

Hetragon™: Chemisch beständige Wärmeübertragerelemente für Gas-Gas-Wärmetauscher in FGD- und SCR-/SNCR-Anwendungen

Michael Schlipf und Katja Widmann

Abstract

Hetragon™: Chemically resistant heat transfer polygons for gas-gas heaters in FGD and SCR/SNCR applications

Environmental regulations require modern coal- and oil-fired power plants to be equipped with flue gas desulphurisation (FGD) and denitrification (DENOX) to ensure cleaning of the flue gases. Gas-gas heaters (GGH) are employed in FGD and DENOX plants in order to remove sulphur and nitrogen emissions under temperature-optimised conditions.

Inside FGD plants, fly ash and a condensation mix of aqueous SO_x , HF and HCl are forming a highly corrosive mix, which attacks metals, especially when the system falls below its dew point. If the GGHs are of the Ljungström*-type, corrosion can be avoided if the heat exchanger is equipped with fully corrosion-resistant heat transfer polygons in those regions where the system is operated below the dew point T_D of the chemical mix.

GGHs installed in SCR/SNCR modules have two functions: transfer the heat to enhance the gas inlet temperature to the required level and to collect the ammoniumbisulphate (ABS) deposit within the air preheater. ABS is the product of the denitrogenation process.

The innovative heater elements made from PTFE may be the material of choice to make this cleaning operation more easy in the future. Temperature peaks of more than 200 °C in the hot phase of the exchanger revolution cannot damage these new elements as its service temperature ranges up to 260 °C even when aggressive chemicals are exposed to it in the long term. A new PTFE compound with enhanced heat transfer capacity is presently introduced to the market.

Einleitung

Moderne Kraftwerke mit Kohle- oder Gasbefeuerung nutzen die bewährten Technologien der Rauchgasreinigung, um die Umwelt vor Verschmutzung zu bewahren: Nachdem das Rauchgas den elektrostatischen Partikelabscheider durchlaufen hat, werden zunächst die Schwefeloxide durch Waschen mit Kalkwasser in der Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) entfernt. Entweder unmittelbar nach Verlassen des Kessels oder im Anschluss an die REA erfolgt die Entfernung der Stickoxide. Dies kann sowohl durch selektive katalytische oder selektive, nicht-katalytische Reduktion (SCR bzw. SNCR) erfolgen. Diese Prozesse, positioniert im weiteren Verlauf des Rauchgasstroms, erfordern optimale Temperaturführung um die vollständige Umsetzung zu garantieren. Dies wird erreicht durch Wärmeverschiebungssysteme, die sowohl in der REA als auch den SCR/SNCR-Modulen erforderlich sind. Ljungström*-Gas-Gas-Wärmetauscher sind bevorzugte Systeme für diese Aufgaben. Sie sind gefertigt aus Stahl oder Stahlliegierungen. Sobald das Rauchgasgemisch den Taupunkt T_D unterschreitet und die Anlagen feucht oder nass werden, bzw. wenn sich chemisch-aggressive Ablagerungen an den Wärmetauscherelementen festsetzen, ist Korrosionsschutz erforderlich. Polytetrafluorethylen (PTFE) ist der Werkstoff der Wahl für Wärmetauscherelemente in feuchter/nasser Umgebung, eingesetzt bei hohen Temperaturen und in extrem korrosiver Umgebung.

Anwendungen

Die Arbeitsweise von Ljungström-Wärmetauschern lässt sich wie folgt beschreiben, vgl. Bild 1.

Die Wärmeübertragungselemente bestehen typischerweise aus dünnen, profilierten Stahlblechen, die, in Körbe verpackt, in den Segmenten eines Rotors installiert sind. Der typische Rotordurchmesser liegt im Bereich von 15 bis 21 m, jedoch sind auch kleinere Ausführungen im Einsatz. Bei jeder Umdrehung des Rotors, alternativ kann auch bei feststehendem Rotor die Haubenzuführung drehbar ausgeführt sein, wird Wärmeenergie aus dem Rauchgasstrom zunächst auf die Wärmeübertragungselemente übertragen. Durch Drehen des Rotors bzw. der Haubenzuführung werden dann die erhitzten Wärmeübertragungselemente in den Bereich des kalten (Rauch-)Gases gebracht. Durch Übertragung der Wärmeenergie von den Rotorelementen auf die durchströmenden Luftmassen wird dann der kalte Gasstrom wieder erwärmt.

In kohlebefeugten Kraftwerken erfolgt der Einsatz dieser sog. Gas-Gas-Erhitzer hauptsächlich an drei Positionen:

- Vorwärmung der Verbrennungsluft vor dem Eintritt in die Brennkammer
- Abkühlen des Rauchgases nach ESP-Durchtritt vor der Einleitung in die REA und Wiedererwärmung der entschwefelten Abluft
- Zusätzliche Aufheizung des Abgasstromes zwischen REA und SCR/DeNOx

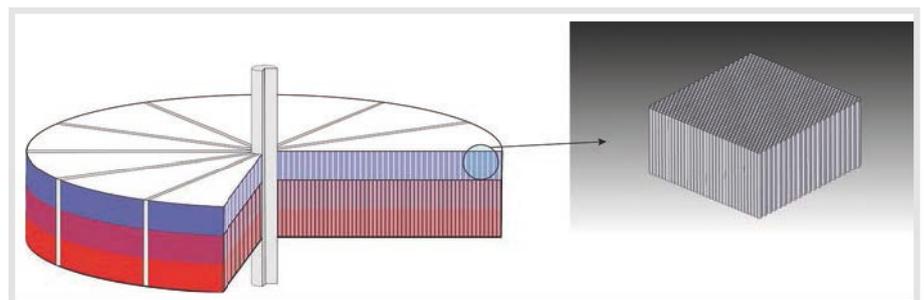


Bild 1. Der Rotor eines Ljungström-Wärmetauschers weist einen Durchmesser von bis ca. 21 m auf. Während der Hauptteil der Wärmeübertragungselemente typischerweise aus Stahlblechen bzw. emaillierten Stahlblechen aufgebaut ist, eignen sich Hetragon-PTFE-Waben durch ihre nahezu universelle Chemikalienbeständigkeit vor allem als Wärmeübertragungselemente im Bereich der sog. Kaltendlage.

Autoren

Dr. Michael Schlipf
ElingKlinger Kunststofftechnik GmbH
Manager Global Projects
Bietigheim-Bissingen/Germany

Dipl.-Ing. (FH) Katja Widmann
ElingKlinger Kunststofftechnik GmbH
Projektleitung Waben
Heidenheim/Germany

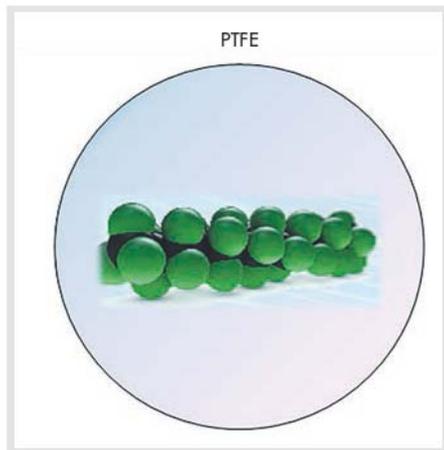


Bild 2. Bei Polytetrafluorethylen (PTFE) ist die Kohlenstoffkette wirksam vor angreifenden Chemikalien geschützt. Die hohe Bindungsenergie der C-F-Bindung kombiniert mit der exzellenten sterischen Abschirmung der C-C-Kette durch die Fluoratome machen PTFE zu einem nahezu universell chemikalienbeständigen Werkstoff.

zum Erzielen eines optimalen Entstickungs-Prozesses

Auf diese drei Hauptanwendungen wird im Folgenden noch näher eingegangen.

