

Hocheffiziente Infrarotstrahler auf Basis der Porenbrennertechnik

Highly efficient gas infrared heaters on the basis of the porous burner technology

Dr.-Ing. Franz von Issendorff

Issendorff Thermoprozesstechnik e.K.

Adalbert-Stifter Str. 13

91054 Erlangen

Tel. 09131 / 974 2588

E-Mail: info@i-tpt.de

Zusammenfassung

Infrarotstrahler auf Basis der Porenbrennertechnik können im Vergleich zu herkömmlichen Oberflächenstrahlungsbrennern höhere effektive Strahlungstemperaturen und damit höhere spezifische Strahlungsleistungen erreichen. Daneben zeichnen sich Porenbrenner unter anderem auch durch eine größere Modulationsbreite bei gleichzeitig niedrigen Schadstoffemissionen aus.

Geeignete Materialien, wie z.B. SiSiC-Schäume für die Verbrennungszone oder kurzfaserverstärkte Al₂O₃-Verbundkeramiken, erlauben den sicheren und dauerhaften Betrieb von Porenbrennern. Neue Materialentwicklungen werden zukünftig den Anwendungsbereich der Porenbrennertechnik erweitern.

Summary

Gas infrared heaters on the basis of the porous burner technology allow in comparison to common radiant burners higher effective radiating temperatures and consequently higher specific radiant output. Furthermore, porous burners exhibit a wide power modulation range and low emissions.

Suitable materials, such as SiSiC-foams for the combustion zone and short fiber-reinforced Al₂O₃-ceramic composites, allow the safe long-term operation of porous burners. Newly developed materials will extend the range of applications of the porous burner technology in the near future.

Einleitung

Mit der Entwicklung der Porenbrennertechnologie konnte in den vergangenen Jahrzehnten ein wichtiger Beitrag zur Verbrennungstechnik geleistet werden. Niedrige Schadstoffemissionen, hohe Leistungsmodulation und geringes Bauvolumen sind Merkmale, welche die Porenbrennertechnologie auszeichnen. Aufgrund des Stabilisierungsprinzips können unterschiedliche Brennergeometrien relativ leicht realisiert werden, wodurch sich eine enorme Bandbreite von möglichen Anwendungen dieser Technologie ergibt.

Bei geeigneter Bauform bieten sich Porenbrenner unter anderem für den Einsatz als Hellstrahler, d. h. zur Bereitstellung von Strahlungswärme, an. Anwendungsfelder für solche Hellstrahler sind zum Beispiel industrielle Trocknungsprozesse, Oberflächenbehandlungen oder auch die Beheizung von Hallen oder Freiflächen.

Herkömmliche Hellstrahler basieren auf einer Oberflächenstabilisierung, d. h. die Verbrennungsprozesse werden auf einer porösen Festkörperoberfläche stabilisiert. Bei diesen Brennern reagiert das vorgemischte Brennstoff-Luft-Gemisch nicht in einer freien Flamme, vielmehr wird ein ausgedehnter zweidimensionaler Flamment Teppich erzeugt, der je nach Ausführung der Festkörpermatrix noch eine Vielzahl von kleinen Einzelflammchen erkennen lässt. Die Stabilisierung beruht hierbei auf der Wärmeabgabe der Flamme an die Festkörperoberfläche, wodurch eine effiziente Kühlung der Flamme realisiert wird, die abhängig von dem sich einstellenden Abstand zwischen Flamme und Festkörperoberfläche ist. Es können sehr niedrige Flammentemperaturen erreicht werden, wodurch als Konsequenz auch die Stickoxidbildung reduziert wird. Aufgrund des Stabilisierungsprinzips lassen sich mit herkömmlichen Hellstrahlern Oberflächentemperaturen zwischen 800 °C und 1100 °C erzielen. Damit ist auch die maximale Strahlungsleistung, die von herkömmlichen Oberflächenstrahlungsbrennern abgegeben werden kann, begrenzt.

Die Porenbrennertechnologie zeichnet sich im Gegensatz zu herkömmlichen Oberflächenstrahlungsbrennern dadurch aus, dass die Verbrennungsreaktionen in den Hohlräumen einer dreidimensionalen porösen Struktur stabilisiert werden. Aufgrund des hierdurch wesentlichen verbesserten Wärmeübergangs zwischen Gas und Festkörper wird, bei geeigneter Ausführung der porösen Struktur, eine intensive Wärmeauskopplung aus der Verbrennungszone durch Strahlung erreicht. Die Strahlungstemperatur kann hierbei über 1300 °C betragen.

