

Heißgasreinigung

H. Leibold, R. Mai, B. Zimmerlin, ITC

Einführung und Bezug zur Verbrennung

In Müllverbrennungsanlagen werden meist heterogene Gemische verschiedenster Abfälle verbrannt, die sich in Heizwert, Stüchtigkeit und Form unterscheiden. Sie zünden und verbrennen unterschiedlich schnell, wobei sie zunächst entgasen, verdampfen oder in kleinere Partikel aufgebrochen werden. Wie Kohle oder Holz weisen Abfälle neben dem brennbaren Anteil einen nicht brennbaren Ascheanteil auf. Im Idealfall verbrennen die organischen Bestandteile vollständig zu CO_2 und Wasserdampf, während die Asche in die Schlacke gelangt. Tatsächlich fallen jedoch Verbrennungsprodukte wie z.B. Ruß und ein Teil der Asche in Form feinsten Partikel an. Diese können Gasreaktionen katalysieren sowie in der heißen Verbrennungszone sintern, schmelzen oder verdampfen, bevor sie mit dem Rauchgas ausgetragen werden.

Bedingt durch die Inhomogenität der Reststoffe variieren Temperaturen, Gas- und Partikelkonzentrationen im Feuerraum in weiten Grenzen. Auch treten bei der Vermischung von Brenngasen und Verbrennungsluft große zeitliche und räumliche Schwankungen auf. So entstehen Gasstrahlen, die zusätzlich durch die geometrische Gestaltung des Feuerraumes sowie prozesstechnische Parameter wie die Luftführung beeinflusst werden. Eine wesentliche Rolle spielt auch, ob Brandgut und Gas den Feuerraum gleich- bzw. gegensinnig, oder nach Art einer Mittelstromfeuer-

ung durchlaufen. Bei einer Rostfeuerung variieren daher die Staub- bzw. Partikelgehalte im Feuerraum zwischen einigen hundert mg/m^3 und bis zu ca. $10 \text{ g}/\text{m}^3$ in alten oder hochbelasteten Anlagen [1, 2].

Abgesehen von einem inert durchlaufenden Anteil können Partikel sowohl Ursache als auch Ergebnis einer unvollständigen oder inhomogenen Verbrennung sein. Abhängig von der Temperaturzone, der stofflichen Zusammensetzung sowie dem Durchmesser der Partikel fällt auch deren Wirkung unterschiedlich aus. Große Staubteilchen bewirken bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten Erosionserscheinungen an den Feuerfestmaterialien und insbesondere an den Wärmeübertragungsflächen im Kessel. Feine Partikel führen zu festen bis verschlackten Ablagerungen, die kurzfristig die Wärmenutzung beeinträchtigen und langfristig wesentlich an der Hochtemperatur-Korrosion beteiligt sind [3-5]. In Kessel und Rauchgasreinigung beeinflussen sie massiv die Bildung gasförmiger Schadstoffe [6-8]. Schließlich verursacht die Reihenschaltung mehrerer Reinigungsstufen nach der Wärmenutzung hohe Kosten.

Aus diesen Gründen werden in der thermischen Abfallbehandlung aussichtsreiche Ansätze der Heißgasfiltration verfolgt. Sie zielen darauf ab, korrosionsrelevante Stoffe unmittelbar hinter der Feuerung abzuscheiden, um metallische und keramische Komponenten von Feuerraum und Kessel zu schützen [3, 4]. Weiterhin können durch eine Partikelabscheidung bei Temperaturen

oberhalb $600 \text{ }^\circ\text{C}$, Kohlenstoffgehalt und reaktive Oberfläche des Staubes wirksam abgesenkt und damit die Neubildung von Schadstoffen günstig beeinflusst werden [1, 5, 9]. Die Homogenisierung des Rauchgases und die Kombination von Partikelabscheidung mit der Schadgasreinigung sind weitere Einsatzoptionen von Heißgasfiltern [10-12].

Stäube

Die im Verbrennungsprozess entstehenden Stäube lassen sich nach ihrem Aussehen wie folgt einteilen [13]:

- (a) erstarrte Schmelztröpfchen
- (b) Kristallite
- (c) polykristalline Aggregate
- (d) amorphe Partikel
- (e) unvollständig verbrannte Partikel

Mehr als die Hälfte besteht aus großen unregelmäßig geformten Partikeln, die einzeln oder als Agglomerate vorliegen. Wichtig sind glasartige Kügelchen und Kristallite, da sie Durchmesser bis weit in den Submikronbereich aufweisen und deshalb über eine große spezifische Oberfläche verfügen. Dem Anteil der unvollständig verbrannten Partikel kommt im Zusammenhang mit der Bildung von Dioxinen und Furanen eine besondere Bedeutung zu [9].

Wegen der großen Zahl unterschiedlicher Eingangsstoffe und möglicher Wechselwirkungen während der Verbrennung können Flugstäube zahlreiche Verbindungen enthalten, die häufig in Form von Gemischen vorliegen.

Die typische Elementzusammensetzung solcher Flugstäube zeigt Tab. 1, wobei Sulfate und Chloride einen wesentlichen Einfluss auf die Schadstoffbildung und auf Korrosionsprozesse haben.

Eine weitere wichtige, von der chemischen Zusammensetzung abhängige Eigenschaft des Flugstaubes ist seine Erweichungstemperatur. Sie kennzeichnet den Übergang von einem filtertechnisch unkritischen, leicht abzureinigenden Staub zu einem kritischen, klebrigen bzw. backenden Staub, der extrem hohe Anforderungen an Filtermaterial und Abreinigungstechnik stellt. Dies verdeutlicht die Bildfolge (Abb. 1) von Staubschichten aus TAMARA, die durch die Wechselwirkung von Flugstaub und Rauchgas bei Temperaturen zwischen 200 °C und 550 °C auf der Oberfläche von kornkeramischen Filterkerzen gebildet wurden. Für 200 °C ist eine hochporöse Staubschicht aus ku-

gelförmigen Submikron-Partikeln zu erkennen, die sich problemlos von der Filterkeramik abreinigen lässt. Der Übergang auf 300 °C führte zu einer drastischen Änderung im Aufbau der Staubschicht. Die kornkeramische Filtermembran war mit einer schmelzflüssigen Phase überzogen, mit darin

eingelagerten morphologisch sehr unterschiedlichen Partikeln. Diese Vorgänge setzten sich bei einer Filtrationstemperatur von 400 °C fort, wobei lokal Anreicherungen an verschiedenen, kristallinen Phasen auftraten. Eine aufgeschmolzene Phase lag allerdings unter diesen Bedingungen nicht