Vorteile der Hetragon PTFE-Waben

In Strömungsrichtung des heißen, zumeist noch ungereinigten Gases durch die Rotorelemente hindurch betrachtet kann das abkühlende Gasgemisch den Taupunkt T_D unterschreiten und die chemische Fracht des Rauchgasstromes kondensiert. Dadurch entstehen hoch-korrosive Bedingungen insbesondere im Bereich der Kaltendlage der Wärmeüberträrelemente und Stahl bzw. Stahlliegierungen beginnen schnell zu korrodieren. Durch Emaillierung oder andere, vor Korrosion schützende Überzüge, wird versucht, dies zu verhindern. Für Anwendungen unter Feuchtbedingungen wird dadurch eine Lebensdauer der Wärmeübertragungspakete erreicht, die im Bereich von mehreren Jahren liegt.

Im Vergleich dazu ist Polytetrafluorethylen (PTFE) das Material der Wahl für die Herstellung von Wärmeüberträrelementen für die Rotoren, die unter diesen aggressiven Bedingungen über viele Jahre ohne Anzeichen der Beschädigung beständig sind.

Eigenschaftsprofil von PTFE

Polytetrafluorethylen ist ein vollfluorierter Kunststoff, bei dem die Kohlenstoffketten durch Fluoratome wirksam vor angreifenden Chemikalien geschützt werden, vgl. Bild 2. Mit einer Bindungsenergie von 460 kJ/mol stellt die Kohlenstoff-Fluor-Bindung die stärkste chemische Bindung der organischen Chemie dar. Sie ist deshalb durch keine andere Bindung unter Energiegewinn zu ersetzen. Darüber hinaus lässt die Größe des Fluoratoms bei helikaler Anordnung keine Schwachstellen offen entlang des C-C-Polymerrückgrades.

Beide Effekte bewirken die nahezu universelle Chemikalienbeständigkeit des PTFE.

Mit einem Molekulargewicht von bis zu 10^6 g/mol weist PTFE das höchste Molekulargewicht aller Thermoplaste auf. Es liegt in der Anwendungsform als teilkristalliner Thermoplast mit ca. zwei Drittel Kristallinanteil und ein Drittel Amorphanteil vor. Der hohe Kristallinanteil erlaubt den Einsatz bei Dauergebrauchstemperaturen bis nahe an den Kristallitschmelzpunkt, der bei 327 °C liegt. Im Dauereinsatz schaden 260 °C PTFE nicht, auch nicht in Gegenwart aggressiver Chemikalien. Kurzzeitig sind auch Temperaturen bis zu 300 °C unproblematisch.

Der Amorphanteil bewirkt die gute Verankerung der Polymerketten im Werkstoffverbund und ist so Garant für die hohe Abriebbeständigkeit. Sie äußert sich bei der Anwendung als Hetragon-Wabe in der ausgezeichneten Festigkeit gegenüber Werkstofferosion bei den prozessüblichen Abreinigungsvorgängen. Im Dauereinsatz in Ljungström-Wärmetauschern über 12 Jahre wurde in einem typischen Anwendungsfall die Erosion der Wabenhöhe mit kleiner 5 mm als extrem gering ermittelt.

Die vollständige Bedeckung der Polymerketten durch Fluoratome ist die Ursache für die unpolare, stark antiadhäsive Oberfläche. Das Anhaften von Belägen, gebildet aus Flugasche und wässrigen Säuregemischen, wird dadurch verringert und die Abreinigung wesentlich erleichtert. In direktem Kontakt von Wasser mit einer PTFE-Oberfläche bildet sich ein Randwinkel von 126° aus. Als Folge ist die Benetzung der PTFE-Oberfläche durch Wasser stark reduziert und Adhäsionskräfte sind wegen der geringen Kontaktflächen zu wässrigen Medien minimiert. Daraus ergibt sich ein geringeres Anschmutzverhalten der PTFE-Wärmeüberträrelemente im Vergleich zu emaillierten Stahloberflächen, in Kombination mit einem günstigeren Abreinigungsverhalten. Für den Anlagenbetreiber steigt dadurch die Verfügbarkeit des Gas-Gas-Wärmetauschers.

PTFE weist einen „Limiting Oxygen Index“ (LOI) von 95 auf und ist deshalb unter Atmosphärenbedingungen (Oxygen Index $OI = 20$) nicht brennbar. Eventuell auftretende, glühende Flugaschepartikel sind deshalb für den „unbrennbaren“ Werkstoff PTFE als unkritisch einzustufen.

Wie sieht es nun mit dem Alterungsverhalten von PTFE unter den typischen Einsatzbedingungen in Ljungström-Wärmetauschern bei hohen Temperaturen unter wechselnder Belastung sowie permanenter Gegenwart aggressiver Chemikalien aus? Der Alterungsmechanismus von Polymerwerkstoffen basiert prinzipiell auf zwei verschiedenen chemischen Reaktionen: einerseits führt der Bruch der Polymerketten mit anschließender Rekombination zu einer fortschreitenden Vernetzung des Polymeren und damit zu seiner Versprö-

dung, andererseits wird das Polymere durch oxidativen Angriff unter Substitution der Seitenketten chemisch abgebaut, was insbesondere in einer zunehmenden Rissanfälligkeit zum Ausdruck kommt. Beide Reaktionen sind bei PTFE aus energetischen Gründen nicht möglich. Deshalb altert es auch im Dauereinsatz unter extremen Bedingungen so gut wie nicht und das ursprüngliche Eigenschaftsspektrum bleibt über viele Jahre erhalten. Lediglich die schon früher beschriebenen Abriebserscheinungen sind möglich.

Technische Spezifikation für Hetragon-Waben

Technische Spezifikationen für Hetragon-Waben sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Das vorliegende Wabendesign ist das Resultat der Optimierung von Strömungseigenschaften, Abreinigungsverhalten und Kontaktfläche. Der freie Querschnitt von 83 % liegt über den typischen Werten von Paketen aus emaillierten, profilierten Blechen und verbessert somit das Abreinigungsverhalten und hält gleichzeitig die Druckdifferenz im Rauchgasstrom niedrig.

Das Fertigungsverfahren würde – bei Bedarf – eine Anpassung in verschiedenen Richtungen erlauben. Durch Vergrößerung des Kanalquerschnittes wird das Strömungs- und Abreinigungsverhalten verbessert, allerdings verkleinern sich die spezifische Oberfläche und die Wärmeabsorption bzw. -desorption, wodurch der Wärmetransport pro Rotorumdrehung reduziert wird. Durch Erhöhung der Wanddicke steigt zwar prinzipiell die Wärmeübertragungskapazität an, allerdings mindert die relativ reduzierte Wärmeabsorption bzw. -desorption die Möglichkeit, diese zusätzliche Kapazität auch tatsächlich zu nutzen. Durch Steigerung des freien Querschnittes schließlich ließe sich

Tab. 1. Technische Spezifikationen für Hetragon-Waben.

PTFE-Waben für Wärmetauscher	
Abmessungen und Gewichte (Beispiel):	
Kanalgeometrie:	Wabenstruktur
Höhe der Elemente:	150, 250 mm oder mehr
Stapelhöhe:	300, 450, 500 mm oder mehr
Abstand der Kanalwände:	14,3 mm
Kanalquerschnitt:	1,5 cm ²
Wanddicke:	1,2 mm
Freier Querschnitt:	83 %
Spezifische Oberfläche:	150 m ² /m ³
Spezifisches Gewicht:	360 kg/m ³ (1. Generation: weiß) 300 kg/m ³ (2. Generation: schwarz, erhöhte Wärmeleitfähigkeit)