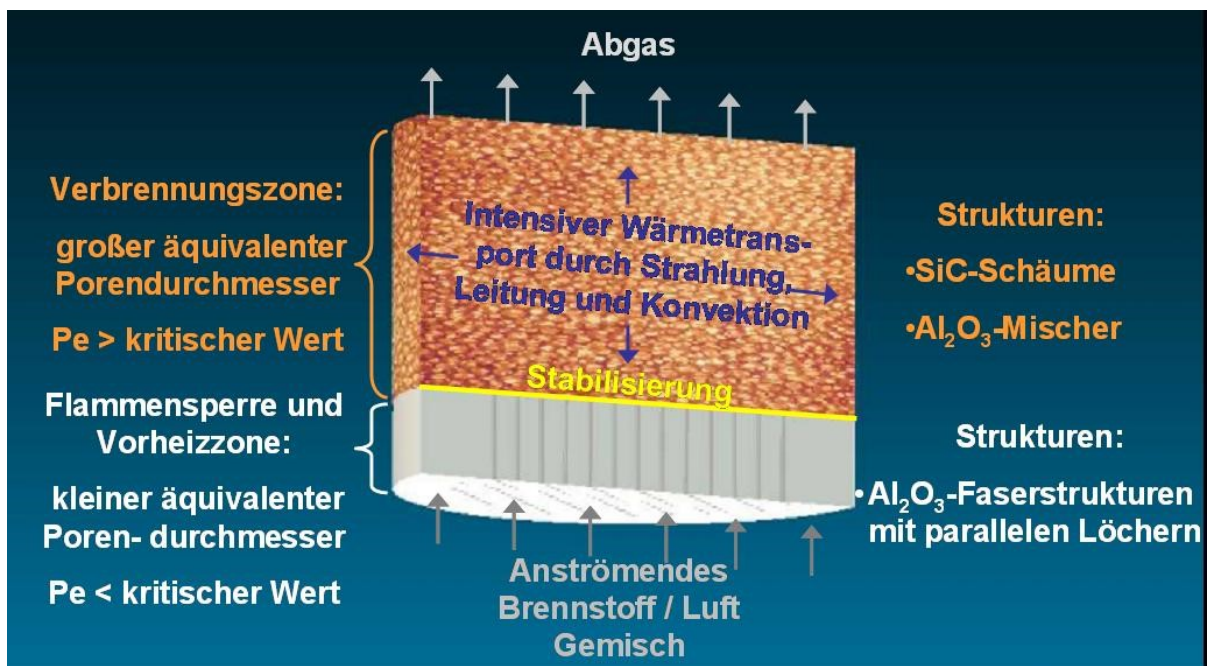


Bild 1: Aufbau eines Porenbrenners

Funktionsprinzip

Im Gegensatz zu Verbrennungstechniken, die freie Flammen verwenden, wird bei der Porenbrennertechnologie der Brennstoff in den Hohlräumen einer porösen Festkörpermatrix umgesetzt. Die Grundlage dieser Technologie basiert auf dem Erkenntnis, dass für die Flammenausbreitung in einer porösen Struktur ein gewisses Mindestverhältnis von Wärmeproduktion durch die Verbrennung zu Wärmeabfuhr durch das umgebende Medium gewährleistet sein muss. Dieser Zusammenhang wird bei der Porenbrennertechnologie genutzt. Zwischen Mischraum und der Verbrennungszone mit großen Porenabmessungen wird eine Zone mit kleinen Porenabmessungen angeordnet. In dieser Zone wird der Reaktionsfront soviel Wärme entzogen, dass die Reaktionen thermisch gequenchet werden und sie als Flammensperre fungieren kann. Der schematische Aufbau eines derartigen Porenbrenners ist in **Bild 1** dargestellt. Die Stabilisierung der Flammenfront erfolgt grundsätzlich zwischen diesen beiden Zonen. Dadurch lässt sich der gesamte Prozess relativ einfach technisch realisieren und kontrollieren, da die Verbrennungsreaktion stets an einer festen Stelle beginnt und somit Materialien, Isolierungen und eventuelle Kühlungen geeignet ausgelegt werden können. Eine Änderung des Gasdurchsatzes bzw. der Gemischzusammensetzung beeinflusst lediglich die Ausdehnung der Reaktionszone in Strömungsrichtung, nicht jedoch deren Startpunkt am Übergangsbereich der beiden Regionen.

