Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 21

Artikel: Porenbrenner in der Energie- und Wärmetechnik

Autor: Durst, Franz / Kesting, Alfons / Mössbauer, Stephan

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902124

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Für die Energiewandlung sind Verbrennungsvorgänge von enormer Wichtigkeit. Weltweit werden derzeit 86% der Energieressourcen durch Verbrennungsprozesse verbraucht. 61% des Weltenergieverbrauchs entfallen auf die Verbrennung gasförmiger oder flüssiger Brennstoffe (Erdgas und Öl) – und dies mit sowohl in absoluten Zahlen als auch anteilsmässig steigender Tendenz [1]. Aufgrund dieser grossen Bedeutung für die Energiebereitstellung sind auch heute noch Entwicklungen an dieser «ersten Erfindung der Menschheit» notwendig, insbesondere hinsichtlich Kosten, Regelbarkeit, Kompaktheit und Schadstoffminimierung. Mit Hilfe eines neuartigen Verbrennungsprinzips, der Porenbrennertechnik, werden all diese wichtigen Anforderungen in herausragender Weise erfüllt.

Porenbrenner in der Energie- und Wärmetechnik

■ Franz Durst, Alfons Kesting, Stephan Mössbauer, Karin Pickenäcker, Olaf Pickenäcker, Arndt-Udo Rolle, Dimosthenis Trimis, Klemens Wawrzinek und Michael Keppler

Einleitung

In den letzten Jahrzehnten wurden erhebliche Verbesserungen in der Verbrennungstechnik erzielt. Diese gingen zunächst in Richtung Brennstoffeinsparung und Emissionsminderung. Inzwischen sind die Kosten, die Modulierbarkeit und das Bauvolumen der Verbrennungstechniken von zunehmendem Interesse. Daher arbeitet man heute weniger mit Diffusionsflammen, sondern hauptsächlich mit vorgemischten Flammen. Ein neuartiges Verbrennungskonzept, das die gegenwärtigen Anforderungen hervorragend erfüllt, ist die Porenbrennertechnik.

Bei der Porenbrennertechnik findet der Verbrennungsprozess nicht wie bei konventioneller Verbrennung in einer reinen Gasströmung statt; vielmehr lokalisieren sich die Reaktionen innerhalb der Hohlräume eines inerten Porenkörpers. Hierdurch ist die effektive Wärmeleitung um ein 100faches höher als bei den sonst üblichen Verbrennungsprozessen mit freien Flammen. Dies bewirkt zum einen eine Homogenisierung des Temperaturfeldes sowie eine intensive Wärmeauskopplung aus der Verbrennungsregion. Dies hat sehr niedrige Schadstoffemissionen zur Folge. Ausserdem ermöglichen die hohen Verbrennungsgeschwindigkeiten eine Kleinbauweise. Daneben ist die Stabilität des Verbrennungsprozesses sehr hoch, wodurch einerseits die Leistung zwischen wenigen Prozenten und 100% stufenlos geregelt werden kann sowie andererseits mit extrem mageren Brennstoff-Luft-Gemischen – mit Luftvorwärmung wurden bei adiabatem Betrieb bereits Luftzahlen von 5 erreicht – gefahren werden kann. Von adiabatem Betrieb spricht man dann, wenn der Prozess von seiner Umgebung vollständig thermisch isoliert ist, das heisst, wenn dem Prozess keine Wärme entzogen wird. Die Luftzahl kennzeichnet bei technischen Verbrennungsprozessen den tatsächlichen Luftüberschuss im Vergleich zur chemisch benötigten Mindestluftmenge. Eine Luftzahl von 1,3 gibt an, dass die Verbrennung mit einem Luftüberschuss von 30% betrieben wird. Ferner ist durch den Wärmespeichereffekt der Betrieb gegenüber schnellen Schwankungen von Luftzahl und Leistung unempfindlich. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Brennraumgeometrie äus-

Adressen der Autoren
Prof. Dr. *Franz Durst*, Dipl.-Ing. *Alfons Kesting*
Dipl.-Ing. *Stephan Mössbauer*, Dipl.-Ing. *Karin Pickenäcker*, Dipl.-Ing. *Olaf Pickenäcker*
Dipl.-Ing. *Arndt-Udo Rolle*, Dr.-Ing. *Dimosthenis Trimis*, Dipl.-Ing. *Klemens Wawrzinek*, Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Cauerstr. 4
D-91058 Erlangen
Dr.-Ing. *Michael Keppler*, Invent GmbH
Marloffsteiner Str. 1, D-91080 Uttenreuth

serst flexibel gestaltet werden kann; so sind neben kreisförmigen oder rechteckigen Grundflächen auch ring- oder scheibenförmige Geometrien möglich. Ausserdem ist der Betrieb sehr geräuscharm. Da die Porenbrennertechnik im Gegensatz zu katalytischen Verbrennungskonzepten zumeist auf der Verbrennung in *inerten* Porenkörpern basiert, das heisst nicht auf teure Katalysatoren angewiesen ist, gibt es auch keine Alterungseffekte.

Das Porenbrennerkonzept

Ein erst junger Zweig der Verbrennungstechnik ist die Verbrennung in inerten porösen Medien [2–4]. Die anfänglich grösste Schwierigkeit für eine Anwendung der Verbrennung in Porenkörpern war das Problem der Stabilisierung der Flamme, das heisst die Vermeidung des Ausblasens bei hohen Volumenströmen und des Flammenrückschlags bei kleinen Durchsätzen. Stabilisierungskonzepte basierend auf der Regelung der Strömungsgeschwindigkeit (über Volumenstrom oder Querschnittserweiterung) oder der Temperatur [5–8] sind sehr komplex und lassen Wünsche hinsichtlich der Dynamik offen.

Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) in Erlangen wurde ein einfaches Stabilisierungskonzept für die Verbrennung in porösen Medien entwickelt. Dieses basiert darauf, dass sich nach einer Zone mit geringen charakteristischen Hohlraumabmessungen (Region A) ein Porenkörper mit deutlich grösseren Poren (Region C) anschliesst [9–12]. Region A fungiert als Flammensperre, da über die kleinen Strömungskanäle mehr Wärme abgeführt wird, als durch die Verbrennung erzeugt werden kann. In Region C sind dagegen die Poren so gross, dass zwar ein merklicher Wärmeübergang zwischen Fest- und Gasphase stattfinden kann, die Flamme sich jedoch ohne weiteres ausbreiten kann. Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe der dimensionslosen Péclet-Zahl *Pe* beschrieben werden. Diese Kennzahl beschreibt das Verhältnis zwischen Wärmeproduktion durch die Reaktionen und Wärmeabfuhr durch die Temperaturleitfähigkeit des Gases. Für sie lässt sich angeben:

$$Pe = \frac{s_l d}{a}$$

wobei s_l die laminare Flammengeschwindigkeit, d die äquivalente Porengrösse und a die Temperaturleitfähigkeit des Gasgemisches ist [2]. Liegt die Péclet-Zahl unter dem kritischen Wert 65, so kann dort keine Verbrennung stattfinden, ein Flammenrückschlag kann nicht erfolgen. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt.

