrennung entsteht, muss dazu möglichst unverändert bleiben. Dies ist am einfachsten dadurch zu erreichen, dass bei Umstellung auf elektrische Beheizung feuchte Trocknerabluft in den elektrisch erhitzten Luftstrom geleitet wird.

Bei Verwendung von elektrischen Widerstandsheizungen, dürften diese aus Korrosionsgründen nicht im Brennraum installiert werden. Diese Widerstandsheizungen müssen außerhalb des Brennraumes angeordnet und dort mit Luft oder Ofen- bzw. Trocknergasen durchströmt werden. Aus Korrosionsgründen wäre es sinnvoll eine Befeuchtung erst nach der Heizung anzuordnen.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wäre es möglich die Energieversorgung von Öfen kurzfristig und kurzzeitig von Brennstoffen

auf elektrische Beheizung umzustellen ohne dass eine signifikante Änderung der Strömungsverhältnisse bzw. der Atmosphäre im Ofen auftreten würde.

Um die Strompreis-Schwankungen des Spot-Marktes optimal zu nutzen, muss eine Umstellung der Energieversorgung innerhalb von 20 min erfolgen, was ohne Berücksichtigung dieser technischen Gegebenheiten nicht möglich wäre.

## 5. Hybride Energieversorgung mit Feststoff-Brennstoffzellen (SOFC)

Energetisch und Exergetisch besonders effizient wäre eine Energieversorgung keramischer Öfen mit Hochtemperatur-Feststoffbrennstoffzellen (Solid Fuel Cells SOFC). Diese Brennstoffzellen (Bild 4) basieren auf keramischen Elektrolytschichten aus dotiertem Zirkonoxid und arbeiten bei Temperaturen von ca. 650 bis 1000 °C. Durch die hohen Betriebstemperaturen wird eine selbstreformierende Wirkung erzielt und herkömmliches Erdgas aber auch Biogas kann als Brennstoff verwendet werden. Wasserstoff als Energieträger ist dabei nicht mehr erforderlich. Der elektrische Wirkungsgrad ist anders als z.B. bei der Kraftwärmekoppelung nicht mehr vom Carnot-Wirkungsgrad abhängig und mit bis zu 60 % sehr hoch.

Die Abwärme dieser Zellen entspricht der Betriebstemperatur und könnte dadurch ideal für die Energieversorgung von Öfen verwendet werden. Für eine optimale Energieeffizienz wäre es sinnvoll, den in der Zelle nicht reagierten Brennstoff einer Nachverbrennung zuzuführen [5]. Werden die Abgase jedoch direkt dem Ofen zugeführt kann auch ohne Nachverbrennung eine optimale Ausnutzung der eingesetzten Energie erzielt werden.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass bei bestimmten Elektrolyt-Werkstoffen, die Möglichkeit besteht die Zellen auch als SOEC (Solid Electrolytical Cell) zu nutzen. Dies bedeutet, dass diese Zellen umgekehrt betrieben werden können und mit elektrischer Energie aus Wasserdampf Wasserstoff hergestellt werden kann. In Zeiten mit günstigem elektrischem Strom könnte dadurch Wasserstoff gewonnen werden, in Zeiten mit teurem elektrischem Strom könnte der erzeugte Wasserstoff zur Stromerzeugung und Beheizung der Öfen genutzt werden.

## 6. Ökonomische Bewertung

Ein Schlüssel zu einer betriebswirtschaftlich sinnvollen Steigerung der Energieeffizienz besteht darin, möglichst viele Anlagenteile weiter nutzen zu können, um damit die Investitionskosten gering zu halten. Durch eine energetische Entkopplung von Ofen und Trocknung mit einem nachgeschalteten Ofentunnel kann dies sehr kostengünstig erreicht werden. Damit kann die Energieversorgung der Trocknung exergetisch optimiert, zunächst für die Produktion elektrischer Energie genutzt werden. Dabei kann mehr Strom erzeugt werden als für den Eigenverbrauch notwendig ist und dieser in Stromnetze eingespeist werden. Durch eine hybride Energieversorgung auch für die Öfen kann zudem entsprechend den Strompreisen auf dem Spotmarkt eine optimale Kostenstruktur erzielt werden.

