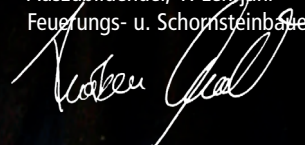




Wir sind die Guten!

Thorben Arnold
Auszubildender, 1. Lehrjahr
Feuerungs- u. Schornsteinbauer



Als Experten im Feuerfestbau schaffen wir innovative Lösungen für alle Industriebereiche. Seit mittlerweile 75 Jahren. Weltweit. Dabei hat uns immer die Nähe zu unseren Kunden stark gemacht. Denn wir konzentrieren uns auf die individuellen Bedürfnisse unserer Geschäftspartner und beantworten diese mit maßgeschneiderten Gesamtlösungen. Grenzen im Feuerfestbau kennen wir nicht. In diesem Sinne sind wir gerne uneingeschränkt für Sie da. Jünger+Gräter GmbH • D-68723 Schwetzingen • www.jg-refractories.com



J+G
REFRATORIES

Keramische Rohrwandplattensysteme in Wirbelschichtfeuerungsanlagen – Alternativkonzeption zur konventionellen Auskleidung mit Feuerfestbeton am Beispiel des EBS-Kraftwerks der Linz AG –

Markus Horn, Philipp Kolbitsch und Florian Madl

| | |
|------|--|
| 1. | Das Reststoff-Heizkraftwerk der Linz AG |
| 2. | STRABAG Wirbelschichtfeuerung – die Technologie..... |
| 3. | Bisherige Feuerfestauskleidungskonzepte in Wirbelschichtanlagen..... |
| 4. | Erfahrungen und Beobachtungen monolithischer Auskleidungskonzepte |
| 5. | Entwicklung von Plattensystemen für die Wirbelschichtfeuerung |
| 6. | Praktische Erprobung durch Versuchsfelder..... |
| 7. | Feuerfestkonzeption für das RHKW der Linz AG |
| 7.1. | Auskleidungskonzept |
| 7.2. | JuSySCFB – Wirbelbett |
| 7.3. | JuSySAir – Freeboard |
| 8. | Wirtschaftlichkeit von Plattensystemen versus Betonauskleidungen am Beispiel des RHKW der Linz AG |
| 9. | Zusammenfassung und Ausblick..... |
| 10. | Literaturverzeichnis..... |

Die Verwendung der Wirbelschichtfeuerung als Technologie zur energetischen Nutzung von Biomasse hat über die letzten Jahre hinweg eine kontinuierliche Zunahme als Alternative zur weitverbreiteten Rostfeuerungs-technik erfahren. Die Gründe für diese Entwicklung liegen zuweilen in der Wirkungsweise der Technologie, z.B. besserer Ausbrand, höhere Energienutzung und damit ein vorteilhafter Wirkungsgrad der Gesamtanlage als auch die Möglichkeit der einfachen Verbrennung von sandigen Brennstoffen wie Klärschlamm. Dem gegenüber stehen jedoch auch höhere Kosten und Investitionen für die Brennstoffaufbereitung bei stückigen und grobem Brennstoffen, die oft Wirbelschichtanlagen erst ab einer Leistung oberhalb von 40-50 MW wirtschaftlich werden lassen [1].

Die Nutzung der Wirbelschichttechnologie für deutlich problematischere Reststoffe wie Ersatzbrennstoffe (EBS) oder andere hochkalorische Reststofffraktionen aus der Abfallaufbereitung wurden bisher nur sehr selten oder wenn nur als Beimischung zur Biomasse in Wirbelschichtanlagen verbrannt.

Somit existieren in Europa nur wenige Wirbelschichtfeuerungsanlagen, die als EBS-Kraftwerke bezeichnet werden können. Es dominieren in diesem spezifischen Segment immer noch recht klar die Rostfeuerungsanlagen den Markt.

Mit der Planung und dem Bau des Reststoffheizkraftwerks (RHKW) der Linz AG wurde ein EBS-Kraftwerk basierend auf einer stationären Wirbelschicht mit einem EBS-Anteil von > 75 % errichtet.