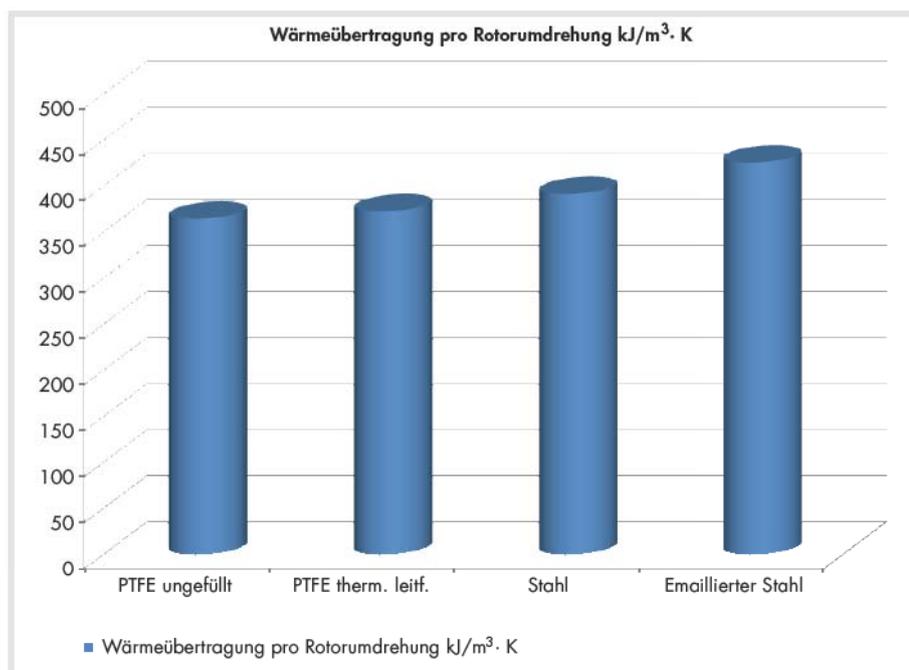


Bild 3. Der Wärmetransport in Ljungström-Wärmetauschern pro Umdrehung des Rotors liegt für die Werkstoffe: PTFE ungefüllt, PTFE thermisch leitfähig, Stahl und emailliertem Stahl in vergleichbarer Größenordnung.

sowohl Strömungs- als auch Abreinigungsverhalten verbessern, allerdings wird dies erkauft durch eine Absenkung der Wärmeübertragungskapazität.

Aktuelle Herausforderungen für Kraftwerke

Die Einspeisung der stark schwankenden regenerativen Energien in das Stromnetz hat zur Forderung nach zunehmender Flexibilität in der Auslastung konventioneller Kraftwerke geführt. Damit verbunden sind ständige Schwankungen der Betriebsbedingungen, verbunden mit Temperaturänderungen oder Taupunktswanderungen. Um diese neue Herausforderung zu meistern, geht der gegenwärtige Trend dahin, auf Basis des vorhandenen Wabendesigns die Kanallänge der Waben zu erhöhen, um damit den Wärmetauscher gegen stärkere Taupunktverschiebungen fit zu machen.

Ersatz von Stahlblechen als Wärmeüberträgerpakete durch Hetragon-PTFE-Waben

Das Funktionsprinzip von Ljungström-Wärmetauschern unterscheidet sich von

anderen Wärmetauscherausführungen wie z.B. Plattenwärmetauscher oder Schlauch- bzw. Rohrbündelwärmetauschern in grundsätzlicher Weise:

Dieser Unterschied sei durch direkten Vergleich von Schlauchbündel- und Ljungström-Wärmetauscher näher erläutert. Beide Wärmetauschertypen eignen sich in der PTFE- bzw. Fluorpolymerausführung in hervorragender Weise für Wärmeübertragungsaufgaben unter den extrem korrosiven Bedingungen in Rauchgasströmen von Kraftwerken.

Beim Schlauchbündelwärmetauscher strömt das Rauchgas an der Außenseite des Schlauches vorbei, wobei die Wärmeenergie vom zweiten Medium, üblicherweise ist dies Kühlwasser, das durch den Schlauch geleitet wird, nach Durchtritt durch die Schlauchwand aufgenommen wird. In umgekehrter Weise erfolgt dann später die Abgabe der Wärme aus dem erhitzten Kühlmedium im Schlauchinnern an die vorbeiströmenden Gase. Entscheidendes Kriterium für die Kapazität ist somit die Wärmeleitfähigkeit des Schlauchmaterials. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist,

zeichnen sich Metalle durch eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit aus als Kunststoffe, z.B. PTFE. Deshalb werden Fluorpolymer-Schlauchbündelwärmetauscher mit größerer Schlauchoberfläche ausgelegt als die korrosionsanfälligen Metallrohralternativen(1). Als Resultat stehen dann zwei grundsätzlich verschiedene Rohrschlauchbündelwärmetauscher dem Anwender zur Verfügung, die dieselbe Wärmetauscherkapazität aufweisen.

Ganz anders liegen die Verhältnisse beim Ljungström-Wärmetauscher: Zunächst umströmt das heiße Rauchgas die Wärmeübertragerelemente – im Wesentlichen sind dies emaillierte Stahlblechpakete oder PTFE-Waben – und heizt dabei diese auf, wobei es selbst abgekühlt wird. Nach Weiterdrehen des Rotors oder der Abdeckhaube erhitzen nun die aufgeheizten Wärmeübertragerelemente die umströmende Kaltluft. Die kalten Gase werden aufgeheizt, wobei sich die Rotorelemente wieder abkühlen um dadurch, nach weiterdrehen, für eine erneute Wärmeaufnahme bereitzustehen. Basierend auf diesem Grundprinzip ist für die Wärmeüberträgerkapazität nicht etwa die Wärmeleitfähigkeit des Überträgermediums, sondern dessen spezifische Wärme entscheidend. Sie ist die bestimmende Größe für die Menge des Wärmetransportes pro Rotorumdrehung. Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass selbst bei ungefülltem PTFE die spezifische Wärme um mehr als doppelt so hoch ist, wie dies bei Stahl bzw. bei Nickel-legiertem Stahl der Fall ist: einer spezifischen Wärme von 1,01 J/g x K für ungefülltes PTFE stehen lediglich 0,46 J/g x K bei Stahl oder Stahllegierungen gegenüber. Und dieser Unterschied bezüglich der spezifischen Wärme zwischen PTFE und Stahl lässt sich noch weiter zugunsten des Fluorpolymeren steigern, von 1,01 auf 1,24 J/g x K, wenn man dem PTFE geeignete Füllstoffe zusetzt. Dieses PTFE mit nochmals gesteigerter spezifischer Wärme wird derzeit als 2. Wabengeneration am Markt eingeführt.

Als Konsequenz wird also trotz des geringeren spezifischen Gewichtes der PTFE-Wärmeübertragerelemente eine vergleichbare Menge an Wärme pro Rotorumdrehung übertragen, wie dies bei Ausrüstung mit den deutlich schwereren Metallblechpaketen der Fall ist.

Tab. 2. Die charakteristischen Eigenschaften von Werkstoffen im Einsatz in Ljungström-Wärmetauschern.

Werkstoff	Farbe	Spezifische Wärme	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Spezifisches Gewicht d. Wärmeübertragerelemente	Wärmeübertragung pro Rotorumdrehung
		J/g · K	W/m · K	g/cm	kg/m³	kJ/m³ · K
PTFE ungefüllt	weiß	1,01	0,35	2,16	360	364
PTFE thermisch leitfähig	schwarz	1,24	0,43	2,13	300	372
Stahl	schwarz	0,46	40		850	391
Nickel Legierung	schwarz	0,46	15		850	391
Emaille	Blau	0,71	1			
Emaillierter Stahl	Blau	0,5	8		850	425

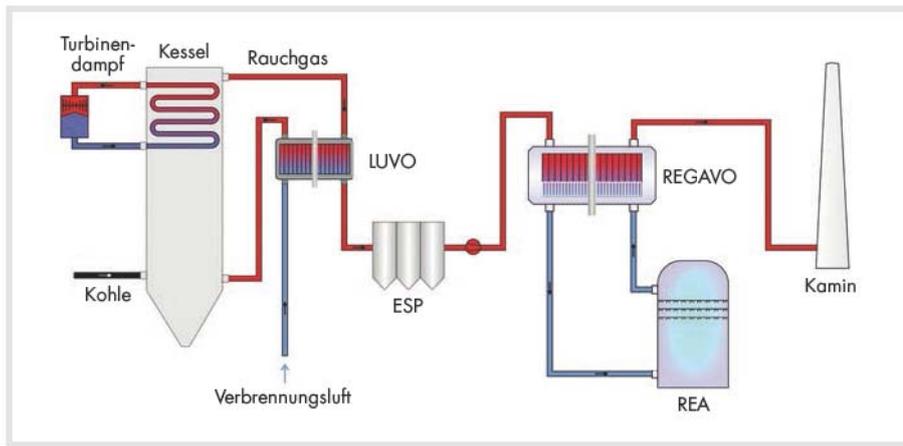


Bild 4. Positionierung eines regenerativen Gasvorwärmers (REGAVO) mit PTFE-Wabenausstattung in der Kaltendlage, ausgeführt als Ljungström-Wärmetauschers, innerhalb einer Rauchgasentschwefelungsanlage (REA).