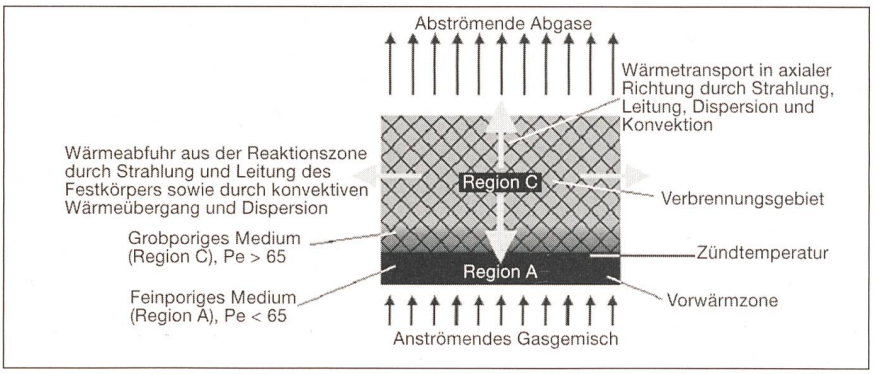

Bild 1 Konzept der Stabilisierung der Verbrennung in Porenbrennern

Die Wärmetransport-Eigenschaften in porösen Medien sind nicht nur aufgrund der Wärmeleitung im Feststoff und der konvektiven Wärmedispersion, sondern auch durch den Strahlungswärmetransport besonders hoch. Dieser ist typischerweise bei keramischen Festkörpern, insbesondere wegen ihrer Struktur, ein Vielfaches höher als bei gasförmigen Abbrandprodukten, bei denen lediglich die Abgaskomponenten H_2O und CO_2 wärmeabstrahlend wirken. Es kann somit ein beträchtlicher Anteil der in der Struktur freigesetzten Wärme als Strahlung ausgekoppelt werden.

In Bild 2 ist ein numerisch berechnetes Temperaturfeld eines 10-kW-Porenbrenners mit integriertem Wärmeübertrager dargestellt. Die Wärmeabfuhr aus der Verbrennungsregion bewirkt eine Vorwärmung des anströmenden Gasgemisches und kann eine Erniedrigung der Maximaltemperatur um einige hundert Kelvin zur Folge haben, was sehr niedrige Stickoxidemissionen bewirkt. Ein Durchmesser von nur 70 mm ist für eine thermische Leistung von 10 kW ausreichend; eine Gesamtlänge des Brenner-Wärmeübertrager-Systems von 250 mm ist für viele Anwendungen typisch.

Die Flammenstabilisierung wird zusätzlich noch über den Zündverzug und zumeist über eine Querschnittserweiterung unterstützt.

Im folgenden werden nun die verschiedenen Anwendungen vorgestellt, bei denen dieses Stabilisierungskonzept und die Wirkungen der Wärmetransport-Eigenschaften zum Tragen kommen.

Porenbrenner für Gashaushaltsheizungen

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung neuer Brenner für den Haushaltbereich ist die Tatsache, dass in Zukunft der Leistungsbedarf für den Heizbetrieb immer stärker sinkt, da neue Gebäude besser isoliert werden, wobei der Energiebedarf zur Warmwassererzeugung allerdings unverändert bleibt. Da herkömmliche Geräte in der Regel aber nur eine geringe Leistungsmodulation erreichen, müssen sie taktend betrieben werden, wenn die geforderte Heizleistung geringer als die untere Leistungsgrenze des Brenners ist. Bild 3 zeigt exemplarisch die Anzahl der Einschalttakte in Abhängigkeit von der Betriebsweise.

Wie daraus hervorgeht, wird durch den Einsatz mässig modulierender Systeme (3:1) die Anzahl der Startvorgänge bereits um einen Faktor 10 gesenkt. Bei einem Modulationsbereich von 10:1, wie es mit dem Porenbrenner möglich ist (Bild 4), muss der Brenner dann täglich nur noch ganz selten takten. Auf diese Weise kann die Häufigkeit der beim Ein- und Ausschalten verursachten Emissionsspitzen noch einmal deutlich vermindert werden, was automatisch zu einer Abnahme der Jahresemissionen und wegen

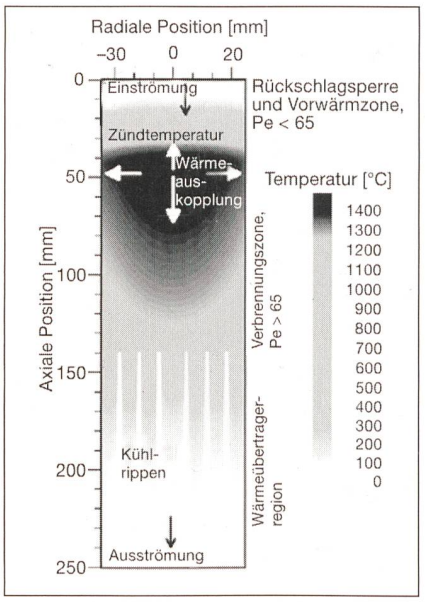

Bild 2 Temperaturfeld eines zylindrischen 10-kW-Porenbrenners mit integriertem Wärmeübertrager

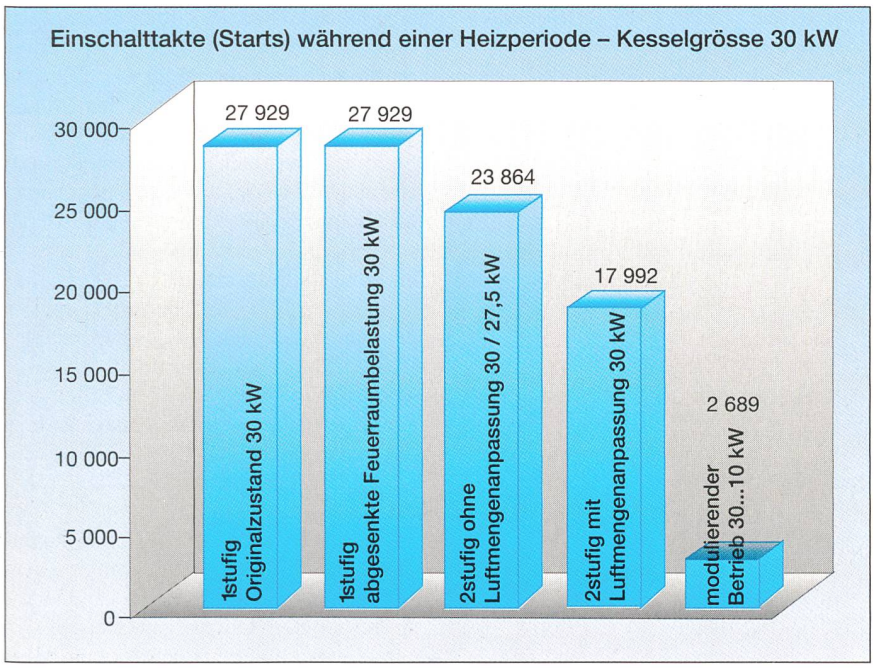

Bild 3 Zusammenhang zwischen Einschalthäufigkeit und Betriebsweise [13]