Dass ein solch hoher Anteil an Reststofffraktion besondere Maßnahmen in vielen Bereichen einer Anlage im Gegensatz zu gängigen Brennstoffen wie Biomasse erfordert, ist eigentlich einleuchtend. Deshalb wurde ein besonderes Augenmerk bei der Planung dem Thema Korrosion in den heißgehenden Kesselbereichen gewidmet.

1. Das Reststoff-Heizkraftwerk der Linz AG

Das RHKW wurde am Standort des bestehenden Fernheizkraftwerks Linz-Mitte anstelle einer stillgelegten Altanlage errichtet. Die vorgeschaltete Reststoff-Aufbereitungsanlage wurde auf einem Nachbargrundstück am Tankhafen gebaut.

Die Anlage ist zur thermischen Entsorgung von

- Reststoffen (Hausmüll, Gewerbeabfall, etc.): max. 200.000 t/a,
- Klärschlamm (aus der benachbarten Kläranlage): max. 95.000 t/a
und
- Rechengut (aus der benachbarten Kläranlage): max. 15.000 t/a

ausgelegt und verfügt über sehr hohe Brennstoffflexibilität. Das Heizwertband des Brennstoffmix reicht von 7 bis 18 MJ/kg. Während das hohe Heizwertende durch einen hohen Anteil an Kunststoffen und Sperrmüll (hoher trockener Holzanteil) zustande kommt, ergibt das niedrige Heizwertende Lastfälle mit hohem Klärschlammanteil.

Die mehrstufige Abgasreinigung garantiert die Einhaltung aller behördlichen Abgaswerte und besteht aus den Komponenten:

- Zyklone zur Vorabscheidung von Flugasche (Reduktion der Asche auf < 5 g/Nm³),
- Gewebefilter zur Abscheidung der restlichen Flugasche,
- 2-stufiger Wäscher (sauer und basisch),
- Katalysator zur NO_x-Minimierung.

Die anfallende Wärme wird zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Dabei kann der erzeugte Frischdampf (44 bar, 420 °C) vollständig über die Dampfturbine (Entnahme-Kondensationsturbine) abgearbeitet werden oder alternativ vollständig oder teilweise in die Fernwärme eingespeist werden. Die Turbine verfügt des Weiteren über Anzapfungen auf der MD-Schiene (24 bar, z.B. für Luftvorwärmung) und ND-Schiene (2,5 bar, z.B. Hilfsdampf für Klärschlammeindüsung, Luftvorwärmung).

Da die Reststoffe über einen 500 m langen Rohrgurtförderer zum Kraftwerk transportiert werden müssen, wurden für die Sicherstellung der Betriebssicherheit Vorlagebehälter von $2 \times 70 \text{ m}^3$ installiert. Mit diesem Volumen kann der Betrieb bei Vollast und Regelbrennstoff bei Ausfall der Aufbereitung für etwa zwei Stunden aufrecht erhalten werden. Der Klärschlamm kann direkt vom LKW in zwei Annahmebehälter gekippt werden. Von dort wird der Schlamm über einen Störstoffabscheider in ein Lagersilo (500 m^3) gepumpt. Die Einbringung des Klärschlammes erfolgt ebenfalls mit einer Dickstoffpumpe und einer Zerstäubungsdüse (betrieben mit ND-Dampf). Das Rechengut wird nach der Lieferung geschreddert, mit Klärschlamm gemischt und ebenfalls mit einer Dickstoffpumpe und Zerstäubungsdüse in den Kessel gefördert.

2. STRABAG Wirbelschichtfeuerung – die Technologie

Die Feuerung besteht aus einer stationären Wirbelschicht mit Quarzsand als inertes Bettmaterial. Die Wirbelschicht ist direkt in den Dampferzeuger integriert. Die begrenzenden Seiten- und Stirnwände sind zum Schutz der Rohre vor Abrasion und Korrosion ausgemauert.