Die kalorischen Details der Wärmeübertragung von verschiedenen bestückten Ljungström-Wärmetauscherrotoren sind in Bild 3 dargestellt. Der Berechnung liegen die reinen Werkstoffdaten, noch ohne die im Betrieb üblicherweise einsetzende Belagsbildung zugrunde. Die Tendenz zur Belagsbildung und das Abreinigungsverhalten sind weitere wichtige Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von Ljungström-Wärmetauschern.

Die folgenden Annahmen liegen der Berechnung zugrunde:

Das spezifische Gewicht der profilierten Stahlbleche in den Rotoren beträgt in etwa das Doppelte der PTFE-Waben.

Die Emaillierung erhöht zwar einerseits die spezifische Wärme des Systems Stahlemaillierung, reduziert allerdings andererseits die Geschwindigkeit des Wärmeübergangs vom Rauchgas auf die Blechelemente und umgekehrt durch seine im Vergleich zu Stahl reduzierte Wärmeleitfähigkeit.

Schlussfolgerungen:

In vorhandenen Ljungström-Wärmetauschern lassen sich Stahlblechpakete sukzessive durch Hexagon-PTFE-Waben ersetzen, ohne dass sich dabei die Wärmeübertragungseigenschaften des Gas-Gas-Wärmetauschers signifikant ändern. Empfehlenswert ist bei dieser Umstellung das Vorgehen nach Korrosionsanfälligkeit: entweder beginnend mit der Kaltendlage oder mit den besonders korrosionsanfälligen Ringen des Rotors.

Die neue PTFE-Wabengeneration auf Basis eines speziell wärmeleitfähigen Compounds und nochmals gesteigerter Wärmeüberträgerkapazität wird die Vorteile einer solchen Umstellung noch weiter steigern.

Einsatz von PTFE-Waben in Wärmetauschern in Rauchgasentschwefelungsanlagen

Moderne Kraftwerke mit Kohle- oder Gasbefuerung nutzen die bewährten Technologien der Rauchgasreinigung, um die Umwelt vor Verschmutzung zu bewahren.

Nachdem das Rauchgas den elektrostatischen Partikelabscheider durchlaufen hat werden zunächst die Schwefeloxide – bei Nassverfahren – durch Waschen mit Kalkwasser in der Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) entfernt. Dieser Prozess, positioniert im Abgasstrom unmittelbar nach der Partikelabscheidung, erfordert optimale Temperaturführung zum Erzielen eines hohen Wirkungsgrades. Um dieses Ziel zu erreichen, wird über ein Wärmeverschiebungssystem das zugeführte Rauchgas vor dem Einlauf in den Wäscher zunächst abgekühlt, um es nach der Reinigung wieder aufzuwärmen, damit es mit genügend Auftrieb durch den Schornstein abziehen kann. Ljungström-Gas-Gas-Wärmetauscher sind eine bevorzugte Technologie für diese Wärmeverschiebung innerhalb des Rauchgasstromes.

Die Wärmeübertragungspakete sind typischerweise in profilierten Blechen aus Stahlegierungen ausgeführt. Je nach Betriebsbedingungen des Wärmetauschers herrschen trockene oder feuchte Bedingungen. Ursache für die Feuchtbedingungen sind zum Beispiel:

- Unterschreiten des Taupunktes T_D des Rauchgases als Folge des Abkühlungsvorganges
- Besprühung mit gipshaltigen Aerosolen aus dem Waschturm
- Nasse Abreinigung mittels Hochdruckreinigungsanlagen während des Betriebes oder während Abstellzeiten

Zum Erzielen höherer Standzeiten der Wärmeüberträgerpakete werden die profilierten Stahlbleche mittels Emaillierung vor Korrosion geschützt. Durch diese Maßnahmen sind im Nassbereich Standzeiten zwischen zwei und fünf Jahren typisch. Werden in dieser Anwendung anstelle von Blechpaketen PTFE-Waben als Wärmeübertragungsmedien eingesetzt, so erhöht sich die Standzeit signifikant. Aufgrund vorliegender positiver Erfahrungen mit dem Werkstoff PTFE, der im Dauereinsatz über bis zu 12 Jahren keine erkennbare Werkstoffveränderung erfahren hat, erfol-

gen nun Anlagenauslegungen für eine Einsatzdauer von bis zu zwanzig Jahren.

In Bild 4 ist die Einbausituation eines regenerativen Gasvorwärmers (REGAVO) mit PTFE-Wabenausstattung im Bereich der Kaltendlage dargestellt. Die Bestückung mit den PTFE-Bauteilen kann dabei sehr flexibel gehandhabt werden. Je nach Positionierung des Wärmetauschers innerhalb der REA und Führung des Rauchgasstromes können die Waben sowohl unten im Rotor (siehe Darstellung), als auch oben eingebaut werden.

Für eine REA-Anwendung typische Betriebsbedingungen innerhalb des Ljungström-Rotors hinsichtlich Temperaturführung und Chemikalienfracht sind in Bild 5 a, b veranschaulicht. In Bild 5a wird das ungereinigte Rauchgas auf der linken Seite von unten nach oben durch den Rotor geführt und dabei von 150 auf 85 bis 90 °C abgekühlt, wobei die Chemikalienfracht unverändert bleibt. Anschließend erfolgt die Reinigung im REA-Wäscher, wobei eine weitere Abkühlung auf 45 bis 50 °C erfolgt und sowohl SO_x als auch Flugasche signifikant in ihren Mengen reduziert werden. Die Konzentration an NO_x bleibt in dieser Reinigungsstufe mit ca. 200 mg/m³ nahezu unverändert. Beim zweiten Durchleiten des gereinigten Rauchgases durch den Rotor auf der rechten Seite von oben nach unten wird es auf 95 bis 100 °C aufgewärmt und erhält somit den notwendigen Auftriebseigenschaften für einen störungsfreien Abzug durch den Kamin.

Eine Ursache für das Entstehen von trockenen und feuchten Bereichen innerhalb des Ljungström-Rotors ist in Bild 5b dargestellt. Infolge der Abkühlung des Rauchgases beim ersten Durchleiten wird der Taupunkt TD unterschritten und die Mischung aus Dampf, Flugasche, SO_x , NO_x , Salzsäure (HCl), Fluorwasserstoff (HF) und evtl. weiteren Verunreinigungen kondensiert aus. Als Folge entstehen für den Rotor und die Wärmetauscherpakete extrem korrosive Bedingungen, obwohl das Kondensat und die sich aufbauenden Beläge in regelmäßigen Zeitabständen abgewaschen werden. Deshalb ist es wichtig, dass zumindest der Nassbereich des Rotors mit Hexagon-PTFE-Waben als Wärmeüberträgerpakete ausgerüstet ist. Dadurch kann die Korrosion von Wärmetauscherpaketen sicher vermieden werden. Die Praxis hat gezeigt, dass PTFE unter diesen extremen Bedingungen mit permanent wechselnder Belastung seine ursprünglichen Eigenschaften über viele Jahre ohne messbare Veränderungen beibehält. Bisher liegen Erfahrungen bis über zwölf Jahre vor, bei denen keinerlei Korrosions- oder Alterungsphänomene beobachtet wurden.