Aus der Art der Stabilisierung und dem hohen Wärmeübergang zwischen Gasphase und Festkörper in der Verbrennungszone ergeben sich einige Vorteile:

Kompaktheit und Leistungsdichte:

Im Gegensatz zu den sehr dünnen Reaktionsfronten in freien Flammen, wird bei der Verbrennung in porösen Strukturen die Reaktionszone durch den hohen Wärmetransport auf ein größeres Gebiet ausgedehnt (**Bild 2**). Da auch ein signifikanter Anteil der Wärme entgegen der Strömungsrichtung transportiert wird, kommt es zu einer Vorwärmung des anströmenden Brennstoff-Luft-Gemisches. Dadurch wird die Brenngeschwindigkeit bis um das 30 - fache erhöht und ermöglicht einen Betrieb mit sehr hohen Anströmgeschwindigkeiten, bevor es zu einem Austragen der Reaktion kommt. Aus diesem Grund können hohe Leistungsdichten (beispielsweise bei Methan/Luft atmosphärisch bis zu $4 \text{ MW} / \text{m}^2$) realisiert werden.

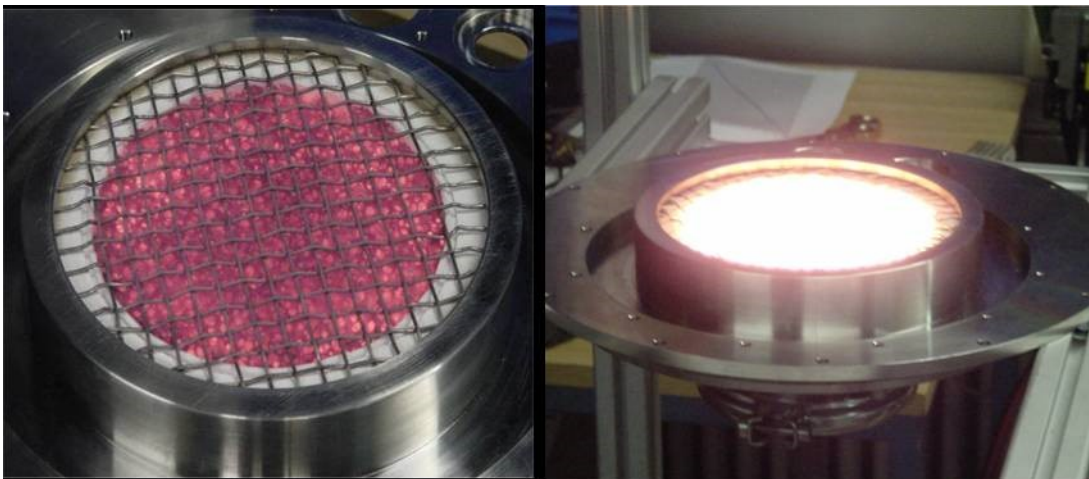


Bild 2: Porenbrenner bei unterschiedlichen Leistungen

Leistungsmodulation:

Da im Porenbrenner sehr hohe Brenngeschwindigkeiten erreicht werden, liegt die obere Leistungsgrenze höher als bei vergleichbaren Systemen. Die kleinste mögliche Leistung, wie gut die Flammensperrenzone bei geringen Gasdurchsätzen einen Flammenrückschlag verhindern kann. Je nach Ausführung der Flammensperre und des Brennstoffs kann eine Leistungsdynamik bis zu 1:20 erreicht werden.

Niedrige Schadstoffemissionen:

Neben den bereits erwähnten positiven Effekten hat der äußerst effektive Wärmetransport noch einen weiteren Vorteil. Eine erhebliche Wärmemenge kann bei einer dünnen Ausführung der Verbrennungszone in Form von Strahlung an die Umgebung abgegeben werden. Hierdurch kann die Maximaltem-

peratur in der Verbrennungszone gesenkt und ein Temperaturfenster eingehalten werden, das einerseits den vollständigen Abbau von Kohlenmonoxid ermöglicht, andererseits jedoch eine signifikante Stickoxidbildung verhindert. Es resultieren Porenbrenner, die über den gesamten Leistungsmodulationsbereich sehr emissionsarm sind.