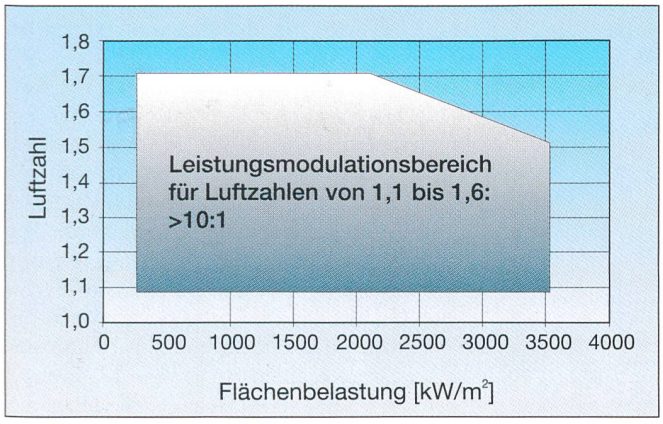

Bild 4 Typisches Modulationskennfeld eines Porenbrenners

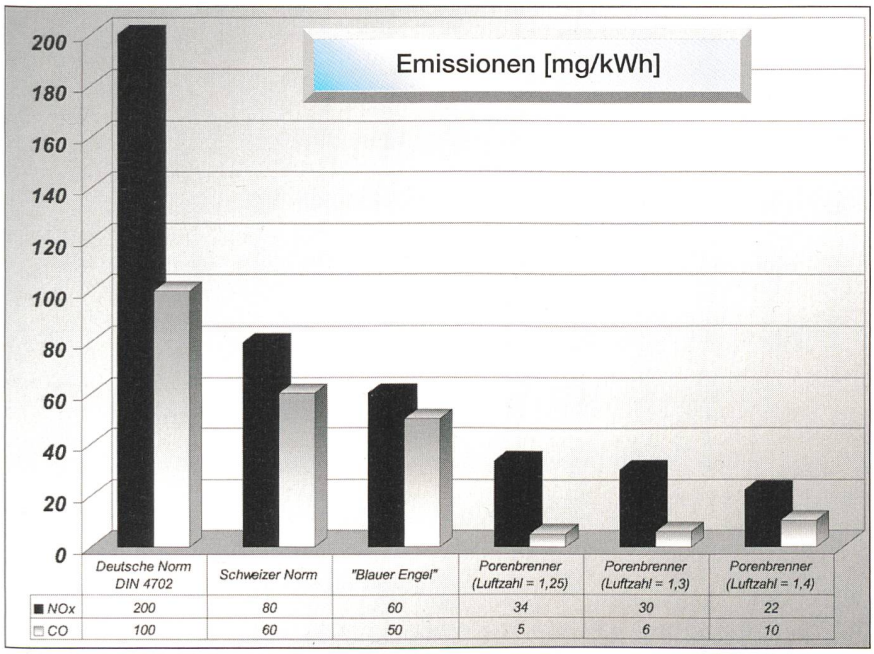

Bild 5 Norm-Emissionen eines Porenbrenner-Prototyps im Vergleich mit Grenzwerten

des geringeren Brennstoffverlustes zu höheren Wirkungsgraden führt.

Die herausragenden Wärmetransport-Eigenschaften des porösen Mediums und die daraus resultierende Homogenisierung und Erniedrigung des Temperaturfeldes im Brennraum führen zu sehr geringen Emissionen während des Verbrennungsprozesses. Bild 5 zeigt exemplarisch die Kohlenmonoxid- und Stickoxid-Norm-Emissionen eines 30-kW-Porenbrenners im Vergleich zu derzeit gültigen Grenzwerten in der Heizungstechnik.

Ausgestattet mit konventionellen Peripheriekomponenten für Haushaltsheizungen konnten bereits hochmodulierende, gebläseunterstützte Gas-Wassererhitzer mit im Vergleich zu handelsüblichen Heizgeräten deutlich reduzierter Baugrösse entwickelt werden (Bild 6).

Porenbrenner für Ölheizungen

Im Gegensatz zu Brennern für Gasheizungen gibt es derzeit keine hochmodulierenden ölbefeuerten Heizungssysteme mit minimalen Leistungen unterhalb etwa 7 kW. Die Ursachen hierfür liegen zum einen im Problem der Ölaufbereitung begründet. Im Leistungsbereich unterhalb 7 kW lässt sich mit konventionellen Druckzerstäuber-Rücklaufdüsen keine für einen «Blaubrenner-Betrieb» hinreichende Zerstäubungsqualität mehr erzielen. Andere, meist erheblich aufwendigere Wege der Ölaufbereitung müssen deshalb beschritten werden. Hinzu kommt, dass die strömungstechnische Stabilisierung der freien Verbrennung der Modulierbarkeit enge Grenzen setzt. Des weiteren erfordert hohe Modulierbarkeit die Anwendung der Brennwerttechnik, sollen nicht inakzeptabel hohe Abgasverluste in Kauf genommen werden. Brennwerttechnik bedeutet aber bei der Verbrennung von Heizöl, dass eine sichere, praktikable und kostengünstige Lösung für die Entschwefelung des anfallenden sauren Kondensats gefunden werden muss.

Durch die Anwendung der Porenbrennertechnik ist es gelungen, auch für die Verbrennung von Öl hoch modulierbare Heizgeräte kleiner Leistungen, etwa für den Einsatz in Hausheizungen oder als Zusatzheizungen im Kfz-Bereich, zu realisieren. Grundlage der entwickelten Konzepte ist die Verbrennung eines vorgemischten Öldampf-Luft-Gemisches in einer porösen Matrix eines Porenkörpers geeigneter Struktur und Materialeigenschaften, wobei für die Aufbereitung des Öldampf-Luft-Gemischs verschiedene Wege beschritten werden können

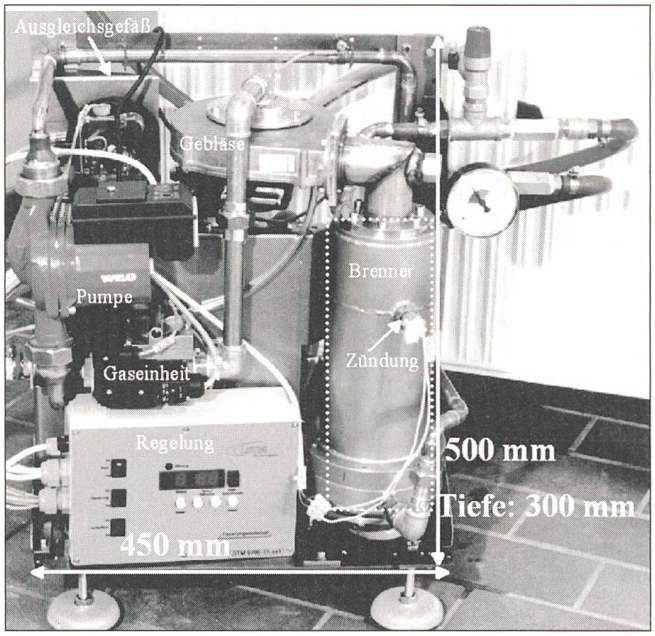

Bild 6 Modulierender, gebläseunterstützter Porenbrenner (10 kW)