Bei stark schwankender Auslastung von Kraftwerken wandert die Taupunktlinie TD innerhalb des Rotors, sodass der Bereich der sog. Kaltendlage in der Höhe

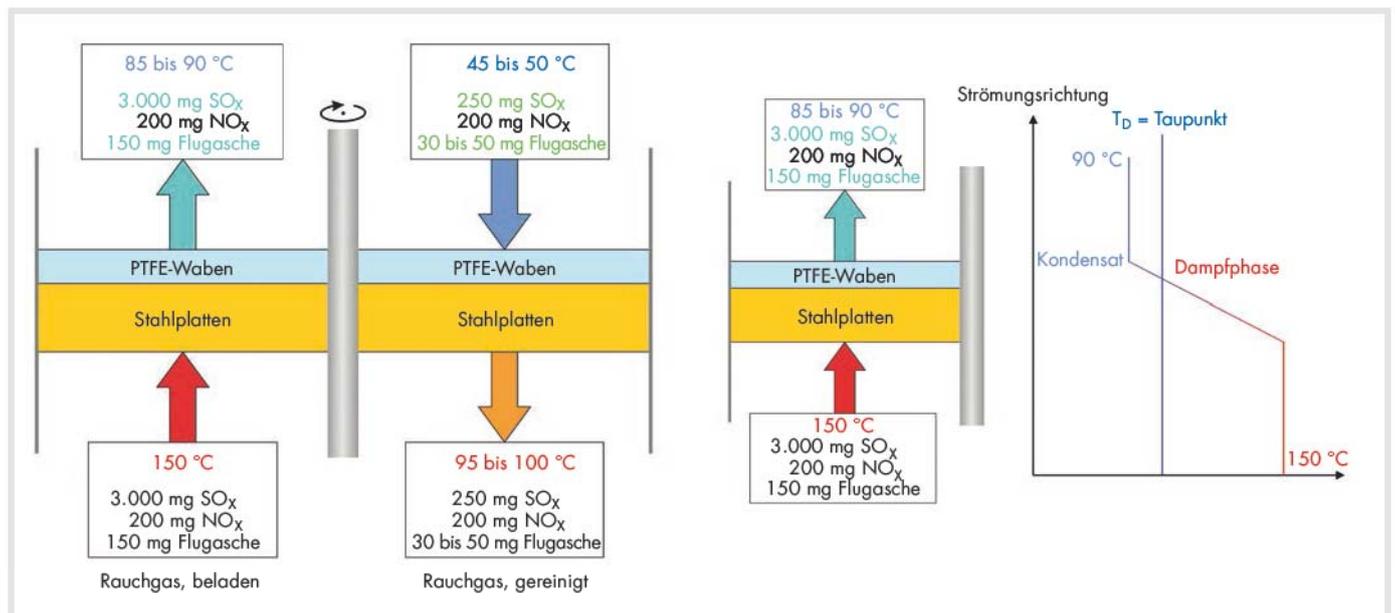


Bild 5. Typische Betriebsbedingungen innerhalb des Rotors eines Ljungström-Wärmetauschers in einer REA-Anlage.
 a) Beim ersten Durchströmen werden die Rauchgase zunächst von 150 °C auf ca. 85 bis 90 °C abgekühlt (linke Seite), während sie dann beim erneuten Durchströmen nach Reinigung in der REA wieder von 45 bis 50 °C auf 95 bis 100 °C aufgeheizt werden (rechte Seite).
 b) Infolge der Abkühlung beim ersten Durchleiten wird der Taupunkt T_D unterschritten und der korrosive Chemikaliennix kondensiert. Durch die Ausrüstung des Rotors mit PTFE-Waben als Wärmeüberträgermedium kann Korrosion sicher vermieden werden.

variiert. Deshalb geht der Trend dahin, die Höhe des Wabenbereiches zu vergrößern, um auch unter diesen Bedingungen gegen Korrosion sicher geschützt zu sein.

Einsatz von Wärmetauschern in SCR/SNCR-Modulen

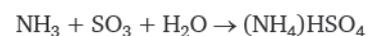
Hochmoderne Kraftwerke mit Kohle- oder Gasbefuerung nutzen mehrstufige Verfahren der Rauchgasreinigung: Nach weitgehender Entfernung der Schwefeloxide durch Waschen mit Kalkwasser in der Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) erfolgt die Entfernung der Stickoxide entweder durch selektive katalytische oder selektive, nicht-katalytische Reduktion (SCR bzw. SNCR). Die Entstickung, positioniert entweder direkt nach dem Ausgang aus dem Kesselraum oder nach der REA, erfordert, ähnlich wie die REA, optimale Temperaturführung um die vollständige Umsetzung zu garantieren. Deshalb werden SCR/SNCR-Module häufig auch mit Wärmeverschiebungssystemen, ausgeführt z.B. in Form des Ljungström-Gas-Gas-Wärmetauschers betrieben. Eine mögliche Modulkonstellation ist in Bild 6 beschrieben. Die SCR/SNCR Ljungström-Wärmetauschereinheit ist mit der Ausgangsseite direkt vor dem Kamin positioniert. In Form eines Wärmerückgewinnungsprozesses wird Wärme aus dem entstickten Rauchgas entnommen und zur Vorheizung des NO_x-haltigen Rauchgases auf die Zuluftseite des SCR-DeNO_x-Moduls verschoben. Somit wird das Rauchgas, das mit niedrigerer Temperatur aus der REA kommt, auf die ideale DeNO_x-Temperatur gebracht, ohne dass eine weitere Zuheizung notwendig wäre.

Ljungström-Gas-Gas-Wärmetauscher in SCR-Anwendungen zeichnen sich durch eine größere Bauhöhe aus, um das unbehandelte Rauchgas auf die für den SCR-Prozess erforderliche Minimaltemperatur hochheizen zu können. Da die Betriebstemperatur im Bereich von 150 bis 190 °C liegt, also höher als in REA-Anwendungen, sind die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit geringer als in der REA. Jedoch müssen alle verwendeten Bauteile bei diesen Betriebstemperaturen und gleichzeitigem Medienkontakt beständig sein. PTFE mit einer Dauergebrauchstemperatur von 250 °C erfüllt diese Anforderungen.

Neben der Wärmeübertragung müssen die Rotorelemente noch eine zweite Funktion erfüllen (Bild 7): Sie dienen als Kollektor für das bei der Neutralisationsreaktion

der Stickoxide gebildete Ammoniumbisulfat (ABS).

Ammoniumbisulfat (ABS) wird nach der folgenden Reaktionsgleichung gebildet:



Der Ammoniak-Überschuss verbindet sich mit Schwefeltrioxid und Wasser unter Bildung von Ammoniumbisulfat. Das Reaktionsprodukt wird als klebriger Niederschlag innerhalb des Luftvorwärmers (REGAVO) gesammelt. Durch regelmäßige Waschprozesse wird es aus dem REGAVO entfernt. Dadurch werden zeitweise hochkorrosive Reaktionsbedingungen geschaffen. PTFE unterstützt aufgrund seiner Anhaftungseigenschaften diesen Waschprozess wirkungsvoll. Dank seiner chemischen

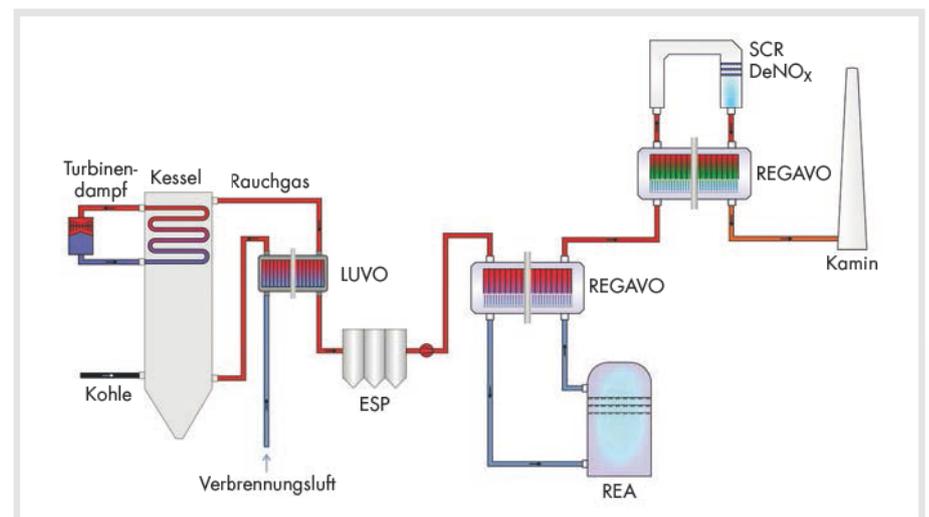


Bild 6. Positionierung eines REGAVO zur Optimierung des DeNO_x-Prozesses: Wärme wird dem gereinigten Rauchgas entnommen und zur Erhöhung der Betriebstemperatur innerhalb des SCR-DeNO_x-Moduls verwendet.