Stabilität:

Aufgrund der hohen thermischen Trägheit des Feststoffs führen kurzzeitige Schwankungen des Gasdurchsatzes und der Gaszusammensetzung nicht zum sofortigen Verlöschen der Verbrennungsreaktionen. Das Temperaturfeld bleibt, hervorgerufen durch die große Wärmekapazität des porösen Materials, auch bei Zuständen außerhalb des normalen Betriebsbereiches noch relativ lange auf ausreichend hohem Niveau, um die Verbrennung aufrecht zu halten.

Multistofffähigkeit:

Das Konzept, Flammenreaktionen in porösen Medien zu stabilisieren, ist unabhängig vom verwendeten Brennstoff; es basiert einzig auf den effektiven Wärmetransportmechanismen der Feststoffmatrix. Aus diesem Grund lassen sich Porenbrenner realisieren, in denen eine Vielzahl verschiedenster gasförmiger Brennstoffe auch stark schwankender Qualität umgesetzt werden können.

Komplexe Brennraumgeometrie: Da das Stabilisierungskonzept eindimensional ist, können prinzipiell beliebige Formen realisiert werden. Limitierungen ergeben sich ausschließlich durch die Materialien.

Materialien

Die Anforderungen der Industrie an Qualität, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Porenbrennern ist hoch. Die Porenbrennertechnologie ist auf den Einsatz von keramischen Materialien angewiesen, da die Verbrennung innerhalb einer porösen Struktur stabilisiert wird und Temperaturen über 1500 °C erreicht werden können. Die hohen Temperaturen aber auch die oxidierende Atmosphäre und der hohe Wasserdampfpartialdruck machen Materialien notwendig, die in höchstem Maße temperatur- und korrosionsbeständig sind.

Neben einer ausreichend hohen Einsatzgrenztemperatur sollte das in der Verbrennungszone eingesetzte Material über eine möglichst hohe Emissivität und Wärmeleitfähigkeit verfügen, um einen hohen Wärmetransport innerhalb der Verbrennungszone zu gewährleisten. Darüber hinaus muss der Werkstoff eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit aufweisen, um der in vielen Anwendungen geforderten hohen Anzahl an Lastwechseln und Start-Stopp-Vorgängen standhalten zu können. Die instationären Prozesse beim Anfahren und Abschalten sind besonders belastend, weil dabei zeitliche und örtliche Temperaturgradienten von mehreren hundert Kelvin pro Minute und pro Zentimeter auftreten können. Um thermische Spannungen bzw. die Zerstörung der porösen Strukturen im Betrieb zu vermeiden, müssen die Strukturen im Sinne einer langzeitstabilen Konstruktion eine möglichst geringe Wärmeausdehnung aufweisen.

Bei den meisten Anwendungen werden für die Verbrennungszone derzeit Schaumstrukturen aus SiSiC eingesetzt (**Bild 3**), da dieses Material hinsichtlich der entscheidenden Eigenschaften den besten Kompromiss darstellt.

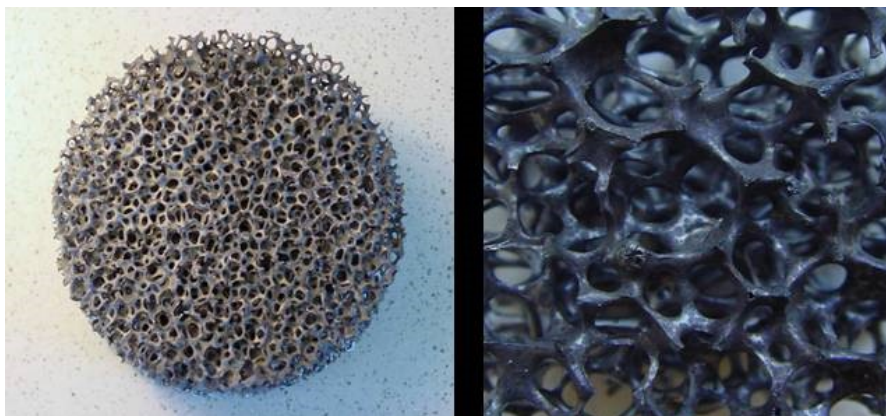


Bild 3: SiSiC-Schaumkeramik

Daneben kommen für Spezialfälle aber auch Mischerstrukturen aus Al_2O_3 zum Einsatz (**Bild 4**). Andere Materialentwicklungen, die im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) geförderten Verbundprojektes „CERPOR-Optimierung keramischer Bauteile für die Porenbrennertechnologie“ entwickelt wurden, basieren auf C/SiSiC-Strukturen (**Bild 4**).