Der Brennstoff wird über vier Schurren, mit Rezirkulationsgas beschleunigt, in den Feuerraum eingeblasen. Jede Schurre hat einen eigenen Brennstoffweg vom Tagesbunker bis in den Kessel und kann völlig unabhängig von anderen Linien betrieben werden. Es werden je zwei Brennstofflinien von einem Tagesbunker gespeist.

Die Feinfraktion des Brennstoffes wird vom Abgas mitgerissen und verbrennt in der Nachbrennkammer. Die gröbere Fraktion (schwere) sowie Grobteile wie Glas und Metalle tritt ins Bett ein, wo es aufgrund des sehr hohen Wärmeübergangs zwischen Sandpartikeln und Brennstoff sehr schnell getrocknet und auf Betttemperatur aufgeheizt wird. Im Bett werden die Brennstoffpartikel aufgrund der hohen Erosion an den Sandpartikeln und dem hohen Druck im Partikel (durch Verdampfung der Feuchtigkeit in den Poren und Zellen) zerkleinert. Des Weiteren erfolgt die Ausgasung des Brennstoffs im Zuge der Aufheizung. Der zurückbleibende Koks wird mit dem zur Verfügung stehenden Sauerstoff der Bettfluidisierung verbrannt bzw. vergast (Oxidation zu CO).

Der Klärschlamm und das Rechengut werden mit Dickstoffpumpen bis in die Brennkammer gepumpt, wo sie dann mittels dampfbeaufschlagten Lanzen zerstäubt werden (je vier Lanzen für Klärschlamm und eine Lanze für Rechengut).

Der vollständige Ausbrand des Brennstoffes erfolgt in der Nachbrennkammer. Diese ist in verschiedene Zonen (Ebenen) aufgeteilt, welche völlig unabhängig voneinander mit Rezirkulationsgas und Frischluft beaufschlagt werden können. Die hierzu verwendete Luft und das Rezirkulationsgas werden vor Eindüsung in jeder Ebene auf Menge geregelt und miteinander vermischt. Eine spezielle Ausführung der einzelnen Düsenebenen gewährleistet eine optimale Durchmischung der Abgase mit dem Luft/Rezi-Gemisch, um den geforderten Ausbrand (CO bzw. Asche) sicherzustellen. Die Beimischung von Rezirkulationsgas zur Frischluft dient zur Vermeidung von Temperaturspitzen, welche bei Eindüsung von reiner Frischluft zwangsläufig entstehen.

Besonders bei problematischen Brennstoffen (hohe Cl-Gehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte) ist die Vermeidung von Temperaturspitzen sehr wichtig, um die Verschlackung der Brennkammer zu minimieren. Aufgeweichte bzw. geschmolzene Aschepartikel können an den Heizflächen in der Brennkammer kleben bleiben, den Wärmeübergang zur Rohrwand/Ausmauerung reduzieren und somit zu Korrosion des Rohrwandmaterials führen. Durch eine Vergleichmäßigung der Abgastemperaturen in der Brennkammer kann schon im Zuge der Verbrennung die Verschlackung reduziert/minimiert werden (Bild 1).

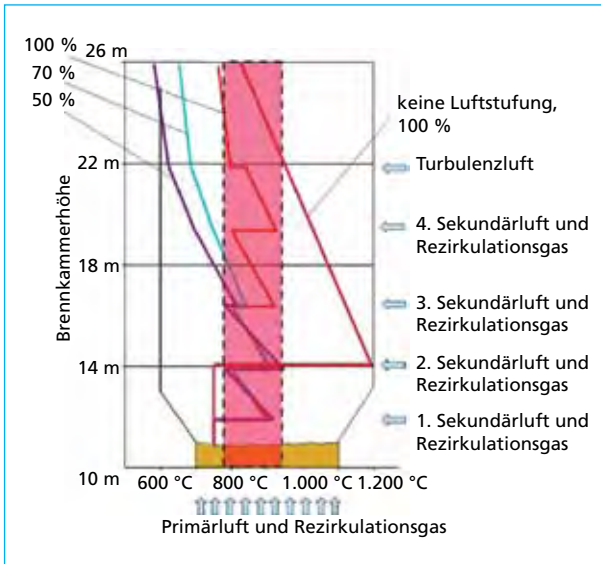


Bild 1:

Temperaturprofil über die Brennkammerhöhe

Die Regelung der Brennkammertemperaturen erfolgt über eine externe Steuerung. Diese sorgt für eine Homogenisierung des Temperaturprofils in der Brennkammer und trägt somit zur Verhinderung von lokalen Temperaturspitzen bei. Vor der Eindüsung in die Brennkammer wird Frischluft gezielt mit Rezirkulationsgas abhängig von den lokalen Temperaturen gemischt. In Zonen niedrigerer Brennkammertemperatur enthält diese Mischung mehr Frischluft, im Gegenzug jedoch weniger Rezirkulationsgas. Hohe lokale Temperaturen werden mit weniger Frischluft und mehr Rezirkulationsgas *gekühlt*. Dadurch kann ein sehr gleichmäßiges Temperaturprofil in der Brennkammer gefahren werden und die Brennkammerverschmutzung minimiert werden.

Diese Betriebsweise hat sich bei anderen Anlagen bereits sehr bewährt. Hier zeigt sich nach mehrmonatigem Betrieb keinerlei Verschmutzung an den Brennkammerwänden. Diese gilt sowohl für ausgemauerte Brennkammern als auch für Brennkammern ohne Ausmauerung. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die eingesetzten Brennstoffe (Rinde, Schlamm, Biomasse) ein wesentlich niedrigeres Verschlackungspotential als Restmüll aufweisen und die Verschlackung somit nur ansatzweise mit den Verhältnissen der Anlage in Linz verglichen werden können.

3. Bisherige Feuerfestauskleidungskonzepte in Wirbelschichtanlagen

Generell werden heutzutage stationäre Wirbelschichtanlagen, die mit behörnten Kesselwänden ausgestattet sind, mit unterschiedlichsten feuerfesten Massen zugestellt. Dabei findet fast immer eine Zweiteilung der Anlage in einem unteren, dem Wirbelbett, und in einem oberen Teil, dem Freiraum über dem Wirbelbett dem s.g. Freeboard, statt. Dieses Phänomen weisen mehr oder minder alle Wirbelschichtanlagen auf, unabhängig von der Art des Brennstoffs, der Düsenkonstruktion oder der Anlagenformgebung.

So wird der Wirbelbereich des Sandbetts meistens isolierend ausgelegt, damit es zur Zündung und zur Verbrennung des Mediums in diesem Bereich kommt. Eine zu starke Wärmeabfuhr könnte hier bei niederkalorischem Brennstoff zu schwerwiegenden Folgen beim

Verbrennungsprozess führen. Zusätzlich ist die erosive Beanspruchung auf das Feuerfest durch die Einwirkung des wirbelnden Sandes im Wirbelbett deutlich höher als in anderen Teilen der Anlage. Nur in der zirkulierenden Wirbelschicht trifft man noch auf andere ähnlich oder höher belastete Anlagenbereichen wie z.B. dem Rückführzyklon oder dem Aschekühler. Aus diesem Grund werden für die Wirbelbettsektion oft abriebsfeste- und temperaturwechselbeständige feuerfeste Massen und Betone ausgewählt. Dabei wird weniger Wert auf die Wärmeleitfähigkeit der Produkte gelegt, weil einfach die mechanischen Eigenschaften deutlich höhere Priorität besitzen.

Anders sieht die Situation im Bereich des Freeboards aus. Hier treten die Wärmeleitfähigkeit und die chemische Beständigkeit der feuerfesten Auskleidung viel stärker in den Fokus des technischen Interesses. Dies einfach deshalb, weil oft durch die Sekundärlufteinwirkung die Temperaturen deutlich ansteigen und die Verbrennungstemperatur kontrolliert werden muss und weil in diesen Zonen je nach Zusammensetzung des Brennstoff erste Verbrennungsprodukte mit korrosivem Potential entstehen. Somit besitzt dieser Bereich der Anlage und damit auch die feuerfeste Auskleidung eine deutliche höhere Funktion für den Verbrennungsprozess.