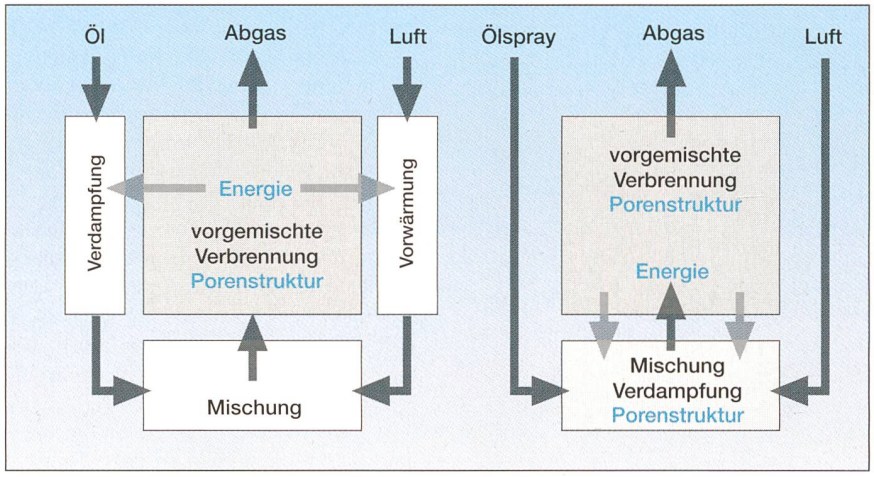

Bild 7 Konzepte für vorgemischte Verbrennung flüssiger Brennstoffe im Porenkörper

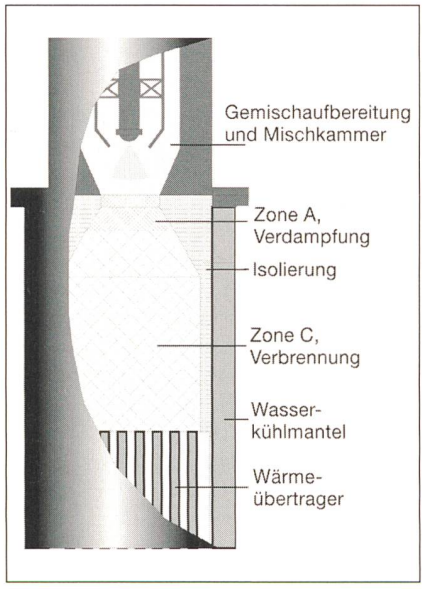

Bild 8 Prinzipieller Aufbau des Ölporenbrenners

(Bild 7). Gemeinsam ist allen Konzepten, dass die zur Verdampfung des flüssigen Brennstoffs erforderliche Energie vom Verbrennungssystem geliefert wird. Der wesentliche Unterschied der verschiedenen Ölporenbrennerkonzepte besteht darin, dass das Öl entweder in der ersten Schicht des Porenkörpers verdampft wird oder bereits zuvor eine Verdampfung des Öls erfolgt. Aufgrund der hohen inneren Oberfläche der porösen Struktur und der intensiven Wärme- und Stoffübertragung zwischen fester und gasförmiger bzw. flüssiger Phase ist eine effektive und schnelle Ölverdampfung und eine gute Gasvermischung möglich, so dass ein homogenes, zündfähiges Gemisch aus dieser Zone austreten kann.

Bei den in Bild 7 dargestellten Konzepten wird der Brenner während der Startphase bei kleiner Leistung durch eine in der Mischeinrichtung stabilisierte freie Verbrennung auf die Betriebstemperatur des Porenbrennraums gebracht. Dies ist erforderlich, da andernfalls inakzeptabel hohe Emissionen während der Startphase auftreten. Ist die Porenstruktur ausreichend warm, wird die Verbrennung durch kurzes Unterbrechen der Brennstoffzufuhr in den Porenbrennraum verlagert und dort neu stabilisiert. Diese Aufheizphase ist in erster Linie abhängig von der Wärmekapazität der zu erwärmenden Porenstruktur und beansprucht etwa eine Minute. Ein zusätzlicher Vorteil dieses Konzepts ist, dass etwaige Rückstände in der Verdampfer- oder Mischeinheit während der Startphase verbrannt und damit entfernt werden.

Der prinzipielle Aufbau eines Porenbrenners für flüssige Brennstoffe ist in Bild 8 dargestellt. Nach der Durchströmung der feinporigen Zone A, in der unter anderem eine Feinstvermischung bewirkt wird, erfolgt im meist konisch ausgeführten Brennraum die Verbrennung.

Bild 9 zeigt einen nach dem oben beschriebenen Konzept ausgeführten Prototyp mit einem Leistungsbereich von 2 bis 11 kW, der für Haushaltsheizungen geeignet ist. Das Öl wird mittels Druckluft zerstäubt und in einer Mischeinheit mit der Verbrennungsluft gemischt. Verdampfung und Verbrennung erfolgen nach dem oben umrissenen Prinzip jeweils in einem eigenen Abschnitt der Brennraum-Porenstruktur. Die im Porenbrennraum freigesetzte Verbrennungswärme wird über den wassergekühlten Brennraum-Mantel und den im unteren Abschnitt des Heizgeräts angeordneten Kompakt-Wärmeübertrager an das Kühlwasser geleitet.

Die mit diesem Konzept bislang erzielten Emissionswerte sind in Bild 10 dargestellt.

Porenbrenner für Automobilzusatzheizungen

In der Automobilbranche geht der Trend in Richtung mehr Komfort, Lebensdauer und Sicherheit. Heizsysteme gewinnen in diesem Zusammenhang an Bedeutung, insbesondere aufgrund der immer geringeren Abwärmeproduktion moderner Kfz-Motoren. Abgesehen vom Komfortgewinn ergeben sich mit solchen Systemen eis- und beschlagsfreie Fenster sowie eine schnellere Reaktionszeit des Fahrers. Überdies verringern sich der Verschleiss des Motors und dessen Startemissionen beträchtlich. Porenbrenner eignen sich wegen der niedrigen Emissionen und der platzsparenden Bauweise sehr gut für diese Applikation.