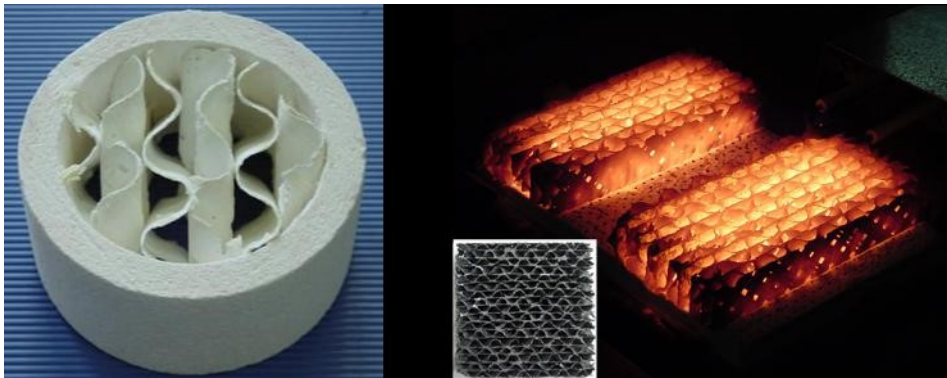


Bild 4: Unterschiedliche Verbrennungszonen

Aufgabe der Flammensperre ist es, die Verbrennungszone vom Mischraum abzugrenzen. Neben den kleinen Porenabmessungen, die zum Löschen der Verbrennungsreaktionen notwendig sind, ergeben sich aus dem Einsatz als Flammensperre einige weitere Anforderungen an Material-Struktur-Kombinationen.

Während die Verbrennungszone eine hohe Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig geringem Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen muss, wird für die Flammensperre ein Material benötigt, das dem enormen Temperaturgradienten zwischen dem mit Umgebungstemperatur anströmenden Brennstoff/Luft-Gemisch und der Temperatur in der Reaktionszone, standhalten muss.

In den letzten Jahren haben sich kurzfaserverstärkte Al_2O_3 -basierte Lochplatten für die Flammensperre bewährt (**Bild 5**). Diese Strukturen weisen aufgrund ihrer hohen Mikroporosität eine deutlich niedrigere effektive Wärmeleitfähigkeit als Schüttungen und Schäume auf. Außerdem ist der Druckverlust von Lochplatten deutlich niedriger als bei Schüttungen und Schäumen gleicher Makroporosität. Ein weiterer Vorteil von Faserstrukturen ist ihre Fähigkeit in begrenztem Maße mechanische Spannungen, die durch die Wärmedehnung und Temperaturgradienten hervorgerufen werden, abzubauen. Die beschriebenen Flammensperren wurden für den Einsatz von kohlenwasserstoffbasierten Brennstoffen wie Methan oder Propan entwickelt. Mit diesen Brennstoffen ermöglichen diese konventionellen Flammensperren aus Fasermaterialien gemäß dem Stand der Technik einen sicheren, schadstoffarmen Betrieb über einen weiten Leistungsbereich.