Elementzusammensetzung von Flugstaub		
SiO ₂	%	28,10
CaO	%	26,70
Al ₂ O ₃	%	14,00
SO ₃	%	7,25
FE ₂ O ₃	%	5,20
K ₂ O	%	3,72
Cl	%	2,51
ZnO	%	2,42
PO ₃	%	2,36
Cr ₂ O ₃	%	0,64
Sonstige	%	7,10

Tab. 1: Typische Elementzusammensetzung von Flugstäuben [5]

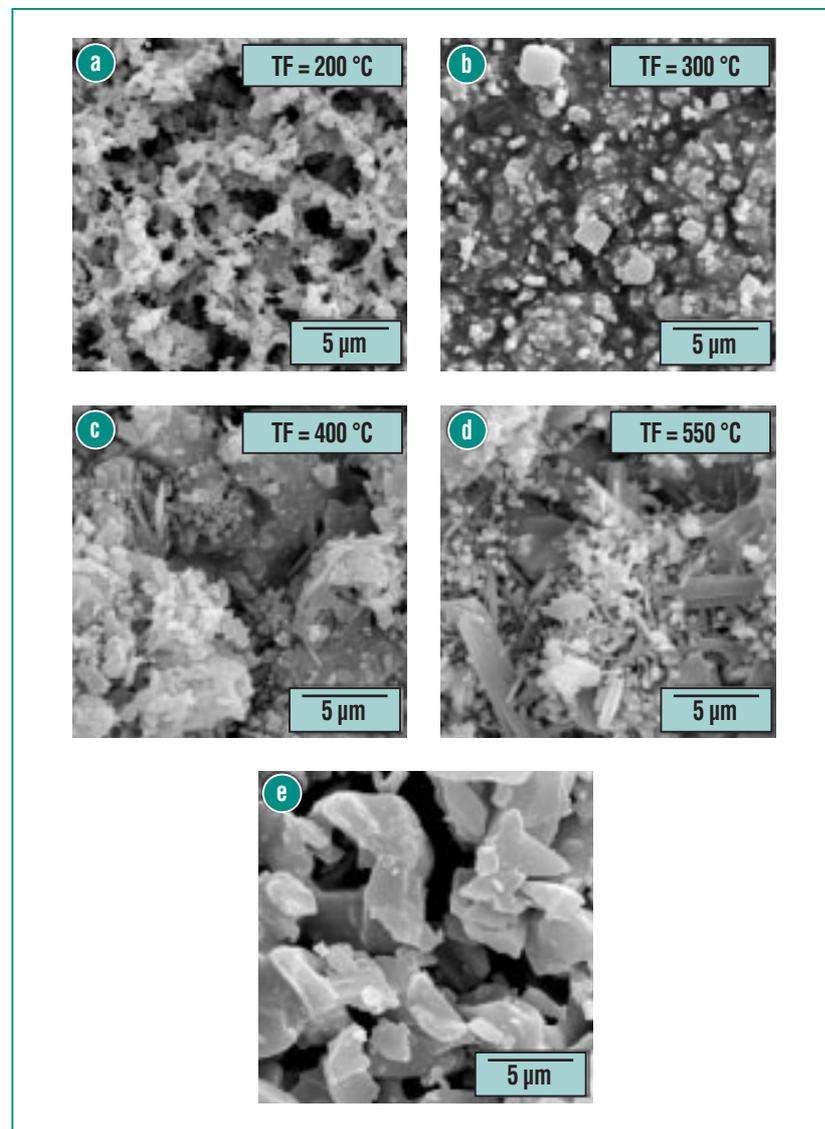


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Flugstaubpartikeln oberhalb Feuerraum TAMARA, abgeschieden bei Rauchgastemperaturen zwischen 200 °C und 550 °C auf kornkeramischen Filterkerzen (a, b, c, d). Zum Vergleich ist eine neuwertige Oberfläche der verwendeten Filterkerzen gegenüber gestellt (e).

mehr vor. Bei 550 °C bestanden die Anlagerungen überwiegend aus nadel- und plattenförmigen Kristalliten sowie aus kugelförmigen Partikeln und kleinsten Agglomeraten. Da die Größe der Kristallite deutlich über dem Durchmesser der Flugstaubpartikel lag, muss davon ausgegangen werden, dass diese Kristallite direkt auf der Filteroberfläche gebildet wurden.

Die thermischen Eigenschaften eines so komplexen Stoff- und Phasengemisches wie Flugstaub sind nur experimentell zugänglich. Eine Methode, die im ITC-TAB verfolgt wird, basiert auf Differential Scanning Calorimetry (DSC). DSC erfasst sehr empfindlich Enthalpieänderungen auf Grund von Phasenumwandlungen und chemischen Reaktionen. Beim einmaligen Aufheizen werden sowohl irreversible Prozesse

wie die Abgabe von gebundenem Wasser, Modifikationsänderungen und das Abdampfen flüchtiger Komponenten als auch reversible Vorgänge wie Schmelzen oder Modifikationsänderungen erfasst. Beim erneuten Aufheizen bzw. beim Abkühlen ergeben sich i.d.R. nur noch reversible Änderungen. Hierdurch können kritische Temperaturbereiche, die durch das Schmelzen einzelner Phasen bedingt sind, auch bei einem so komplexen Stoffsystem wie Flugstaub eingegrenzt werden. Abb. 2 zeigt beispielhaft eine DSC-Analyse für einen Kesselstaub aus TAMARA. In Kombination mit Thermogravimetrie und Gasanalyse ist eine genauere Aufschlüsselung der thermisch induzierten Prozesse im Flugstaub möglich. Diese Analysen sind Gegenstand aktueller Arbeiten.