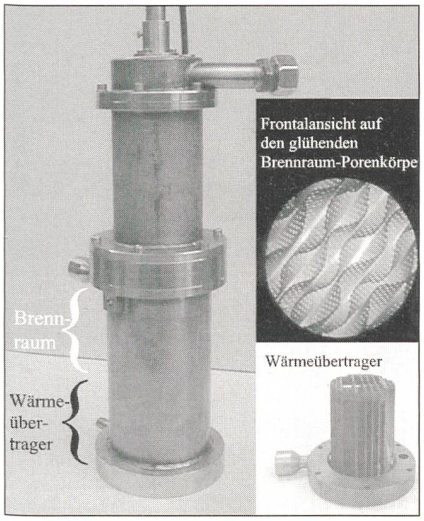

Bild 9 Ölporenbrenner für Hausheizungen

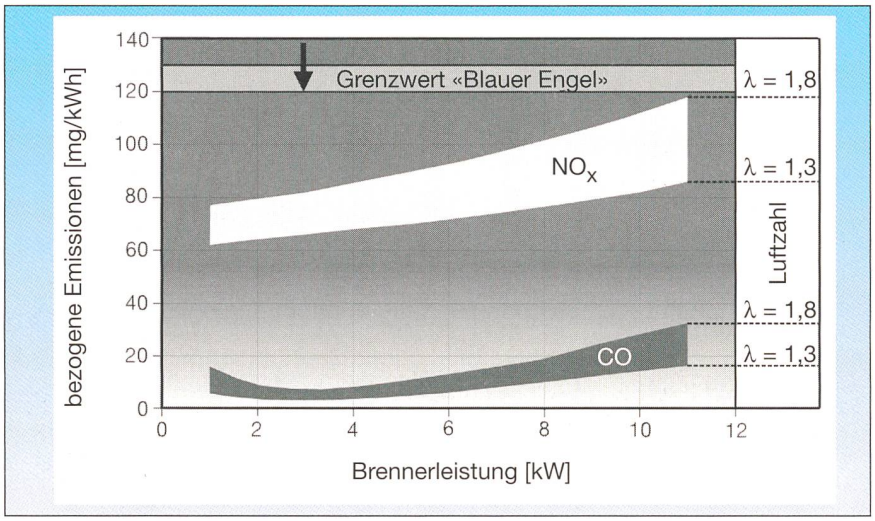

Bild 10 Emissionswerte des Ölbrenner-Prototyps von Bild 9

Bild 11 zeigt den Prototyp eines Porenbrenners für ein Kfz-Zusatzheizgerät (aus Gründen der Übersichtlichkeit ohne Wärmeübertrager). Dieses Gerät wird mit Dieselkraftstoff betrieben und ist für eine Leistung bis 5 kW ausgelegt. Das Konzept verwendet ein Verdampferelement, das mit Wärme aus dem Brennraum aufgeheizt wird, so dass der Kraftstoff unter Luftabschluss verdampft. Anschliessend wird der Dampf in einer Mischkammer mit Luft gemischt und im Porenkörper verbrannt.

Porenbrenner für Dampfkessel

Im Vergleich zur Warmwassererzeugung stellt die Verdampfung und Überhitzung eines Arbeitsmittels, zumeist entgastes und entsalztes Wasser, eine sehr effektive Methode dar, Energie zu transportieren, da der im Phasenübergang verborgene Energieinhalt sehr hoch ist. Hinzu kommt, dass der Wärmeübergang bei Verdampfung und Kondensation so hohe Werte aufweist, dass schon kleine Wärmeübertrager ausreichen.

Dampfkessel sind eine in der Industrie oft eingesetzte Bauart von Dampferzeugern. Sie werden üblicherweise zur Dampferzeugung auf der Basis von Natur-Umlaufsystemen oder zwangsdurchströmten Verdampfersystemen eingesetzt. Hierbei ist der Flammrohrkessel die heute am häufigsten ausgeführte Bauart (Bild 12).

Die schematische Darstellung zeigt bereits, dass die Abmessungen der Dampferzeuger im wesentlichen durch das Flammenrohr bestimmt sind. Die Abbrandlänge wird durch den Einsatz freier Diffusionsflammen oder teilweise vorgemischter Flammen bestimmt. Je turbulenter, das heisst verwirbelter die Strömung ist, desto kürzer kann der Brennraum sein, allerdings steigt damit auch die Geräuschproduktion und der Energieaufwand. Als Brennsysteme werden Brenner für Öl und Gas mit Gebläseunterstützung angewendet.

Die obigen Darstellungen machen deutlich, dass Verkleinerungen von Dampferzeugern nur dadurch möglich werden, dass die Verbrennungstechnik geändert wird. Daher müssen Brenner verwendet werden, deren Ausbrandlänge wesentlich verkürzt ist, so dass auf die langen Flammrohre verzichtet werden kann. Hinzu kommt, dass heutige Emissionsverordnungen Richtwerte von Verbrennungsanlagen verlangen, die nur durch neuartige Verbrennungstechniken eingehalten werden können. Weiter ist es wichtig, dass moderne Dampferzeuger mit Verbrennungsaggregaten ausgestattet werden, die eine hohe Leistungsmodulation erlauben. All diese Anforderungen werden durch die Porenbrennertechnik bereitgestellt. Eliminiert man das Flammrohr durch den Einsatz von Porenbrennern, so lassen sich Dampferzeuger realisieren, wie sie in Bild 13 skizziert sind.

Bei einer Anwendung der Porenbrennertechnik in Dampfkesseln lassen sich Porenbrennereinheiten mit einem Leistungsmodulationsbereich von 20:1 entwickeln. Je nach Leistungsbedarf des Dampferzeugers kann eine unterschiedliche Anzahl von Porenbrennermodulen in den Kessel integriert werden. Dies ist im Bild 13 angedeutet. Durch dieses Vorgehen ist ein «Scale-up» oder «Scale-down» des Dampfkessels auf einfache Weise möglich.

Da sich der Porenbrenner neben einer im Vergleich zu freien, turbulenten Flammen erheblich höheren Flächenbelastung sowie durch eine drastisch verkürzte Ausbrandlänge auszeichnet, kann das Bauvolumen, das bei herkömmlicher Bauart für den vollständigen Abbrand zwingend erforderlich ist, bereits zur Wärmeübertragung genutzt werden. Neben diesem Vorteil bringt eine Umrüstung von Dampferzeugerkessel auf Porenbrenner folgende weitere Vorteile mit sich:

– Durch die hohe Leistungsmodulation des Porenbrenners können die beiden

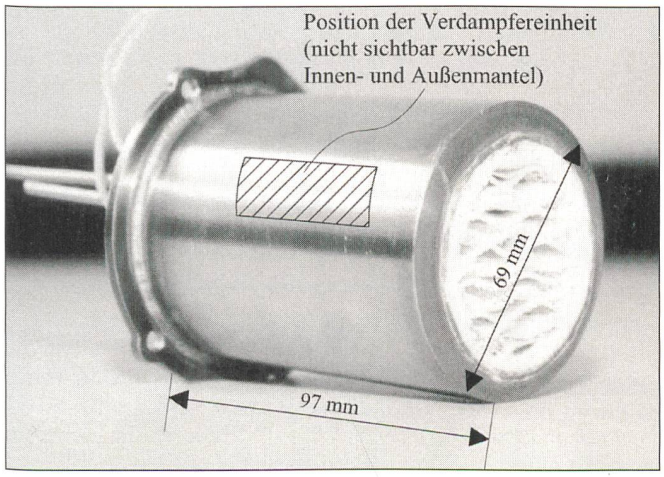

Bild 11 Ölporenbrenner für Kfz-Zusatzheizungen (ohne Wärmeübertrager)