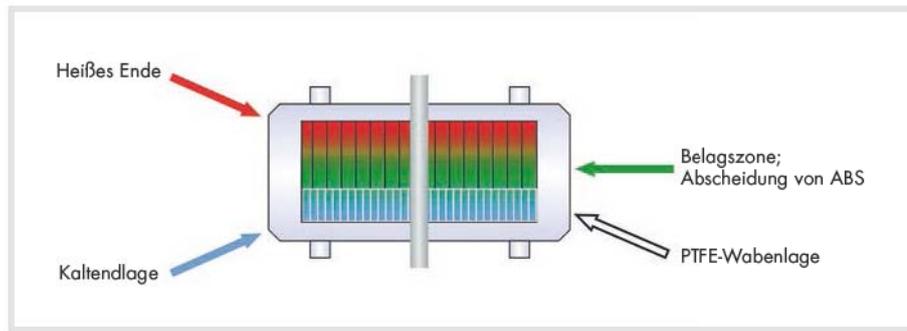


Bild 7. Die Doppelfunktion eines REGAVO in SCR-DeNOx-Modulen: Neben der Wärmeübertragung erfolgt auch die Abscheidung von Ammoniumsulfat (ABS) auf den Wärmeübertragerelementen. Regelmäßiges Abreinigen stellt den Betrieb im Dauereinsatz sicher.

Beständigkeit widersteht es diesen Bedingungen ohne Materialveränderung.

Die Flexibilität des Fertigungsprozesses der Hexagon-Waben erlaubt es, diese entsprechend den speziellen Anforderungen des Abscheidungs- und Waschprozesses auszulegen.

Entstehung von Katalysatorgiften wirkungsvoll vermeiden

Die für die Entstickung verwendeten Katalysatoren in SCR-Modulen können durch Siliziumtetrafluorid, SiF₄, vergiftet werden und verlieren dadurch schnell an Wirkung.

Die Hauptquelle für die Entstehung dieses Katalysatorgiftes ist die Reaktion von Flußsäure (HF), in geringen Konzentrationen Bestandteil des Rauchgases, die mit dem Siliziumdioxid (SiO₂) der Emaille-Korrosionsbeschichtungen reagiert. Je nach Mengenverhältnis und Reaktionsbedingungen entsteht dabei nicht nur SiF₄, sondern auch Hexafluorkieselsäure, H₂SiF₆. Beide Reaktionen führen auf Dauer zum Abtrag der Emailschicht. Die Reaktionsschemata sind in Bild 8 dargestellt. Bei Verwendung des Systems Emaille-Stahl, links dargestellt, besteht die Gefahr der Bildung des Katalysatorgiftes SiF₄. Erfolgt die Ausrüstung der Wärmetauscher mit den korrosionsresistenten Hexagon-PTFE-Waben, Darstellung rechts, dann wird dadurch die Bildung von SiF₄ wirkungsvoll eliminiert.

Die gebildete Hexafluorkieselsäure kann in einer Folgereaktion nach der Gleichung:



zerfallen, wobei weiteres SiF₄ gebildet wird.

Aufgrund der beschriebenen chemischen Reaktionen sollte zur Vermeidung der Bildung des Katalysatorgiftes SiF₄ auf die Emaillierung als Korrosionsschutzsystem verzichtet werden, zumindest im Verlauf der Rauchgasführung vor den SCR-Modulen. Als geeignete Alternativen eignet sich hier die Ausführung in der Voll-Fluorkunststoffversion, wie dies im Fall der PTFE-Waben der Fall ist.

Korrosion vermeiden durch Auskleidung mit Fluoropolymeren

Behälter für Chemikalien sowie Rauchgaskanäle lassen sich ebenfalls durch Fluoropolymere wirkungsvoll gegen Korrosion schützen. Zur Anwendung kommen in diesen Fällen Auskleidungssysteme, die entweder im Festverbund – bei Behältern – oder als sog. „Lose-Hemd-Auskleidung“ bei Rauchgaskanälen zum Einsatz kommen.

Gewichtsreduzierung eröffnet neue Optionen für den Einsatz von PTFE-Waben

Neben dem Einsatz in der Rauchgasentschwefelung führt Bild 4 noch einen weiteren möglichen Einsatzbereich für Ljungström-Wärmetauscher auf, den als Luftvorwärmer (LUVO) für die Erwärmung der dem Kessel zugeführten Verbrennungsluft. Durch diese Vorwärmung wird der Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes erhöht

und der Verbrennungsprozess positiv beeinflusst. Wegen der hohen Betriebstemperaturen der Rauchgase auf der Heiß-Seite dieses Wärmetauschers treten üblicherweise keine Korrosionsprobleme auf. Eine Umrüstung von Stahl auf PTFE ist deshalb aus Korrosionsschutzgründen nicht erforderlich.

Die hohen Dauergebrauchstemperaturen des Werkstoffes PTFE, die im Dauerbetrieb bei 260 °C liegen und kurzzeitig auch 300 °C erreichen können, sowie die Möglichkeit signifikanter Gewichtsreduzierung des Wärmetauscher-Rotors bei Verwendung von PTFE-Waben legen die Option nahe, auch den LUVO von Stahl- auf PTFE-Bestückung umzurüsten. Stellt die hohe, zu bewegende Masse des Ljungström-Rotors doch eine extreme Dauerbelastung für seine Lagerung dar und hat schon manchen Stillstand verursacht.

Das Potenzial zur Gewichtsreduzierung der bewegten Massen in einem Ljungström-Wärmetauscher ist in Bild 9 dargestellt. Der Berechnung zugrunde liegen die Kennwerte der Tabelle 2, sowie ein angenommener Rotordurchmesser von 20 m, der mit Wärmeüberträgerpaketen von einem Meter Höhe bestückt ist. Dabei soll der Bestückungsgrad mit Wärmeüberträgerpaketen bei 80 Vol-% liegen, bezogen auf die Außenabmessungen des Rotors. Das Gewicht der Rotorkonstruktion selbst, sowie das der Stahlkörbe zur Fixierung der Pakete bleibt unberücksichtigt und ist auch in beiden Bestückungsvarianten, Stahl bzw. PTFE, als gleich anzusetzen. Bei vollständiger Bestückung mit Stahlblechen als Wärmeüberträgerpakete beträgt das Gesamtgewicht dieser Bauteilkomponente