Aus den bisher bekannten Zusammenhängen lässt sich ablei-

ten, dass eine Heißgasreinigung an einer thermischen Abfallverbrennung, unabhängig von der Verbrennungsführung, in jedem Fall oberhalb einer Mindesttemperatur von ca. 500 °C betrieben werden sollte [8]. Für die Wahl der maximalen Temperatur müssen zusätzliche Gesichtspunkte wie Erweichungstemperatur der Flugstäube, Prozessdampfparameter, Flüchtigkeit von Alkali- und Schwermetallhalogeniden, Bildungs-/Zerstörungsbedingungen für organische Schadgase und die Rückwirkung auf die Vermischung von Brenngasen und Verbrennungsluft berücksichtigt werden. Wegen der korrosiven Rauchgase kommen für Abfallverbrennungsanlagen nur keramische Filtersysteme in Frage.

Keramische Filtersysteme

Keramische Filtersysteme finden bereits in diversen Industriezweigen Anwendung, z.B. zur Katalysatorrückgewinnung in Crack-Prozessen, sowie vereinzelt auch bei der thermischen Abfallbehandlung [1, 14, 15]. So werden in den Feststoffverbrennungsanlagen der HDB bereits seit den 70-er Jahren keramische Filterkerzen eingesetzt. Forciert wird die Entwicklung vor allem aber durch die modernen, druckbetriebenen Kohleverstromungsverfahren mit kombiniertem Gas- und Dampfturbinen-Kreislauf (IGCC und PFBC)¹⁾, mit den größten derzeit betriebenen Heißgasfiltern (vgl. Abb. 3 und 4). Hier muss

¹⁾Integrated Gasification Combined Cycle, Druckvergasung bis 40 bar und 1000 °C; Pressurized Fluidized Bed Combustion, Druckwirbelschichtverbrennung bis 16 bar und 850 °C

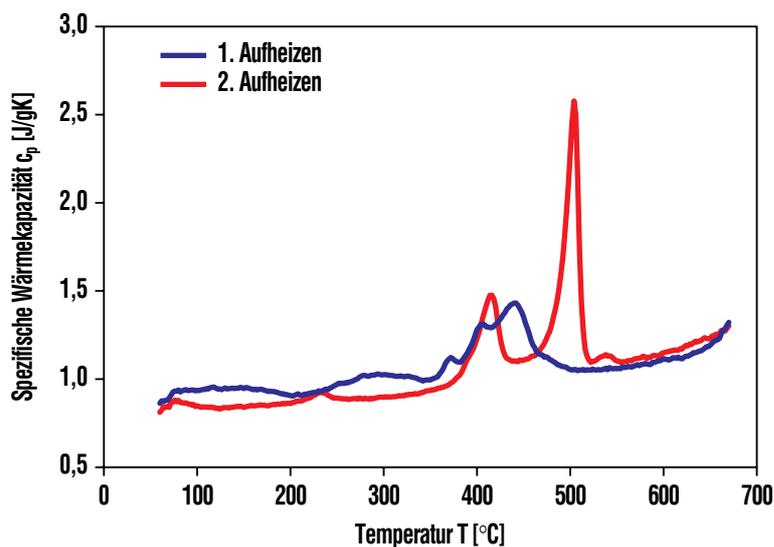


Abb. 2: Differential Scanning Calorimetry an einem Kesselstaub aus TAMARA. Die Peaks im Verlauf der spezifischen Wärmekapazität werden hervorgerufen durch Vorgänge wie Schmelzen, Verdampfen sowie chemische Umwandlungsprozesse. Anhand der Peaks beim zweiten Aufheizen können die möglichen Erweichungsbereiche des Staubes eingegrenzt werden.

zum Schutz von leistungsstarken Gasturbinen mit hohem Wirkungsgrad das Prozessgas vorher gefiltert werden [15]. Grobe Partikeln oberhalb von 5 µm müssen vollständig abgetrennt werden, da sie die Gasturbine durch Erosion gefährden. Feinere Partikeln können auf der Gasturbine einen Belag bilden, der zu Korrosion führt. Gasturbinenhersteller fordern daher Reingastaubgehalte von weniger als 5 mg/Nm³. Dies können heutige Filtersysteme bereits garantieren. Emissionsauflagen wie in der 17. BImSchV (30 mg/Nm³ Staubgehalt) erfüllen sie da ganz nebenbei. Die hohen Abscheideleistungen müssen die Filtersysteme allerdings für 10 000 Betriebsstunden, wie in der Kraftwerkstechnik auch für andere Anlagenkomponenten üblich, aufrecht erhalten. Diese Langzeitstabilität kann aus vielerlei Gründen nicht garantiert

werden. Daher werden keramische Heißgasfilter in den Kraftwerken derzeit nur bei moderaten Prozessbedingungen eingesetzt.

In hängender Anordnung werden die Filterkerzen von außen nach innen durchströmt. Mit fortschreitender Zeit baut sich auf der Kerzenoberfläche ein Staubkuchen auf, der den Durchströmungswiderstand erhöht. Deshalb müssen die Filterelemente zyklisch abgereinigt werden. Für die Abreinigung werden die einzelnen Filterkerzen im großtechnischen Maßstab zu Reihen oder Clustern zusammengefasst. Durch einen Druckimpuls wird die Strömungsrichtung für eine Kerzengruppe ohne Unterbrechung des Filtrationsbetriebes kurzzeitig umgekehrt und dadurch der Staubkuchen abgeworfen. Die übrigen Kerzengruppen filtern zwischenzeitlich den gesamten Volu-



Abb. 3: Heißgasfilter für die Kohledruckvergasungsanlage in Buggenum, NL, bei der Montage²⁾. Höhe 25 m, Durchmesser 4,2 m, Gewicht 90 t, Durchsatz ca. 25.000 Bm³/h bei 240 °C und 22 bar entspricht 300.000 Nm³/h.

menstrom. Das aus der konventionellen Entstaubungstechnik adaptierte Jet-Pulse-Abreinigerungsverfahren ist jedoch für die starren, dickwandigen Filterkerzen nur bedingt geeignet. Eine Weiterentwicklung des Jet-Pulse-

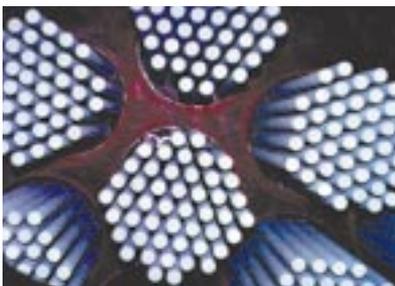


Abb. 4: Blick von unten auf die Filterelementanordnung im Heißgasfilter Buggenum²⁾. Insgesamt 864 Filterelemente, ausgeführt als einseitig geschlossene Filterkerzen, sind in 18 Gruppen zu je 48 Stück zusammengefasst. Die starren, selbsttragenden Filterelemente haben standardmäßig einen Durchmesser von 60 mm und eine Länge von 1,5 m.