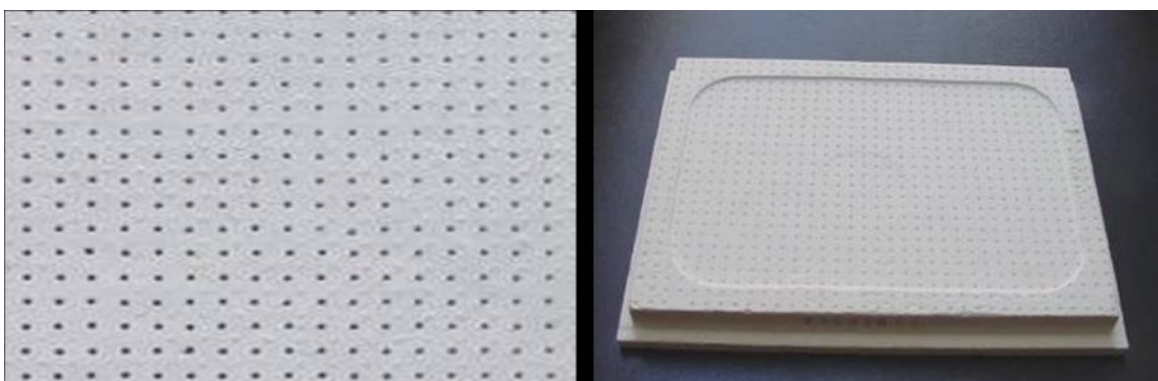


Bild 5: Flammensperre Al_2O_3

Neuere Entwicklungen für die Flammensperre gehen inzwischen in Richtung von Tandemkompositen, die eine stoffschlüssige Kombination aus preiswerten kurzfaserverstärkten Isolationsmaterialien und hochfester langfaserverstärkter Oxidkeramik (z.B. WHIPOX) darstellen (**Bild 6**).

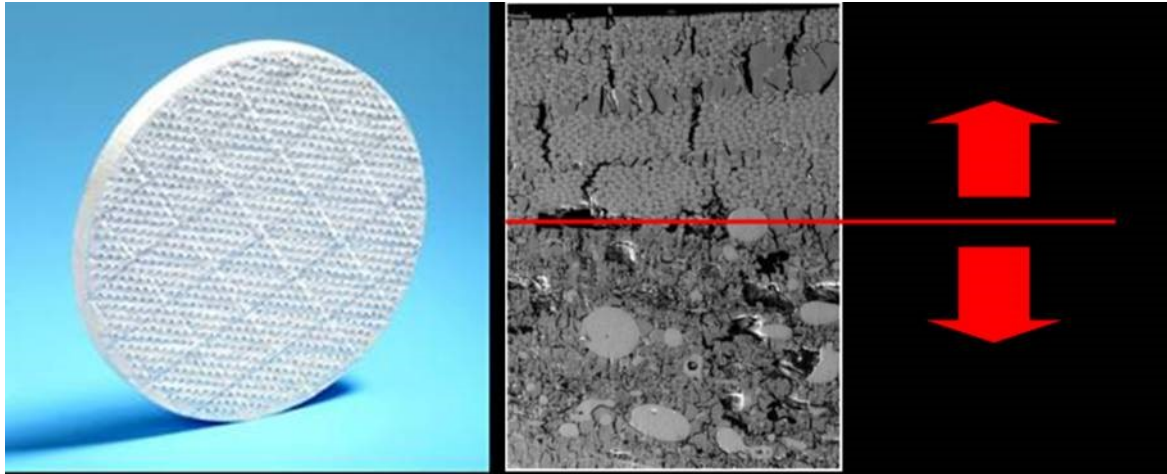


Bild 6: Whipox

IR-Strahler

Für Anwendungen, die eine hohe Strahlungsleistung erfordern, wie z. B. Trocknungsprozesse oder auch Hallenbeheizungen, werden Porenbrenner mit kurzer Verbrennungszone eingesetzt. Die kurze Verbrennungszone ermöglicht eine Strahlungsabgabe an die Umgebung aus dem Innern der porösen Struktur. Dies hat unter anderem zur Folge, dass das Abgas die Verbrennungszone mit Temperaturen $< 1200\text{ °C}$ verlässt, während effektive Strahlungstemperaturen von über 1400 °C erreicht werden können. **Bild 7** gibt für einen schwarzen Strahler die Intensitätsverteilung der Strahlung über der Wellenlänge wider (Plancksches Strahlungsgesetz). Die Maxima der jeweiligen Intensitätsverteilungen liegen zwischen $1,5\text{ }\mu\text{m}$ und $2,5\text{ }\mu\text{m}$ im Nahinfrarot. Durch eine Erhöhung der effektiven Strahlungstemperatur von 1100 °C bei einem Oberflächenstrahlungsbrenner auf eine Temperatur von 1400 °C , die mit einem Porenbrenner zu erreichen ist, lässt sich die spezifische Strahlungsleistung demnach mehr als verdoppeln.