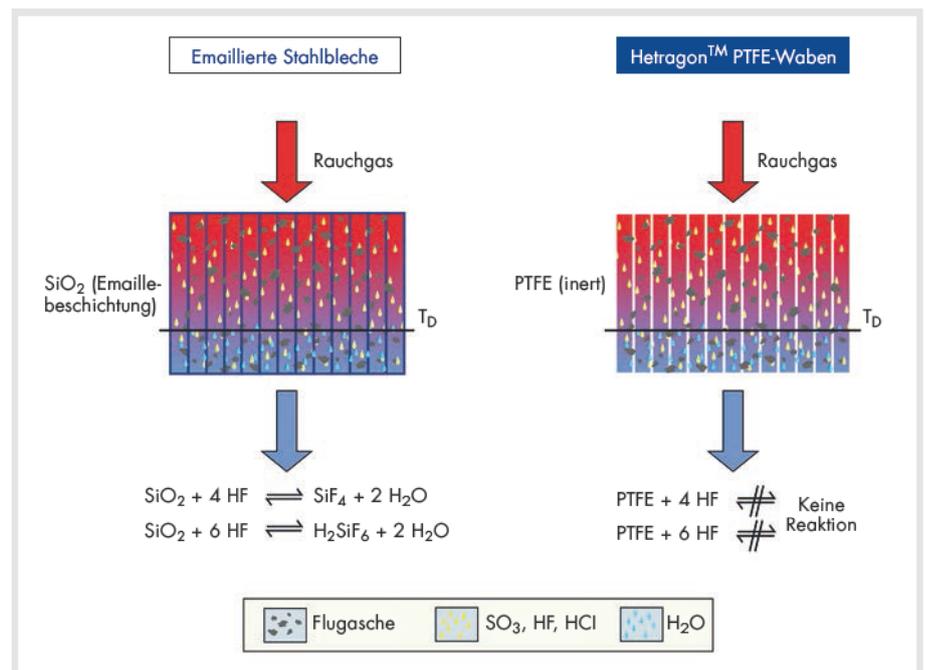


Bild 8. Email-Korrosionsschutzschichten reagieren mit Spuren HF, enthalten im Rauchgas, zu Siliziumtetrafluorid oder Hexafluorkieselsäure. Wird stattdessen das korrosionsresistente PTFE eingesetzt, dann kann keine Reaktion erfolgen und die Bildung von SiF₄ ist ausgeschlossen.

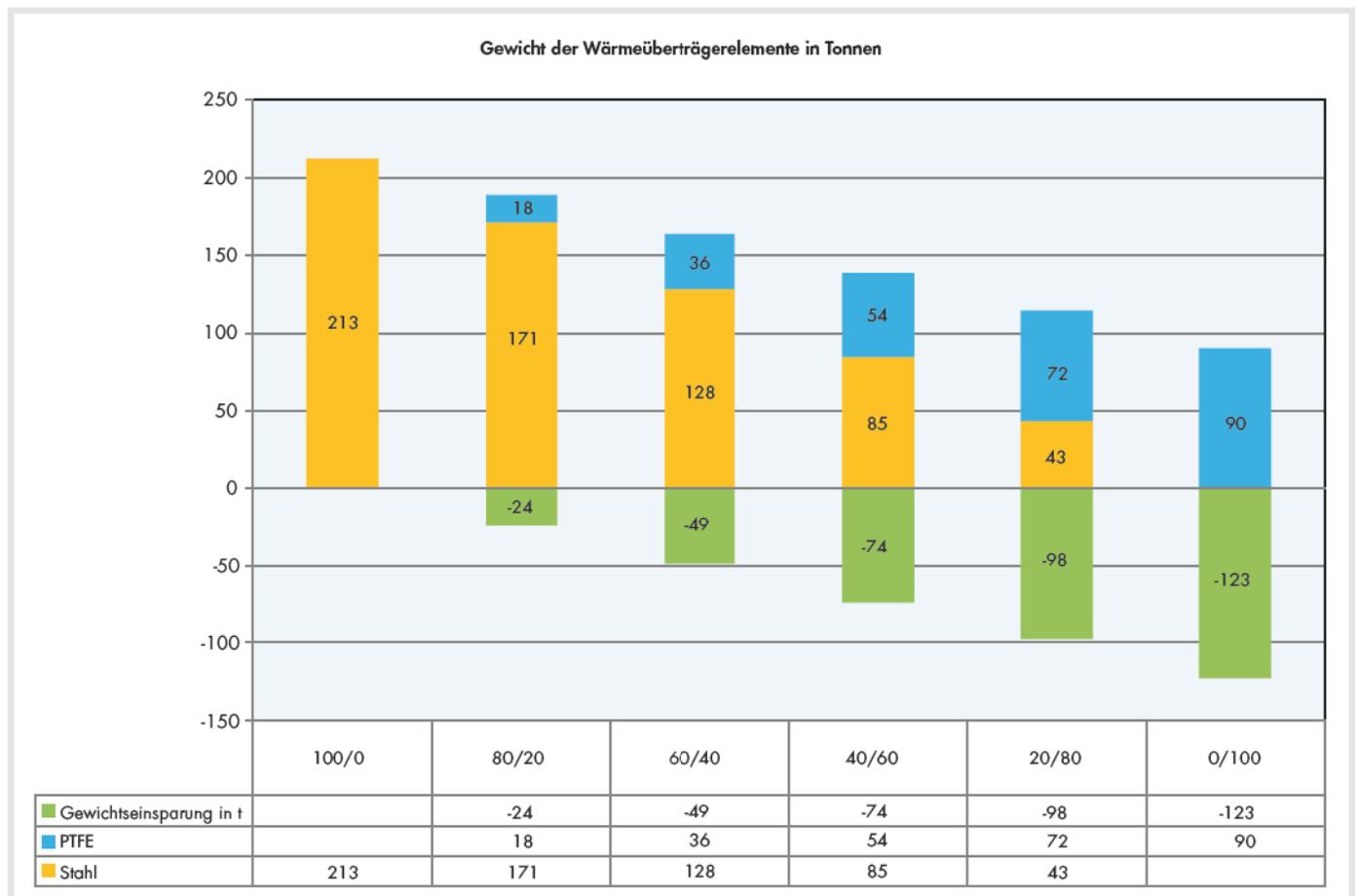


Bild 9. Das Potenzial zur Gewichtsreduzierung von Ljungström-Rotoren durch Ersatz der Metallpakete mittels PTFE-Waben – bei gleicher Wärmeübertragungskapazität – ist signifikant: Am Beispiel eines D = 20-Meter-Rotors mit einer Bestückungshöhe von einem Meter wird das Gewicht der bewegten Masse bei vollständigem Ersatz der Metallblechbestückung durch PTFE-Waben um ca. 125 t gesenkt: von links nach rechts: sukzessiver Ersatz der Metallblechbestückung durch PTFE-Waben

213 t. Im Falle einer vollständigen Bestückung mit PTFE-Waben beträgt dieser Gewichtsanteil hingegen nur 90 t. Die maximal mögliche Gewichtseinsparung beláuft sich somit auf ca. 125 t.

Flexibilität bei der Rotorbestückung

Da Hetragon-PTFE-Waben hauptsächlich zur Ertüchtigung bestehender Ljungström-Wärmetauscher eingesetzt werden, ist ein flexibles Vorgehen bei der Bestückung mit der Anpassung an die jeweils vorliegende Konstruktion eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzbarkeit von Projekten.

Dem Anwender bietet sich eine Vielzahl von Vorgehensweisen bei der Umstellung seines Systems auf PTFE-Waben an. Werden bisher Stahlkörbe für die Aufnahme der Wärmeübertrágerpakete verwendet, so kann diese Konstruktion auch zum Einbau der PTFE-Waben verwendet werden. Dazu wird bei der Neubestückung der Käfige die Länge der profilierten Wärmeübertrágerbleche reduziert und der frei werdende Raum mit PTFE-Waben gefüllt. Das Einbringen der Waben ist dabei sowohl auf der Rotorunterseite als auch auf der Rotoroberseite möglich. Dank spezieller Schweißtechnologie lassen sich einzelne Wabensegmente bis zu einer Gesamtgröße

von derzeit 1020 x 1030 mm verbinden, wodurch die Rotorsegmente der meisten am Markt befindlichen Ljungström-Wärmetauscher in einer Ein-Stück-Konstruktion gefüllt werden können. Größere Volumina werden durch Mehr-Stück-Konstruktionen gefüllt, wobei lediglich zusätzliche Abstützungsleisten an den Körben

erforderlich sind. Wabensegmente werden standardmäßig in den Höhen 150 mm und 250 mm gefertigt. Für größere Füllhöhen, was einer größeren Kanallänge der Wabe gleichzusetzen ist, sind die Waben stapelbar. Sie lassen sich zur Erzielung günstiger Strömungs- und Abreinigungsverhaltens „in Linie“ fixieren.