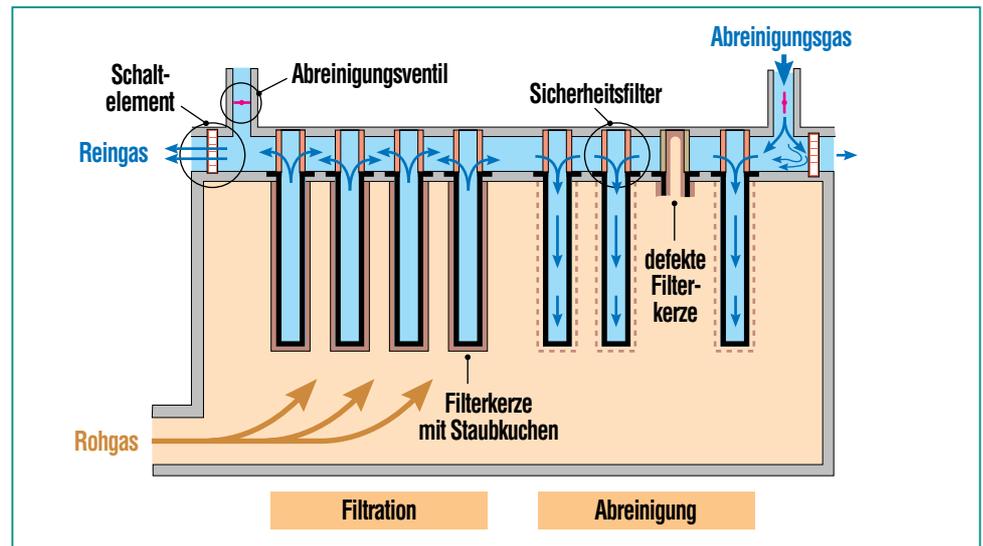


Abb. 5: Coupled-Pressure-Pulse-Abreinigerungsverfahren. Durch das im Forschungszentrum entwickelte Abreinigerungsverfahren für Filterkerzen können Hochtemperatur-Prozesse selbst beim Bruch einer Filterkerze ohne Funktionsbeeinträchtigung weiterbetrieben werden.

²⁾ Bilder mit freundlicher Genehmigung der Firma USF SCHUMACHER, Crailsheim

Abreinigungsverfahrens ist das Coupled-Pressure-Pulse-(CPP)-Abreinigungsverfahren (vgl. Abb. 5). Dieses speziell auf die Filterkerzen hin optimierte Abreinigungsverfahren wird derzeit im Forschungszentrum im Rahmen eines TTM-Projektes zur Marktreife gebracht [16, 17].

Der Überdruck in der Filterkerze für die Ablösung des Filterkuchens wird hierbei nicht über einen Freistrahle, sondern durch direkte Kopplung der Abreinigungseinheit mit einer oder mehreren Filterkerzen aufgebracht. Hierdurch wird nur ein geringer Vordruck von 1-2 bar für das Abreinigungsgas benötigt. Der Vorteil des geringen Vordrucks wird insbesondere bei druckaufgeladenen Verfahren deutlich, da beim Jet-Pulse-Verfahren etwa das 2-fache des Systemdrucks als Vordruck nötig wird. Weiterhin kann die Abreinigungsintensität für problematische Stäube (z.B. klebrige Stäube aus der thermischen Abfallbehandlung) gesteigert werden. Zwischen die Abreinigungseinrichtung und den Filterkerzen kann ein Sicherheits-

filter integriert werden. Dieses wird bei den oben erwähnten Kohleverstromungsverfahren zum Schutz der Gasturbine zwingend gefordert. Zur Bereitstellung des kurzzeitigen hohen Massenstroms an Abreinigungsgas müssen die Abreinigungsleitungen und -ventile entsprechend groß dimensioniert sein (Nennweite 80-250 mm) und innerhalb von 200 ms öffnen und schließen. Die Freischaltung des Abreinigungsgasstroms bzw. des Reingasstroms im Filtrationsfall ermöglicht ein strömungsdynamisches Schaltelement. Dieses passiv wirkende Kanalsystem ist so ausgelegt, dass es bei der Filtration nur einen geringen Druckverlust aufweist, bei der Abreinigung jedoch den Verlust an Abreinigungsgas begrenzt.

Eine weitere entscheidende Rolle für die Abreinigung spielt der Druckaufbau. Um den Staubkuchen vollständig abzureinigen, sollte der Druckaufbau am Staubkuchen möglichst schnell erfolgen. Dies ist bei den beiden bisher genannten Verfahren (Jet-Pulse und CPP) aufgrund der

starken Dämpfung des Drucksignals beim Durchgang durch das Filtermedium jedoch nicht der Fall [18] (vgl. Abb. 6 links).