Dabei liegt oft das technische Hauptaugenmerk auf der Wärmeleitfähigkeit dieser Produkte. Daher wurden in der Vergangenheit oft feuerfeste Massen mit unterschiedlichem Anteil an Siliziumcarbid (SiC) als Teilrohstoffkomponente des Produkts eingesetzt. Je nach Anteil an SiC kann somit die Wärmeleitfähigkeit des Produktes beeinflusst werden. Das Rohstoffgrundgerüst besteht generell aus einer Basis von Schamotte im niederwertigen Segment bis hin zu Korund und kalzinierten Tonerden im Hochwertigen. Somit kann eine Wärmeleitfähigkeitsspanne von 1,0 bis max. 8,0 W/m•K erreicht werden. In der Regel reicht diese Spanne für die notwendige verfahrenstechnische Auslegung der Anlage aus. Beispielfhaft sind in der Tabelle 1 einige feuerfeste Massen aufgezeigt, welche in Wirbelschichtanlagen gewöhnlich eingesetzt werden.

Tabelle 1: Feuerfeste Massen für den Einsatz in Wirbelschichtanlagen

| Materialtyp | Chemische Zusammensetzung | | | | KDF | RD | WLF | Abrieb |
|---------------|--------------------------------|------------------|------|-----|---------|--------------------|---------|-----------------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | SiC | CaO | | | | |
| | % | | | | MPa | kg/dm ³ | W/m • K | cm ³ |
| Schamotte | 45,0 | 45,0 | – | 4,0 | 40 – 65 | 2,20 | 1,0 | < 12 |
| Schamotte/SiC | 50,0 | 40,0 | 5,0 | 4,0 | 50 – 75 | 2,35 | 1,5 | < 12 |
| Tonerde/SiC | 25,0 | 15,0 | 55,0 | 2,0 | 60 – 90 | 2,40 | 5,0 | < 10 |
| SiC | 8,0 | 5,0 | 85,0 | 2,0 | 60 – 90 | 2,45 | 7,5 | < 10 |

Aufgrund der Vielfältigkeit der unterschiedlichen Rohstoffkomponenten, welche sich am Markt befinden, bieten sich damit auch für Ingenieure der Verfahrens- und Wärmetechnik vielfältigste Möglichkeiten Feuerfestwerkstoffe zur Auslegung der Kessels einzubeziehen.

Nach unseren Erfahrungen wird jedoch zu oft zu viel Wert auf die explizite Kommastellen der Wärmeleitfähigkeit gelegt. Nicht nur aufgrund unterschiedlicher Messverfahren für die Ermittlung von Wärmeleitfähigkeiten an feuerfesten Werkstoffen können signifikante Unterschiede entstehen, sondern auch selbst bei gleichen Messverfahren sind Fehlertoleranzen von bis zu 25 % nicht selten.

Aus diesem Grund ist die praktische Erfahrung von Fachleuten deshalb unerlässlich, um mit dieser die Wärmeleitfähigkeit eines Produkts richtig abzuschätzen. Der reine Glaube an die Unfehlbarkeit von Technischen Datenblättern sollte deshalb nicht alleinig als

Grundlage zur Auslegung dienen. Auch wäre es ein Fehler nur anhand von SiC-Werten die Wärmeleitfähigkeit der Materialien zu bestimmen, da auch unterschiedliche Bindesysteme zu unterschiedlichen Eigenschaftswerten bei der Wärmeleitfähigkeit führen.

So besitzen beispielsweise chemisch-gebundene SiC-Betone mit 90 % SiC-Gehalt geringere Wärmeleitfähigkeiten als Beton mit Ultra-Low-Cement-Bindung (CaO-Anteil >1,0 %) mit 80-85 % SiC. Dies zeigt beispielhaft wie variantenreich und vielfältig die Feuerfestproduktpalette und damit die Auslegung der Auskleidung für Wirbelschichtanlagen wirklich ist.