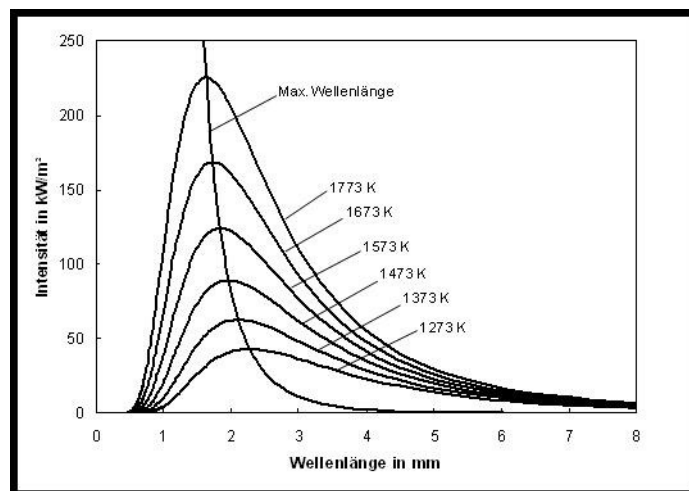


Bild 7: Intensitätsverteilung eines schwarzen Strahlers

Zur Berechnung des realen Abstrahlungsverhaltens ist zusätzlich die Kenntnis des Emissionsgrads des strahlenden Körpers notwendig. Für eine SiSiC-Schaumkeramik kann hierbei bei den relevanten Temperaturen von Werten zwischen 0,9 und 0,97 ausgegangen werden (**Tabelle 1**).

Temperatur in °C	200	400	600	800	1000	1200
SiSiC Emissionsgrad ε (Brune)	0,82	0,86	0,88	0,88	0,96	0,97
10 ppi SiC-Schaum (Pickenäcker)	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	0,9

Tabelle 1: Emissionsgrad von SiSiC bei verschiedenen Temperaturen.

In Bild 8 ist ein Porenbrenner der Fa. GoGas GmbH & Co. KG, Dortmund, mit kurzer Verbrennungszone sowie eine Simulation des Temperaturfeldes im Porenbrenner abgebildet. Der abgebildete Brenner wurde im Rahmen von Feldtests in der Papierindustrie auf seine Langzeitstabilität und seine praktische Einsetzbarkeit untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Porenbrennern in existierenden Anlagen aufgrund seiner höheren Strahlungsleistung zu einer deutlichen Erhöhung der Trocknungsleistung führte.

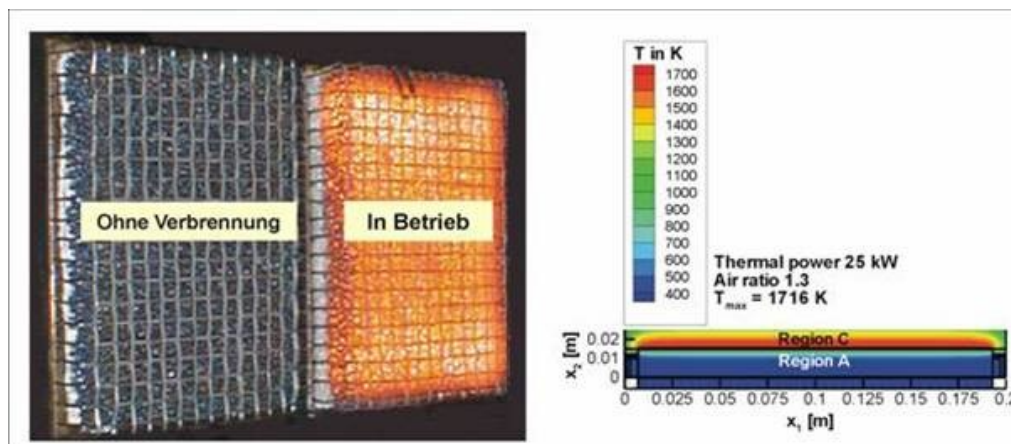


Bild 8: Porenbrenner und berechnete Temperaturverteilung

Zur Berechnung des Strahlungswirkungsgrades, der das Verhältnis der eingesetzten Brennstoffenergie und der Strahlungsleistung des Brenners wiedergibt, kann eine vereinfachte Energiebilanz des Brenners herangezogen werden (**Bild 9**). Hierbei geht sowohl der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient im Innern der porösen Verbrennungszone, der für 10ppi-Schäume zwischen 50.000 W/m³K und 100.000 W/m³K liegen kann, als auch der oben bereits erwähnte Emissionsgrad der Struktur in die Rechnung ein.