Für Hochtemperaturanwendungen und starre Filtermaterialien weitaus besser geeignet ist dagegen ein im ITC-TAB neu entwickeltes Abreinigungsverfahren – die rohgasseitige Druckabsenkung [19, 20] (vgl. Abb. 6 rechts). Dabei wird Wasser unter hohem Druck kurzzeitig auf der Rohgasseite des Filterbehälters sehr fein zerstäubt [21]. Bei Prozesstemperaturen bis 850 °C verdampft das eingesprühte Wasser innerhalb weniger Millisekunden [22]. Die zur Verdampfung notwendige Energie wird dabei vollständig dem heißen Prozessgas entnommen. Dies führt zur schlagartigen Abkühlung des Gases, verbunden mit einer Druckabsenkung. Sie überkompensiert die Druckerhöhung durch den zusätzlichen Wasserdampfanteil im Prozessgas. Dieses Abreinigungsverfahren erlaubt neben der Abreinigung von durchströmten Filterelementen auch die Abreinigung von nicht durchströmbaren Flä-

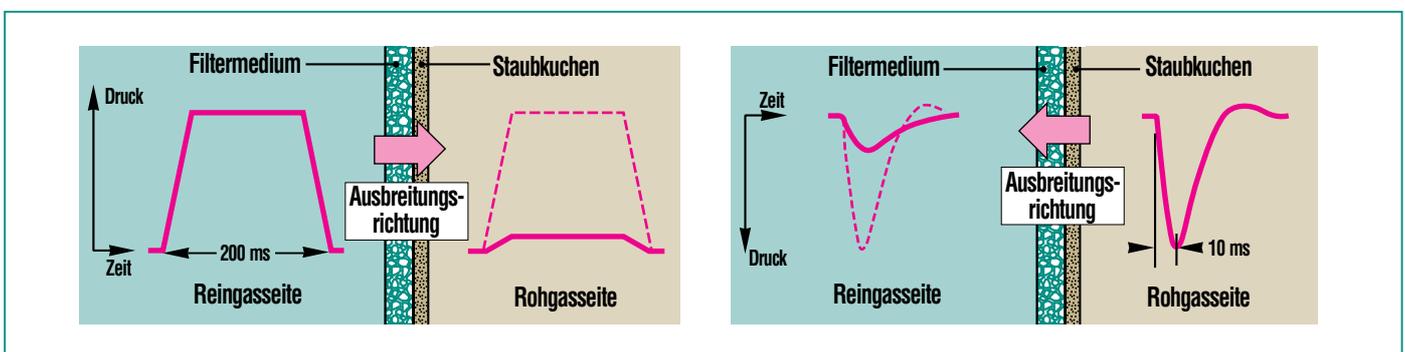


Abb. 6: Schematischer Vergleich der Drucksignale beim Jet-Pulse- und CPP-Verfahren (links) und bei der Abreinigung durch rohgasseitige Druckabsenkung (rechts). Die Ausbreitungsrichtung der Druckstörung ist bei den beiden Abreinigungsverfahren entgegengesetzt. Im Gegensatz zum stark gedämpften Druckimpuls beim Jet-Pulse-Verfahren läuft bei der neuentwickelten rohgasseitigen Druckabsenkung eine Expansionswelle ungedämpft in den Staubkuchen.

chen wie z.B. staubbelegte Wärmetauscherrohre im Abhitzekeessel oder die Feuerraumauskleidung selbst.

Derzeit werden Keramikfilter überwiegend in Form von Filterkerzen ausgeführt (vgl. Abb. 4). Sie werden als selbsttragende Strukturen aus keramischen Fasergeweben, direkt aus Fasersuspensionen oder als Kornkeramik hergestellt. Gängige Faserkerzen (Aluminosilikatfasern) weisen zwar sehr gute Abscheideeigenschaften auf, sind aber mechanisch sehr empfindlich. Robuster sind die, durch Stampfen oder Extrudieren gefertigten, kornkeramischen Filterkerzen auf Basis von aluminosilikatisch gebundenen SiC-Körnern. Die eigentliche Filtrationsschicht besteht aus einer dünnen Korn- oder faserkeramischen Beschichtung von 50-200 µm, die auf einer dickwandigen Tragstruktur aufgebracht wird. Zunehmende Bedeutung gewinnen andere Fil-

terformen. Wabenkörper (Abb. 7a) werden z.B. als Dieselrußfilter in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Die Enden der Strömungskanäle sind beidseitig abwechselnd verschlossen und die porösen Kanalwände dienen als Filterschicht. Im Vergleich zu den Filterkerzen ermöglichen sie größere Filterflächen bei geringem Bauvolumen. In die gleiche Richtung zielen Crossflow-Elemente (Abb. 7b), bei denen staubhaltiges und gereinigtes Gas im rechten Winkel, über Kreuz, geführt werden. Problematisch ist für beide Filterformen bisher die Abreinigung der staubbelegten Kanäle, auch werden nur geringe Staubkonzentrationen beherrscht.

Filterkeramik

Im Gegensatz zu sogenannten Speicherfiltern, bei denen die Staubabscheidung überwiegend im Filtermedium erfolgt (Tiefenfiltration), wird bei den regenerierba-

ren Filtermedien eine zyklische, oberflächennahe Staubschichtbildung angestrebt (Oberflächenfiltration). Als Materialien für keramische Filtermedien werden die auch im Feuerfestbereich verwendeten Ausgangsstoffe Aluminosilikat, Cordierit, SiC, Al₂O₃, Spinell, ZrO₂ etc. eingesetzt. Die Einsatztemperaturen gebräuchlicher Filterkerzen reichen derzeit bis ca. 850 °C, während die angestrebten Anwendungstemperaturen bis zu ca. 1400 °C betragen. Werkstofftechnisch aktuelle Problemfelder dieser Kerzen sind die Erweichung der Bindermaterialien oberhalb ca. 800 °C, die Korrosion durch Alkalien, Wasserdampf, etc. sowie die Oxidation von SiC-Keramiken. Den drastischen Einfluss der Betriebsbedingungen zeigen Untersuchungen an kornkeramischen SiC-Filterkerzen, bei denen als Folge von betriebsbedingter Korrosion und mechanischer Beanspruchung die Festigkeit gegenüber dem neuwertigen Zustand um bis zu 40 % abnahm.