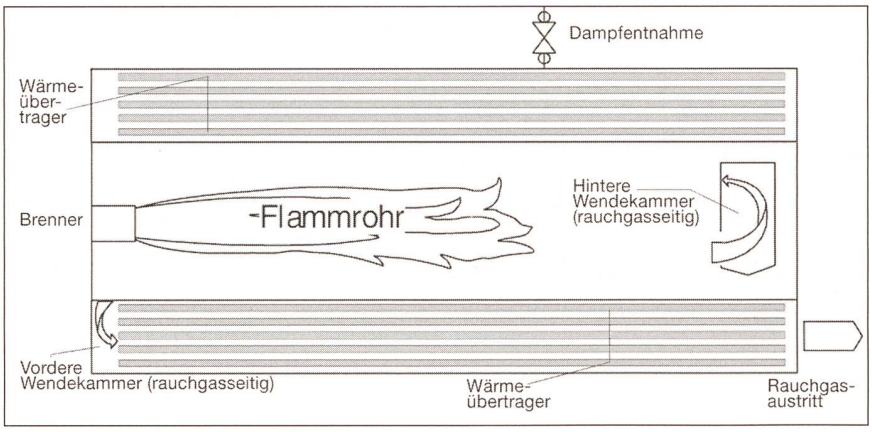

Bild 12 Flammrohrkessel als Dampferzeugereinheit

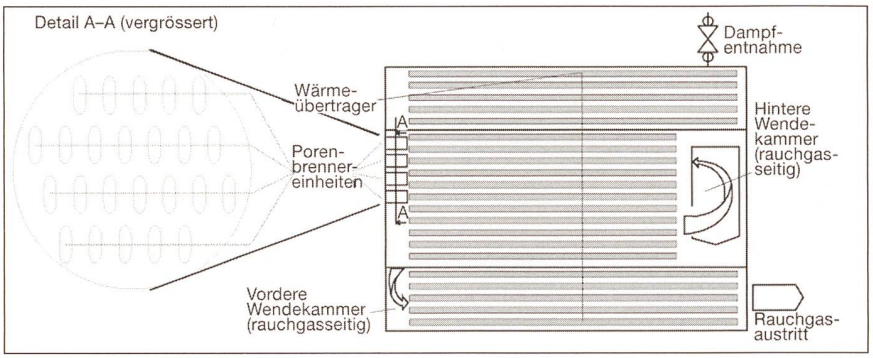

Bild 13 Dampferzeuger auf Basis der Porenbrennertechnik

Teilsysteme Brenner und Dampferzeuger stets optimal aufeinander abgestimmt werden. Das bedeutet zunächst, dass die tatsächliche Brennerleistung exakt an die Wärmeanforderung des Prozesses angepasst werden kann. Darüber hinaus kann das Teilsystem Dampferzeuger konstant am Punkt seines maximalen Wirkungsgrades betrieben werden.

- Ausserdem kann das Gesamtsystem in einem sehr grossen Nettoleistungsbereich mit verringerter Speichereinheit für das Arbeitsmittel betrieben werden. Dies führt zu geringen Totzeiten und einer optimalen Ausnutzung des Dampfkessels.
- Des weiteren weisen Porenbrenner über den gesamten Leistungsbereich sehr geringe Schadstoffemissionen auf. Dies bedeutet, dass unabhängig von der momentanen Lastart des Gesamtsystems auch strengste Schadstoffemissions-Verordnungen ohne Einsatz von Sekundärmassnahmen eingehalten werden.

Porenbrenner für solarthermische Anlagen

Umweltprobleme, ihre wachsende Beachtung und die Ressourcenverknappung führten bereits zu einer Effizienzsteigerung und zu einer starken Verminderung des Schadstoffausstosses, insbesondere bei stromerzeugenden Anlagen. In Zukunft ist jedoch eine noch weitergehende Reduzierung des CO_2-Ausstosses anzustreben und eine Umorientierung zu regenerativen Energien erforderlich. Dabei sind Zwischenschritte nötig, da aus ökonomischer und technischer Sicht kein sofortiger Umstieg von fossilen auf regenerative Energieträger möglich ist. So wird bereits heute zunehmend Solarenergie für Heizzwecke eingesetzt. Die Nutzung zur Stromgewinnung ist jedoch in unseren Breiten durch die Verfügbarkeit der Sonnenstrahlung und deren unzureichende Konstanz begrenzt. Die Photovoltaik ist vorerst noch durch ihre geringen Wirkungsgrade und Lebenserwartungen eingeschränkt.

Eine erfolgversprechende Alternative stellt die Solarthermie dar. Durch Konzentration der Sonnenstrahlung auf das 50- bis mehrtausendfache lassen sich sehr hohe Temperaturen realisieren, die sich für die Stromerzeugung in Gas- oder Dampfturbinen nutzen lassen. Hohe Temperaturen, die für hohe Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung notwendig sind, müssen bei rein solarthermischen Anlagen allerdings mit einer extrem hohen Konzentration der Sonnenstrahlung erkauft werden, was hohe Investitionskosten zur Folge hat. Ferner sind die Einstrahlungsschwankungen von Nachteil, insbesondere deswegen, weil im Gegensatz zur Photovoltaik diffuses Licht praktisch nicht genutzt werden kann.

Mit Hilfe eines Porenbrenners lassen sich diese beiden Nachteile vermeiden. Das Arbeitsmedium braucht solarthermisch nur moderat aufgeheizt zu werden, wodurch nur eine kleine, kostengünstig herstellbare Spiegelfläche notwendig wird. Die nachfolgende Überhitzung des Arbeitsmediums erfolgt in einem Porenbrenner mit fossiler Energie, wobei die Emissionen sehr gering bleiben. Die starke Variation der Sonneneinstrahlung kann durch die schnelle und grosse Modulierbarkeit eines Porenbrenners hervorragend kompensiert werden.

Beispielsweise kann die solare Energie zur Vorwärmung auf 400 °C genutzt werden und im Anschluss daran eine Mischung mit dem Abgas des fossil befeuerten Porenbrenners erfolgen (Bild 14), das heisst rund zwei Drittel der Energie sind solaren und ein Drittel fossilen Ursprungs. Ohne Sonneneinstrahlung wird ausschliesslich mit fossiler Energie gearbeitet.

Porenbrenner für Gasturbinenanlagen

Um in Kraftwerken niedrige Schadstoffemissionen bei der elektrischen Energieerzeugung durch Gasturbinen zu erreichen, ist man bestrebt, mit Vormischverbrennung zu arbeiten. Diese ist bei den derzeit üblichen Gasturbinenbrennern jedoch durch einen kleinen Regelbereich hinsichtlich des Luftverhältnisses gekennzeichnet. Bei Reduzierung der Brennstoffzufuhr auf etwa die Hälfte ist die vorgemischte Verbrennung aufgrund des weiterhin hohen Luftdurchsatzes nicht mehr stabil. Deshalb werden in der Praxis zwei Methoden angewendet. Einerseits kann man im Teillastbetrieb auf Diffusionsbetrieb umstellen, was jedoch mit einem erhöhten Schadstoffausstoss verbunden ist; andererseits besteht die Möglichkeit, einzelne Brennergruppen auszuschalten und nur mit Luft zu durchströmen, während die noch im Betrieb befindlichen Brenner bei konstanter Luftzahl weiter betrieben werden. Letztere Vorgehensweise erfordert eine aufwendige Regelung und hat den prinzipiellen Nachteil, dass die Turbinenbelastung inhomogen ist, wodurch die Lebensdauer der Turbinenschaufeln negativ beeinflusst wird.