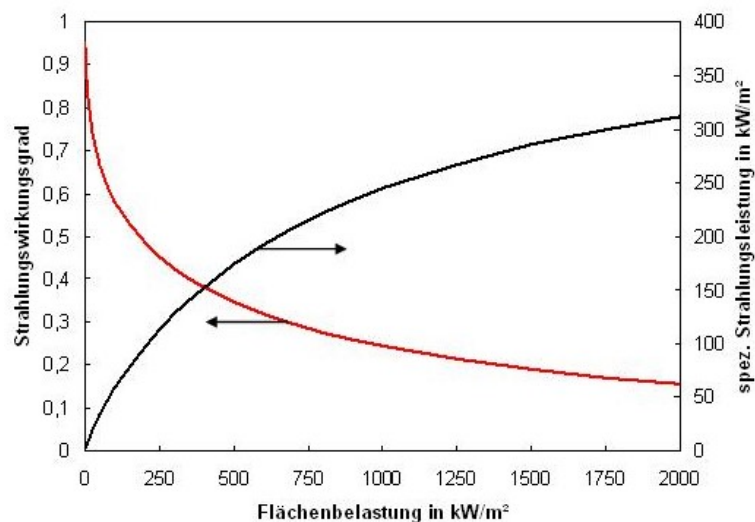


Bild 9: Strahlungswirkungsgrad und Strahlungsleistung eines Porenbrenners

Zusammenfassung

Die Porenbrennertechnik hat inzwischen einen Reifegrad erreicht, der eine Markteinführung erlaubt. Es stehen inzwischen Materialien zur Verfügung, die den enormen Belastungen durch hohe Temperaturen, zeitliche und örtliche Temperaturgradienten sowie den oxidierenden Verbrennungsbedingungen dauerhaft standhalten können. Feldtests haben gezeigt, dass Porenbrenner auch unter extremen Produktionsbedingungen eingesetzt werden können. Neue Ansätze für Werkstoffe und Werkstoffkombinationen werden zukünftig eine weitere Ausdehnung der Anwendungsgebiete der Porenbrennertechnik erlauben.

Die Verwendung von Porenbrennern als Infrarotstrahler stellt eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Oberflächenstrahlungsbrennern dar, die in ihrer spezifischen Strahlungsleistung durch die maximal erreichbaren Oberflächentemperaturen begrenzt sind. Porenbrenner können effektive Strahlungstemperaturen $> 1400\text{ °C}$ erreichen, wodurch die Strahlungswärmeabgabe deutlich erhöht werden kann.

Weiterführende Literatur

Durst, F.; Kesting, A.; Mößbauer, S.; Pickenäcker, K.; Pickenäcker, O.; Trimis, D., (1997), Der Porenbrenner – Konzept, Technik und Anwendungsgebiete, Gaswärme International, Vol. 46, Nr. 6, S. 300-307.

Babkin, V.S.; Korzhavin, A.A.; Bunev, V.A., (1991), Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media, Combustion and Flame Vol. 87, S. 182-190.

D. Trimis (1995), Verbrennungsvorgänge in porösen inerten Medien, BEV Heft 95.5, ESYTEC, Erlangen.

S. Diezinger (2006), Mehrstofffähige Brenner auf Basis der Porenbrennertechnik für den Einsatz in Brennstoffzellensystemen, Dissertation, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg

J. Glaß (2004), Innovations- und Technologiemanagement am Beispiel der Porenbrennertechnologie, Dissertation, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg

A. Mach, F. von Issendorff, (2005), CERPOR - Optimierung keramischer Bauteile für die Porenbrennertechnologie, CFI Ceramic Forum International, Vol 82, No. 13

Bildunterschriften

Bild 1: Schematischer Aufbau eines Porenbrenners (LSTM-Erlangen)

Bild 2: Porenbrenner bei Leistungen von 2 kW und 22 kW

Bild 3: SiSiC-Schaumstrukturen (Erbicol SA)

Bild 4: Al_2O_3 -Mischerstruktur (Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik) und neuartige Porenbrennerstrukturen aus 3D-C/SiSiC (DLR-IBK)

Bild 5: Kurzfaserverstärkte Al_2O_3 -Lochplatte (Fa. Duotherm Isoliersysteme GmbH)

Bild 6: Tandem Komposit (DLR-IWF, Duotherm Isoliersysteme GmbH)

Bild 7: Spezifische Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Temperatur

Bild 8: Porenbrenner RADIMAX (GoGas GmbH & Co. KG) und Simulation des Temperaturfeldes

Bild 9: Berechneter Strahlungswirkungsgrad und berechnete absolute Strahlungsleistung eines Porenbrenners