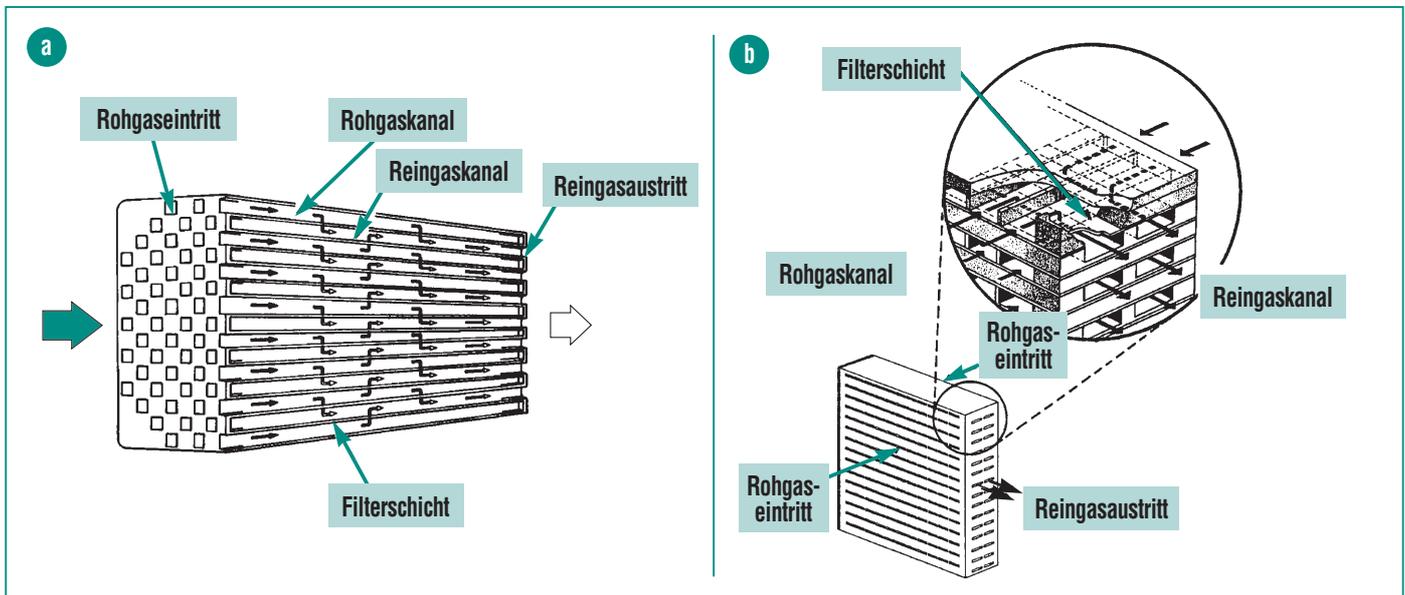


Abb. 7: Schematische Darstellung Wabenkörper (a) und Crossflow-Element (b).

Darüber hinaus resultieren werkstofftechnische Problemfelder aus dem Filterbetrieb. Wegen ihrer Unempfindlichkeit gegen Thermowechsel- und Thermoschockbeanspruchung bei der Abreinigung werden derzeit fast ausschließlich die vergleichsweise teuren SiC-Filterkeramiken eingesetzt. Die für viele Anwendungen günstigeren oxidkeramischen Materialien werden nicht zuletzt durch die im ITC-TAB entwickelten Abreinigungsverfahren und der damit verbundenen reduzierten thermischen Beanspruchung interessant.

Nicht nur werkstofftechnisch, sondern auch im strukturellen Aufbau der Filter besteht ein immenser Optimierungsbedarf. Die gebräuchlichen dickwandigen Filterkerzen weisen bei typischen Porositäten um 60 % einen unverhältnismäßig hohen Druckverlust auf. Der damit verbundene hohe Energiebedarf, verschärft

durch die vergleichsweise geringe Filterfläche je Kerze, begrenzt Anwendungen bei Umgebungsdruck bisher auf kleine Anlagen. Problematisch ist auch die Verstopfungsempfindlichkeit der keramischen Filterwerkstoffe gegenüber Feinstäuben, die typisch sind für Hochtemperaturprozesse. Ein weiteres Problem stellen klebrige bzw. backende – d.h. schwer abreinigbare – Stäube dar.

Durch die gegenläufige Wirkung der entscheidenden Strukturparameter Porosität, Porengröße, Korngröße bzw. Faserdurchmesser und Wandstärke auf die filter- und materialtechnischen Zielgrößen, sind die gestellten Anforderungen mit einem einheitlichen Material nicht zu erfüllen. So nehmen z.B. mit abnehmender Wandstärke Permeabilität und Abreinigbarkeit zu. Mit abnehmender Wandstärke wird allerdings auch der Abscheidegrad re-

duziert und die Bruchanfälligkeit erhöht. Der Ausweg besteht im mehrschichtigen Gefügeaufbau mit einer Funktionstrennung der einzelnen Schichten. Zur Rohgasseite hin wird eine hinsichtlich Abscheidegrad und Abreinigbarkeit optimierte Filtermembran aufgebracht. Aufgabe dieser Membran ist die oberflächennahe Abscheidung der Staubpartikeln, bei minimalen Haftkräften zwischen Membran und Staub. Die reingasseitige Schicht hat im wesentlichen tragende Funktion und sollte bei ausreichender Festigkeit möglichst wenig zum Gesamtdruckverlust der Keramik beitragen. Diese Stützstruktur muss deshalb eine möglichst grobe und offenporige Keramik sein. Von einschneidender Bedeutung für das Betriebsverhalten der Filterkeramik ist ein homogenes Gefüge, d.h. gleichförmig dicke Schichten und vor allem eine enge Poren- und Korngrößenverteilung. So können lokale Inhomogenitäten zu einer drastischen Verschlechterung im Betriebsverhalten führen und damit die Filterkeramik unbrauchbar machen. Den Einfluss von Gefügestruktur und Membrandicke auf das Filtrationsverhalten keramischer Filtermembranen zeigt die Abb. 8. Untersucht wurden unterschiedlich dicke Membranen aus einer konventionellen Mullit-Keramik (Korngröße 30 μm , breite Porengrößenverteilung), sowie der Prototyp einer feinkörnigeren Keramikmembran mit besonders enger Porengrößenverteilung. Ermittelt wurde die Druckverlustzunahme als Funktion der Beladung mit BaSO₄-Feinstaub.