Somit finden wir heute in stationären als auch zirkulierenden Wirbelschichtanlagen so ziemlich alles was das Periodensystem und die Erdgeologie für feuerfeste Rohstoffe hergibt.

Wie schwer es für Anlagenbauer und Betreiber daher ist, die richtige dem Anwendungsfall angepasste Produktauswahl zu treffen, ist somit leicht nachvollziehbar.

Zusätzlich kommt zur richtigen Wahl der Feuerfestmasse für die zu erwartende Beanspruchung natürlich auch noch die Wahl der richtigen Verankerung an den Rohrwänden dazu. Hier hat sich ausgehend von der klassischen Kesselstiftverankerung (Bild 2) in den letzten Jahren die Verankerung mit Rundstahlankern mehr und mehr durchgesetzt. Dies maßgeblich aufgrund der deutlich geringeren Kosten für die Verschweißung der Rundstahlanker auf dem Rohrsteig. Dabei sind nicht nur die Kosten bei der Erstausrüstung der Anlage zu sehen, sondern insbesondere auch im Falle der Instandhaltung. Aber auch bei den Rundstahlankern gibt es technische Unterschiede.



Bild 2: Kesselstiftverankerung



Bild 3: 3-D Rundstahlanker

So haben sich 3D-Rundstahlanker gegenüber den gängigen V-Ankern durchgesetzt. Dies maßgeblich deshalb, weil sie mit den Ankerenden stärker über den Scheitel des Kesselrohrs reichen und weil sie aufgrund des verdreht-gespreizten Designs eine höhere Ankerdichte an der Rohrwand erlauben. Somit können auch sehr dünne Auskleidungen noch adäquat über dem Rohrscheitel verankert werden.

Zusammenfassend findet man heutzutage im Bereich von stationären Wirbelschichtanlagen feuerfeste Massen, welche weitestgehend den chemischen als auch den mechanischen

Anforderungen gewachsen sind. Problematisch ist und bleibt jedoch die Tatsache, dass die Anlagen generell in einem niedrigen Temperaturfenster $< 950\text{ °C}$ operieren. Dadurch kommt es nie zu einer wirklichen keramischen Versinterung der Materialien, so dass die Bindung und die Festigkeit ausschließlich von der Qualität der chemischen oder hydraulischen Bindung abhängig sind.

Generell nicht zu vergessen ist bei noch so guter Materialauswahl, Auslegung und Design, die Unsicherheitskomponente der Verarbeitung der Materialien. Waren in der Vergangenheit in ihrer Verarbeitung relativ *gutmütige* Massen ausreichend, haben sich durch die komplexeren Brennstoffe wie EBS mehr und mehr schwieriger zu verarbeitende Feuerfestmassen durchgesetzt. Diese bergen in letzter Konsequenz natürlich auch immer ein höheres Fehlerrisiko bei der Verarbeitung dieser Produkte. Sei es aufgrund einer höheren Sensitivität des Abbindens bei niedrigen oder hohen Umgebungstemperaturen oder auch aufgrund einer erheblich engeren Toleranz des Anmachwassergehalts, was wiederum leicht zu Fehldosierung unter Baustellenbedingungen führen kann.

4. Erfahrungen und Beobachtungen monolithischer Auskleidungskonzepte

Ist im Bereich der Hausmüllverbrennung mit Rostfeuerung seit Jahren, zumindest für Zentral-europa, klar zu erkennen, dass sich ein allgemeiner Standard für die Feuerfestauskleidung solcher Anlagen etabliert hat, ist dies im Bereich der stationären Wirbelschicht noch anders.

So haben sich in Deutschland bei diesem Anlagentyp zu mehr als 90 % die Auskleidung mit Rohrformsteinen s.g. Platten durchgesetzt. Damit stellt sich im Falle der Planung einer Neuanlage eigentlich nur noch die Frage nach dem Lieferant des Plattensystems. Die Werkstofffrage oder die generelle Frage, ob Massen oder Platten verwendet werden, stellt sich für die Rostfeuerung eigentlich nur selten. Dies gilt zumindest für Anlagen, die dem europäischen Standard entsprechen und bei denen auch mit einem gewissen Anteil an gewerbemüllähnlichen oder hochkalorischen Brennstoffen zu rechnen ist.