Mit Hilfe von Porenbrennern kann der Betriebsbereich mit Vormischver-

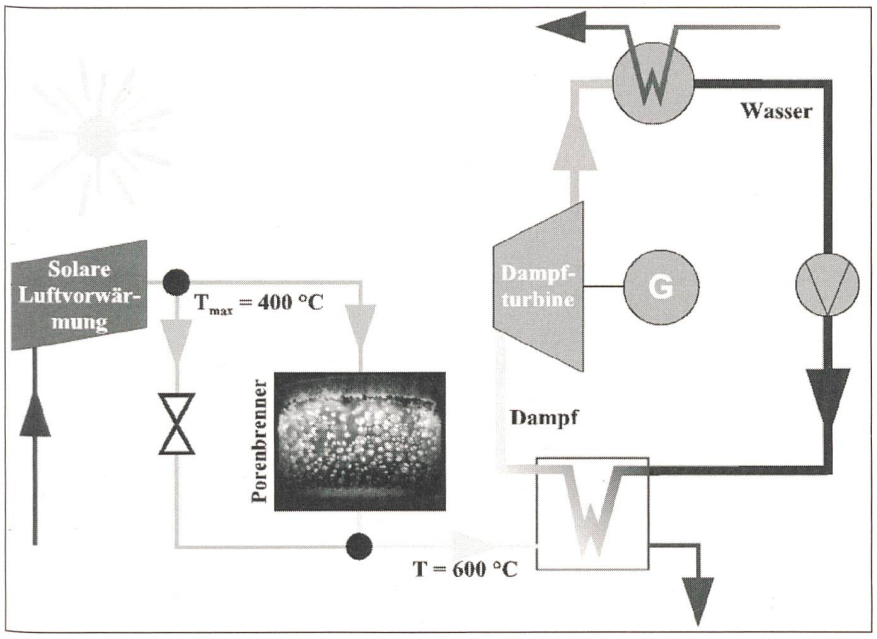

Bild 14 Kombination von Solarenergie und Porenbrennertechnik in einem Dampfprozess

brennung extrem verbreitert werden. Aufgrund der hohen Flammengeschwindigkeit in porösen Medien wird ein deutlicher Stabilitätszuwachs hinsichtlich der Luftzahldynamik erreicht. So erhöht sich zum Beispiel bei einer Flächenbelastung von 400 kW/m^2 die Luftzahl auf 2,5. Bei einer Luftvorwärmung ist eine weitere Verbesserung zu verzeichnen. Beispielsweise ist mit einer Luftvorwärmung auf 400 °C eine Luftzahl von 5 möglich, ohne dass die Verbrennung im Porenkörper instabil wird.

Um die Vorteile der Porenbrennertechnik bei den tatsächlichen Gasturbinenbedingungen zu quantifizieren, werden gegenwärtig die adiabaten Verbrennungsvorgänge in inerten porösen Medien unter Druck und mit Luftvorwärmung untersucht.

Strahlungsbrenner auf Basis der Porenbrennertechnik

Viele Prozesse der thermischen Verfahrenstechnik erfordern aus wirtschaftlichen Gründen eine möglichst schnelle Erwärmung des Wärmegutes. Dabei werden eine ausgeglichene Temperaturverteilung und eine kurze Ansprechzeit gefordert. Diesem Anforderungsprofil werden Wärmestrahler in hervorragender Weise gerecht. Bisher hatten sich für diese Anwendungen elektrisch betriebene Strahlungsheizelemente durchgesetzt. Wegen des begrenzten Wirkungsgrades bei der Stromerzeugung ist der auf den Primärenergieaufwand bezogene Wirkungsgrad derartiger Heizelemente mit etwa 0,4 relativ niedrig. Vorteile der Heizelemente sind die hohe Leistungsdichte sowie die Sauberkeit am Ort der Nutzung.

Eine Alternative dazu stellen Strahlungsbrenner dar, die eine direkte Nutzung von fossilen Energieträgern (hauptsächlich Gas) ermöglichen. Bei den bisher in der Technik eingesetzten vollvorgemischten Strahlungsbrennern (Bild 15) findet die Verbrennung in der Nähe einer festen Oberfläche statt. Durch die nah aufsitzende Flamme entzieht die feste Oberfläche der Flamme in hohem Masse Wärme. Feststoff-Oberflächen weisen wesentlich bessere Strahlungseigenschaften auf als Brenngase oder Flammen, so dass die Wärme effektiv abgestrahlt wird. Auf diese Weise sinkt die Flammentemperatur, wodurch die NO_x-Bildung sehr stark reduziert wird. Dieses Konzept ist für Brennersysteme mit kleiner Leistung heute Stand der Technik. Damit allerdings die Flamme in der Nähe der Oberfläche bleibt, ist die Ausströmgeschwindigkeit und damit die Flächenbelastung nach oben sehr begrenzt.

Strahlrohre (Bild 16), die mit konventionellen Vormischbrennern beheizt werden, werden in der industriellen Praxis auch eingesetzt, wenn die Ofenatmosphäre nicht mit den Verbrennungsabgasen vermischt werden soll.

Porenbrenner als Strahlungsbrenner bieten aufgrund des andersartigen Funktionsprinzips wesentliche Vorteile gegenüber Oberflächen-Strahlungsbrennern, Strahlwänden oder Strahlrohren. Porenbrenner verbrennen das Gemisch mit einer wesentlich höheren thermischen Flächenbelastung. Ausserdem können Strahlungsbrenner auf Basis der Porenbrennertechnik ohne Stabilisierungsprobleme arbeiten. Die am Übergang zwischen einem feinporigen und einem grobporigen Medium stabilisierte Verbrennung bedarf keiner ausgeklügelten Regelung, und eine Vormischverbrennung mit Luftvorwärmung ist bis zum Erreichen der Zündtemperatur handhabbar.

Der direkte Einsatz von Primärenergien wie Gas in Strahlungsbrennern führt jedoch nicht unbedingt zu wesentlich höheren Wirkungsgraden als bei den elektrischen Strahlern, da die Heizleistung durch Strahlung übertragen werden soll und die Abgastemperatur je nach Prozesstemperatur relativ hoch sein kann. Aus diesem Grund sind sekundäre Massnahmen wie Rekuperation und Nutzung der Restwärme für andere Zwecke erforderlich, um den Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen. Eine Alternative bietet die Nutzung von Sauerstoffbrennern, bei denen die adiabate Flammentemperatur wesentlich höher als die Prozesstemperatur liegt und damit der Wirkungsgrad bis über 0,7 gehalten werden kann, ohne sekundäre Massnahmen in Betracht zu ziehen. Da sich durch Anwendung der Porenbrennertechnik die Brennraumtemperaturen gut kontrollieren lassen und abgesenkt werden können, so dass Hochtemperatur-Keramikmaterialien standhalten können, sind sogar Sauerstoff-Strahlungsbrenner möglich, in denen die Strahlungsenergie