Angestrebt wird eine mit der Beladung linear ansteigende Druck-

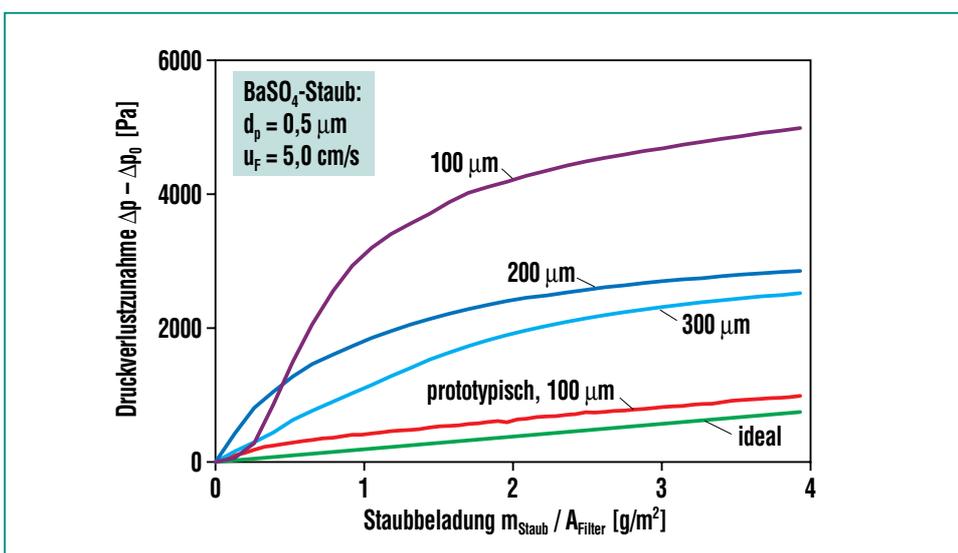


Abb. 8: Druckverlustzunahme als Funktion der Staubbiladung für konventionelle Filtermembranen mit unterschiedlicher Dicke, sowie für einen feinkörnigeren Membran-Prototyp. Zum Vergleich ist die Druckverlustzunahme allein durch die anwachsende Staubschichtdicke dargestellt (ideale Oberflächenfiltration).

verlustzunahme. Die gemessenen Druckverlustzunahmen weichen jedoch vom linearen Verlauf für ideale Oberflächenfiltration mehr oder weniger stark ab, weil die Feinstaubabscheidung erst nach und nach aus der Keramikstruktur an die Oberfläche verlagert wird. Besonders auf dünnen Membranen aus konventioneller Keramik wird erst bei sehr hoher Feinstaubbelastung ein geschlossener Staubkuchen gebildet, der in der Folge die Filtration übernimmt. Schließlich nähern sich alle Kurvensteigungen mit zunehmender Beladung asymptotisch etwa der Steigung für ideale Oberflächenfiltration. Bei dem Prototyp der Keramikmembran mit enger Porengrößenverteilung wird die Feinstaubabscheidung sehr viel rascher aus der Keramikstruktur an die Oberfläche verlagert, so dass die Druckverlustzunahme dem idealen Verlauf sehr nahe kommt. Sie zeigt bereits bei geringer Membrandicke eine drastisch reduzierte Verstopfungsanfälligkeit.

Insbesondere bei klebrigen und backenden Stäuben bieten nanoskalige Membranen einen erfolgversprechenden Ansatz, um das Filtrationsverhalten keramischer Hochtemperatur-Filterwerkstoffe entscheidend zu verbessern [23, 24] (Abb. 9). Bei Temperaturen bis 600 °C konnte für derart beschichtete Filter eine Abreinigung von klebrigen Stäuben erzielt werden, was mit den bisher untersuchten kommerziellen Filtern nicht möglich war. Einen vielversprechenden Ansatz für Tragstrukturen stellen Schaumkeramiken dar. Gerade mit Blick auf Anwendungen bei Umgebungs-

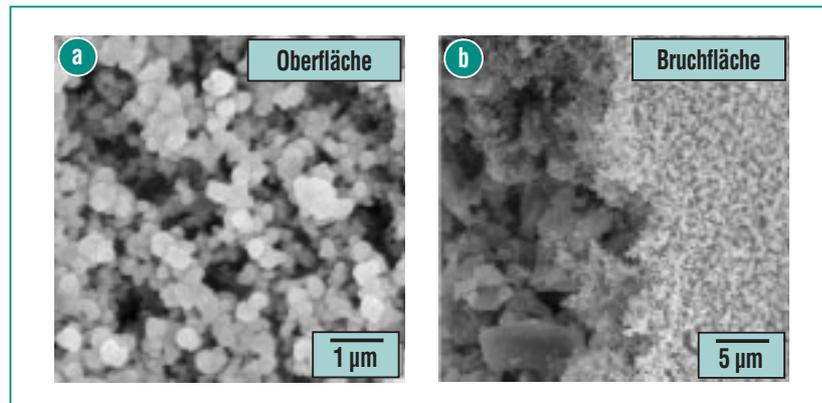


Abb. 9: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von der Oberfläche (a) und der Bruchfläche (b) einer hochporösen Filtermembran aus Al_2O_3 -Nanopartikeln, aufgebracht auf eine Standardfilterkeramik (SiC-Tragstruktur mit Mullit-Beschichtung).

druck lassen diese wie Kunststoffschäume aufgebauten Keramiken eine erhebliche Reduzierung des Druckverlustes zu.

Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Verbrennung von Abfällen entstehen aus dem Brandgut sowie im Verlauf des Verbrennungsprozesses erhebliche Partikelmengen, die mit dem Rauchgas ausgetragen werden. Besondere Kennzeichen dieser Stäube sind niedrige Erweichungstemperaturen, ein hoher Feinpartikelanteil und, in Verbindung mit den Rauchgasen, ein hohes Korrosionspotential. Die stark schwankende und uneinheitliche Abfallzusammensetzung führt zusätzlich zu einer großen Variation in diesen Eigenschaften.