Nimmt man Investitionskosten von im Durchschnitt 1000 €/kW installierter Leistung für ein BHKW an und geht von einer Jahreslaufzeit von 8400 h aus, würden sich die Investitionskosten auf ca. 12 ct/kWh belaufen. Bei einem Gaspreis von ca. 3,5 ct und einem Strompreis von 8,5 ct würde sich damit eine Amortisationszeit zwischen 2 und 3 Jahren ergeben und die ganze Wärmeenergie der Trocknung könnte quasi kos-

tenlos erzeugt werden. Dies würde einer Energieersparnis von ca. 35 % entsprechen.

Durch den hohen elektrischen Wirkungsgrad noch günstiger wäre die Nutzung von Feststoffbrennstoffzellen, da damit die Exergie optimal genutzt werden kann. Bei Verwendung dieser Technologie könnten die Energiekosten um bis zu 40 % reduziert werden. Die Investitionskosten für Hochtemperatur-Brennstoffzellen kann noch nicht abschließend bewertet werden, da in diesem Bereich noch sehr viel Forschung betrieben wird. Nach einer vom US amerikanischen Energieministerium in Auftrag gegebenen Studie dürften sich selbst für kleine Anlagen in absehbarer Zeit Investitionskosten von ca. 2500 €/kW ergeben [7]. Da jedoch die Herstellungskosten, der eigentlichen Zellen bei ca. 1000,-€ liegen und ein wesentlicher Kostenfaktor die elektronische Steuerung und die Wechselrichter sind, ist davon auszugehen, dass insbesondere größere Anlagen günstiger werden und in absehbarer Zeit wirtschaftlich betrieben werden können.

Wird der Energieeinsatz entsprechend teurem Bedarf und kostengünstiger Verfügbarkeit von Strom optimiert und wird dadurch eine weitere Einsparung von 10 % der Gesamtenergiekosten erzielt, könnte mit den vorgeschlagenen Technologien Energiekosteneinsparungen von über 50 % erzielt werden, wobei die Amortisationszeiten in betriebswirtschaftlich sinnvollen Größenordnungen liegen.

Auf europäischer Ebene könnte alleine die keramische Industrie eine elektrische Gesamtleistung von ca. 2 GW erzeugen, was der Leistung von zwei durchschnittlichen Großkraftwerken entspricht. Diese elektrische Leistung könnte flexibel zur Verfügung gestellt bzw. abgenommen werden und damit zwei Spitzenlastkraftwerk ersetzen. Auch aus volkswirtschaftlicher Sicht sollte diese Technologie daher sehr interessant sein.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Entkoppelung des Wärmeverbundes von Ofen und Trockner mit einem nachgeschaltetem Ofentunnel, stellt eine kostengünstige Möglich-

keit dar, den Energieeinsatz eines Ziegelwerkes auch im Hinblick auf maximale Exergieeffizienz zu optimieren. Dadurch wird es ermöglicht die Energieträger entsprechend ihrer Wertigkeit optimal einzusetzen und maximale Gesamtwirkungsgrade zu erzielen. Eine Energiekostensparnis von ca. 35 % kann dabei relativ kurzfristig mit bestehenden oder in naher Zukunft verfügbaren Technologien erzielt werden.

Mittelfristig erscheint eine Kostensparnis von über 50 % möglich. Dazu besteht jedoch noch entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die erforderlichen Technologien für den Einsatz in der keramischen Industrie verfügbar zu machen.

### Literatur

- [1] **Junge, K., Telljohann, U.:** Entkoppelung von Ofen und Trockner durch Verbrennungsluftvorwärmung und Zwischenspeicherung der Verbundwärme. Ziegelindustrie Internat. ZI 8 (2002)
- [2] **Baehr, Kabelac:** Thermodynamik. 13. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006) 542–543
- [3] **www.iass-potsdam.de/de/forschungcluster/globaler-gesellschaftsvertrag-fur-nachhaltigkeit-gcs/news/strom-umsonst-negative**
- [4] **Siefke, C.:** Abwärmenutzung und Energieverbund im Ziegelwerk. Bauverlag ZI, Ziegelindustrie Internat. (2013) [6]
- [5] **Dietrich, R.U.:** Aufbau und Erprobung eines propanbetriebenen SOFC-Systems. Dissertation TU Clausthal (2013)
- [6] **www.fuelcelltoday.com/technologies/sofc**
- [7] **Battelle Memorial Institute:** Manufacturing cost analysis of 1 kW and 5 kW Solid Oxide Fuel Cell for Auxillary Power Application. Columbus, Ohio (2014)