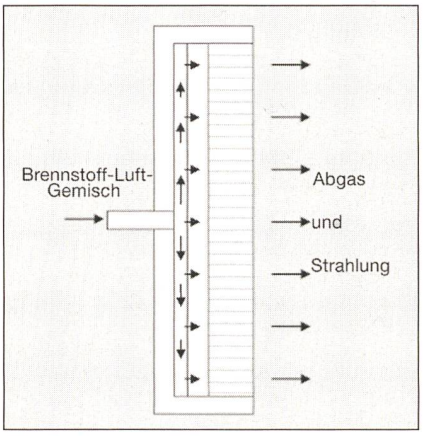

Bild 15 Strahlwand [14]

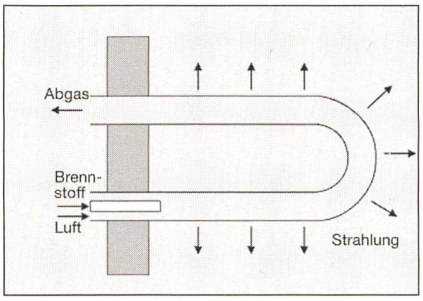

Bild 16 Strahlungsrohr

anders als bei herkömmlichen Sauerstoffbrennern nicht über dicke platzraubende Gasschichten übertragen wird, sondern über die viel effizientere Festkörperstrahlung.

Zusammenfassung

Die Porenbrennertechnik basiert auf der Verbrennung in den Poren eines porösen Mediums, wodurch der Wärmetransport positiv beeinflusst wird. Die wichtigsten hieraus resultierenden Vorteile des Verbrennungsprinzips sind hohe Modulierbarkeit, Kompaktheit und geringe Schadstoffemissionen. Anwendungen von Gas- und Ölporenbrennern für Kraftwerke, Haushaltsheizungen und für den industriellen Bereich sind dank neuer, temperaturbeständiger Werkstoffe möglich geworden.

***

Die Autoren danken der Europäischen Kommission DG XII der Europäischen Union für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Projekte JOE 3-CT 95-0019 und Copernicus EBRIC 15-CT 96-0720 sowie der Bayerischen Forschungsstiftung und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über die Porenbrennertechnik. Dank gilt auch den Firmen Windhager Zentralheizung, Siemens-KWU, Sulzer Chemtech und Messer Griesheim für deren Unterstützung und Zusammenarbeit.

Literatur

[1] Energy Information Administration (EIA): International Energy Outlook 1997. http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo97/appa1.html.

[2] *V. S. Babkin, A. A. Korzhavin, V. A. Bunev:* Propagation of Premixed Explosion Flames in Porous Media. Combustion and Flame 87(1991), p. 182–190.

[3] *Y. Yoshuzawa, K. Sasaki, R. Echigo:* Analytical study of the structure of radiation controlled flame. Int. J. Heat Mass Transfer 31(1988)2, p. 311–319.

[4] *K. Hanamura, R. Echigo, S. A. Zhdanok:* Superadiabatic combustion in a porous medium. Int. J. Heat Mass Transfer 36(1993)13, p. 3201–3209.

[5] *J. D. Stilger, R. J. Martin, M. R. Holst:* Method and apparatus for recuperative heating of reactants in a reaction matrix. USA-Patent, Nr. 5,320,518, 14.06.1994.

[6] *R. D. Bell, W. C. Gardiner, J. R. Howell, R. D. Matthews, S. P. Nichols:* Apparatus and Method for Combustion within Porous Matrix Elements. USA-Patent, Nr. 5,160,254, 03.11.1992.

[7] *R. D. Bell, W. C. Gardiner, J. R. Howell, M. M. Koeroghlian, R. D. Matthews, S. P. Nichols:* Apparatus and Method for Combustion within Porous Matrix Elements. USA-Patent, Nr. 5,141,432, 25.08.1992.

[8] *V. V. Martynenko, S. I. Shabunia:* Development of Two-dimensional One-Temperature Model of Combustion within Porous Bodies with Variable Cross-Section in Steady-State Regime. Modern Problems of Combustion and its Applications, II. International School Seminar, Minsk, Weissrussland, 1997, p. 11.

[9] *D. Trimis:* Verbrennungsvorgänge in porösen inerten Medien. BEV Heft 95.5, Esytec Energie- und Systemtechnik GmbH, Erlangen, 1995.

[10] *F. Durst, K. Pickenäcker, D. Trimis:* Porenbrenner – kompakte, emissionsarme Brenner mit grossem Leistungsmodulationsbereich. gwf-Gas/Erdgas, 138(1997) 2, S. 116–123.

[11] *F. Durst, A. Kesting, S. Mössbauer, K. Pickenäcker, O. Pickenäcker, D. Trimis:* Der Porenbrenner – Konzept, Technik und Anwendungsgebiete. Gaswärme International 46(1997)6, S. 300–307.

[12] *F. Durst, M. Keppler, D. Trimis, M. Weclas:* Neue Verbrennungstechnik: Der Porenbrenner in der Ölheizung. Wärmetechnik Versorgungstechnik, 43(1998)1, S. 28–32.

[13] *J. Haep:* Intelligente Verbrennungsregelung an Gas-Vormischbrennern. Sanitär- und Heizungstechnik 62(1997)3, S. 206–211.

[14] *R. Günther, H. Wilhelmi:* Verbrennung und Feuerungen. Berlin: Springer-Verlag 1974.

Les brûleurs à corps poreux: techniques et applications

L'article ci-dessus décrit le principe et les caractéristiques de la technique de combustion en corps poreux et il présente de différentes possibilités d'utilisation de cette technologie. Comportement et propriétés de cette technique, développée à l'institut de mécanique des fluides d'Erlangen, se différencient de manière fondamentale des techniques de combustion habituelles. Ainsi, le mélange gaz combustible–air ne brûle plus en flamme libre, la combustion a lieu dans les vides d'un corps poreux. Les brûleurs à corps poreux ne dépendant pas de catalyseurs, ne demandent donc pas de prévoir des problèmes de stabilité à long terme. Ils se distinguent des brûleurs à surface radiante par un processus de combustion se stabilisant et se terminant intégralement au sein de la structure poreuse. Les excellentes propriétés de transfert thermique de la structure poreuse génèrent quelques avantages uniques. Ainsi, la puissance est réglable progressivement dans une très large plage; une dynamique de 20:1 représente déjà l'état de la technique actuelle pour les brûleurs à corps poreux. De plus, les températures sont maintenues à un si faible niveau que la formation d'oxydes d'azote est fort entravée. Ensuite, le champ de température très homogène engendre de faibles taux de pollution. Les émissions d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone peuvent être maintenues en dessous de 10 ppm sur toute la plage de puissance. Par ailleurs, les vitesses de combustion atteintes sont si élevées que les brûleurs à corps poreux peuvent être construits très compacts; par exemple, la charge de surface maximale est supérieure d'un facteur 10 à celle des brûleurs utilisés dans le secteur domestique. Ces propriétés avantageuses font que les brûleurs à corps poreux se prêtent particulièrement bien à toutes les applications où l'on brûle des combustibles gazeux ou liquides, par exemple aux installations de turbines à gaz, aux centrales thermosolaires, aux chauffages domestiques, aux chauffages à l'arrêt et additionnels pour automobiles, aux fours de fusion de verre à gaz ou à la production de vapeur industrielle.