Keramische Filtersysteme bieten die Möglichkeit, den Gesamtprozess zu vereinfachen und den energetischen Wirkungsgrad zu erhöhen. Verfügbare Filterkeramiken weisen derzeit noch unwirtschaftlich hohe Druckverluste

für die bei Umgebungsdruck betriebenen Verbrennungsverfahren auf. Sie benötigen darüber hinaus in großtechnischen Anwendungen zuviel Platz. Auch ist die geforderte Langzeitstabilität wegen Verstopfungsneigung, nicht angepassten Reinigungsverfahren und Bruchempfindlichkeit noch nicht gewährleistet.

Zwei im Forschungszentrum laufende Entwicklungen zur Regenerierung von keramischen Filtersystemen führen zu einer effizienteren Abreinigung von Keramikfiltern im laufenden Betrieb, da sie speziell auf den Hochtemperaturbetrieb starrer Filtermedien abgestimmt sind. Eines davon, das CPP – Abreinigungsverfahren, befindet sich kurz vor der Markteinführung. Neu entwickelte nanostrukturierte Filtermembranen sind speziell auf die Filtration von klebrigen und backenden Stäuben ausgerichtet, die in thermischen Abfallbehandlungsanlagen bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen auftreten. Begonnen wurde mit Entwicklungsarbeiten zu neuartigen

Stützstrukturen auf Basis sogenannter Schaumkeramiken. Durch einen speziellen Ferti-gungsprozess können platzspa-rende Bauformen hoher Festig-keit realisiert werden, die infolge der Schaumstruktur sehr niedrige Durchströmungswiderstände auf-weisen. Die Filter können so kon-ziptiert werden, dass auch hohe Staubgehalte bewältigt werden.

Die genannten Entwicklungen er-möglichen Heißgasreinigungssy-teme, die die hohe chemische Resistenz und die Temperaturbe-ständigkeit keramischer Materia-lien vorteilhaft mit den prozess-technischen Anforderungen der thermischen Abfallbehandlung verknüpfen. Durch keramikge-rechte Bauformen und Abreini-gungsverfahren lassen sich kera-miktypische Begrenzungen infol-

ge Sprödigkeit, Bruchanfälligkeit und Empfindlichkeit gegenüber schnellem Temperaturwechsel auffangen.

Gelingt es, die dargestellten Pro-bleme zu wirtschaftlich vertretba-ren Kosten zu lösen, können die prozesstechnischen Vorteile ei-ner Heißgasreinigungsstufe, die unmittelbar hinter der Feuerung betrieben wird, genutzt werden.

Literatur

- [1] P.J. Hayes, R. Schulz, H. Leibold, B. Zimmerlin, B. O'Reilly, P. Hahn, *TRAWMAR Workshop Proceedings, September 1998, Rhodos, GR.*
- [2] N.F. Glen, J.H. Howarth, *Publication C118/88 National Engineering Laboratory, Glasgow 1988.*
- [3] J. Neumann, H.R. Kautz, *VGB Kraftwerkstechnik 77 (1997).*
- [4] M. Born, P. Seifert, *VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996).*
- [5] A.J. Chandler et al., *Elsevier Studies in Environmental Science 67, Elsevier, 1997, ISBN 0-444-82563-0.*
- [6] W. Spiegel, *Thermische Abfallverwertung 1999, VGB-Fachtagung, 2.9.1999 Essen und 16.9.1999 Rosenheim.*
- [7] H. Hunsinger, S. Kreis, H. Seifert, *in: R. Hites (Hrsg.), DIOXIN '97, 17th Internat. Symp. on Chlorinated Dioxins, PCB and Related Compounds, Indianapolis, Ind., USA, 25.-29. August 1997.*
- [8] H. Vogg, L. Stieglitz, *Chemosphere 15 (1986).*
- [9] L. Birnbaum, U. Richers, *Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 5639, Dezember 1995.*
- [10] W. Peukert, *in: E. Schmidt et al. (Hrsg.), High Temperature Gas Cleaning, IMVM, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, (1996).*
- [11] K. Hübner, *in: E. Schmidt et al. (Hrsg.), High Temperature Gas Cleaning, IMVM, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, (1996).*
- [12] B. A. Kwetkus, W. Egli, *in: E. Schmidt et al. (Hrsg.), High Temperature Gas Cleaning, IMVM, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, (1996).*
- [13] *Waste Programme; Waste Analysis, Sampling, Testing and Evaluation Program; Phase 1 Final draft Report prepared for Environment Canada, US EPA and the International Lead Zinc Research Organisation; unveröffentlicht, 1993.*
- [14] H. Leibold, R. Mai, B. Zimmerlin, W. Bundschuh, M. Fronhöfer, K. Schulz, A. Walch, *Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6055, Juni 1998.*
- [15] S. Mitchell, *IEACR/95, IEA Coal Research, London, UK, Juli 1997.*
- [16] R. Mai, D. Kreft, H. Leibold, H. Seifert, K. Schulz, *in: A. Dittler et al. (Hrsg.), High Temperature Gas Cleaning II, IMVM, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, (1999).*
- [17] R. Mai, D. Kreft, H. Leibold, H. Seifert, K. Schulz, *Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6319, Dezember 1999.*
- [18] R. Mai, M. Fronhöfer, H. Leibold, *in: E. Schmidt et al. (Hrsg.), High Temperature Gas Cleaning, 18.-20. September 1996, IMVM, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, (1996).*
- [19] R. Mai, H. Leibold, M. Fronhöfer, *in: F. Ebert (Hrsg.), PARTEC 98, 4th European Symposium Separation of Particles from Gases, Preprints, Nürnberg Messe GmbH, Nürnberg, 1998.*
- [20] H. Leibold, R. Mai, *Symposium on High-Temperature Particulate Cleanup for Advanced Coal-Based Power Systems, Proceedings, 20.-23. April 1998, Birmingham, Alabama, USA.*
- [21] DE 197 10 431 C2
- [22] G. Schuch, *Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), (1978).*
- [23] P.J. Hayes, H. Leibold, B. Zimmerlin, R. Schulz, A. Zagorski, P. Hahn, *TRAWMAR Workshop Proceedings, September 1999, San Sebastian, Spanien.*
- [24] B. Zimmerlin, H. Leibold, H. Seifert, *in: A. Dittler et al. (Hrsg.), High Temperature Gas Cleaning II, IMVM, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, (1999).*