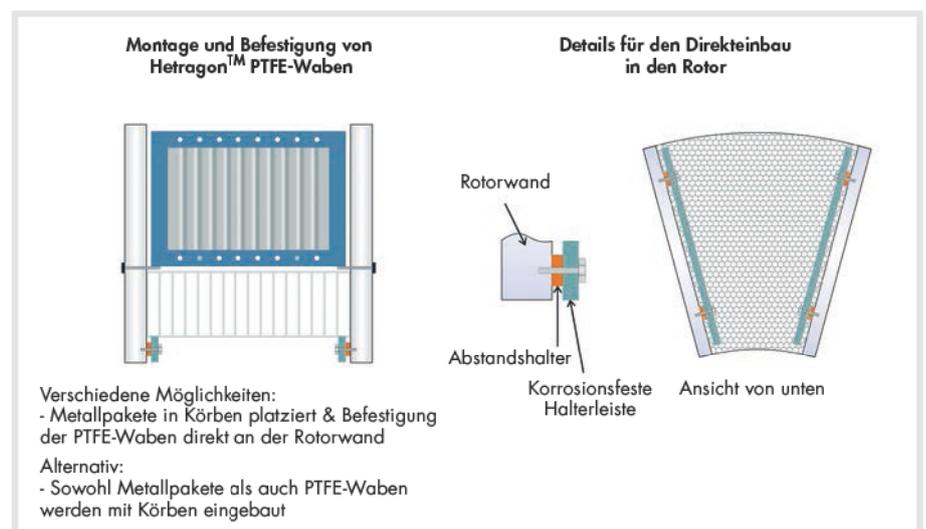


Bild 10. Neben der Einbringung mittels Körben können die PTFE-Waben mittels Stützeleisten auch direkt an den Rotorwänden befestigt werden. Eine Montageversion, bei der der signifikant erhöhten Lebensdauer der PTFE-Waben leicht Rechnung getragen werden kann.

Neben der Montage mittels Körben können die PTFE-Waben auch unmittelbar durch Stützleisten an den Rotorwänden befestigt werden. Bei dieser Einbringungsart ist es besonders leicht, durch Auswahl des entsprechend korrosionsfest ausgeführten Montage- und Haltewerkzeuges der signifikant erhöhten Lebensdauer der PTFE-Waben auch im Bereich der Befestigungselemente Rechnung zu tragen.

Für die Montageversion „Kaltendlage oben“ arbeitet die ElringKlinger Kunststofftechnik GmbH derzeit an der Entwicklung einer rotorwandfreien PTFE-Vollkunststoffausführung im Bereich der Kaltendlage. Dadurch wird die bestehende Herausforderung bei der Entstehung von Korrosion, die sich aus der Gemischtbauweise mit Werkstoffen unterschiedlicher Lebensdauer ergibt, überwunden.

Zur Veranschaulichung der verschiedenen Möglichkeiten zum Einbau von PTFE-Waben in Rotorsegmente wird in Bild 10 ein

Ausführungsbeispiel der korbfreien Direktmontageversion dargestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch Umrüstung von Ljungström-Wärmetauschern von Stahlblechen als Wärmeübertragerelemente of Hetragon-PTFE-Waben lässt sich deren Einsatzspektrum und die Lebensdauer signifikant steigern. Die nahezu universelle Chemikalienbeständigkeit des PTFE, verbunden mit der hohen Dauergebrauchstemperatur und der Antiadhäsivität der Wabenoberfläche als Grundlage für gutes Abreinigungsverhalten prädestinieren diesen Werkstoff für die Verwendung als Wärmeträgerelemente in Ljungström-Wärmetauschern. Die durch diese Technologie langlebig ausgerüsteten Wärmetauscher stehen hinsichtlich ihrer Wärmeüberträgerleistung ihren metallausgerüsteten Vorgängern in nichts nach. Dank der flexiblen Gestaltung der Waben

kann dieses innovative Wabensystem an die Dimensionen aller handelsüblichen Wärmeüberträgerrotoren angepasst werden. Eine Umrüstung ist sowohl teilweise als auch im Ganzen möglich.

Auch dank neuer Anwendungen sowohl im Bereich von SCR/SNCR-DeNOx-Modulen als auch als Luftvorwärmer (LUVO) für die Verbrennungsluftvorwärmung, die die bisherige Hauptanwendung in REA-Modulen ergänzen, ist von einem ständig steigenden Einsatz dieser auf Langlebigkeit optimierten Wärmeübertragerelementengeneration auszugehen.

Neue Entwicklungen wie die der zweiten PTFE-Werkstoffgeneration mit nochmals erhöhter spezifischen Wärme werden diesen Trend noch weiter verstärken.

Literatur

- [1] Wallstein Ingenieur-Gesellschaft mbH, Recklinghausen. Vergleich AlWaFlon vs. A59.

VGB-Standard

Construction and installation supervision in the manufacture and assembly of water-tube boilers and associated systems in thermal power plants

Edition 2015 – VGB-S-013-00-2014-12-EN

DIN A4, 155 Pages, Price for VGB members € 160.–, for non members € 240.–, plus VAT, shipping and handling.

The purposes of this VGB-Standard on construction and installation supervision in the manufacturing and assembly of water-tube boilers and associated systems in thermal power plants is to assist in securing the quality expected and required by the plant owner or operator as the customer.

The market situation is compelling contractors (manufacturers and suppliers) to offer their products and services more and more cheaply. Experience shows that cost savings in manufacture are essentially implemented at the expense of quality.

Stipulation of quality assurance measures by the customer, from the tendering process to final inspection, is therefore essential. This standard is a suitable basis for achievement by customers and contractors of the required quality.

This standard covers the processes from ordering to placing on the market of the water-tube boiler and its system components. Placing on the market is completed with the commissioning test to Section 14 of the German Ordinance on Industrial Safety and Health. The process of commissioning is not covered by this standard.

Construction and installation supervision are defined as follows within the meaning of this standard:

- Construction supervision: Measures to assure quality during the manufacture of system parts and components, from ordering through design and manufacturing to delivery at site.
- Installation supervision: Measures to assure quality at site, from incoming inspection to commissioning of the system.

The transition from manufacture, governed by the Pressure Equipment Directive (PED), to operation under the stipulations of the German Ordinance on Industrial Safety and Health (BetrSichV), which commences with testing prior to commissioning under the terms of Section 14, is to be agreed by the customer and contractor. The transitions of various packages of goods and services are in particular to be described and agreed with the Accredited Inspection Body.

This standard is a collection of experience and recommendations which cannot completely reflect the current state of the art in all cases, but was compiled to the best of the authors' knowledge. It is intended to summarize the available information on and experience of certain findings in this field, so as to facilitate the work of the user. It is hoped that this standard will make a significant contribution to securing plant quality and thus also to achieving the much sought-after longer intervals for recurrent tests.

It is the responsibility of the user to ensure compliance with patents and other property rights. Where reference is made in this standard to laws, ordinances, regulations or similar and these have been amended in the meantime, the new editions are to be taken into account and applied accordingly.

Users are requested to inform the VGB Secretariat without delay of any experience gained in the application of this standard, of potential misinterpretations, of inadequacies of presentation and of suggestions for improvement. These may then flow into additions or amendments.

VGB PowerTech Service GmbH

Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften

Deilbachtal 173 | 45257 Essen | P.O. Box 10 39 32 | Germany

Fon: +49 201 8128-200 | Fax: +49 201 8128-302 | E-Mail: mark@vgb.org | www.vgb.org/shop