Leider hat sich für die Auskleidung von stationären Wirbelschichtanlagen ein solcher *Industriestandard* in Bezug auf die feuerfeste Auskleidung noch nicht entwickeln können.

Warum dies so ist liegt sicherlich auch daran, dass dieser Anlagentyp bisher maßgeblich nur zur Behandlung von Klärschlamm verwendet wurde und erst mit Einführung des *Erneuerbaren Energiegesetzes* wirtschaftlich interessant für die Verbrennung von Biomasse geworden ist. Dies zumindest löste mit Anfang 2000 in Deutschland eine rege Entwicklung und den Bau solcher Anlagen an. Somit wurden die Feuerfesterfahrungen der Vergangenheit auf die Neuanforderungen einer höheren Wirtschaftlichkeit übertragen, so dass unterschiedliche Auskleidungskonzepte zu finden sind.

Beobachtungen unterschiedlich ausgekleideter Wirbelschichtanlagen zeigen somit ein ebenso heterogenes Bild in Bezug auf ihre Performance und Haltbarkeit in Bezug auf die Feuerfeste Auskleidung.

Meist aus wirtschaftlichen Zwängen heraus wurde versucht, die Auskleidung so dünn wie möglich zu gestalten, damit möglichst viel Wärme abgeführt werden konnte aber noch die entsprechende Verweilzeit von > 2 Sekunden bei 850 °C eingehalten wurde. Es fiel dadurch meist die Wahl auf eine chemisch gebundene Spritzmasse mit hohem Anteil an Siliziumkarbid (SiC). Diese Masse wurde in der Vergangenheit bis Mitte der neunziger Jahre für die Abfallverbrennung standardmäßig verwendet. Generell somit ein Produkt was seit vielen Jahren im Einsatz ist und sich auch in Grenzen bewährt hat. Die Grenzen

des Produkts wurden eigentlich mit den steigenden Korrosionsschäden an Verankerungen sichtbar. Durch die recht hohe Porosität der chemisch-gebundenen SiC-Massen, kam es zu einer schnelleren Korrosion der Anker. Erst mit der Einführung von gebrannten nitrit-gebundenen SiC-Platten wurde hier eine merkbliche Verbesserung erzielt. Da aber das Korrosionsthema bei einer Biomasseverbrennung aufgrund der geringen Chlor-Gehalte unerheblich ist, konnte die Wahl auf eine SiC-Masse fallen.

Trotz der richtigen Wahl des Feuerfestprodukts kam es auch in einer vermeintlich harmlosen Verbrennungsumgebung zu teils doch eklatanten Schäden.

Dies war und ist auch heute noch maßgeblich auf drei Faktoren zurückzuführen. Als ersten Faktor kann die sehr dünne Auskleidung von zum Teil nur 25-30 mm über Rohrscheitel angeführt werden. Ein weiterer Faktor ist die geringe Anzahl an Verankerungen von < 80 Stück/m² und letzteres die Verarbeitung des Materials.

Dabei ist zum einen eine ausreichende Umgebungstemperatur für die Verarbeitung der chemisch gebundenen SiC-Masse wichtig, wie auch später eine zeitnahe Trocknung nach der Verarbeitung, als auch Montagepersonal, welches den Umgang mit solchen sensiblen Massen kennt.

Die Fehlerquote aus einer unsachgemäßen Verarbeitung des Materials beim Spritzen kann bzw. muss hoch angesetzt werden, da letztlich alle physikalischen Eigenschaften des Produkts ausschließlich in der Hand des Verarbeiters bzw. Düsenführers liegen. Dem Laien ist dabei sicherlich nicht bewusst, dass der Arbeiter an der Spritzdüse während Sekunden parallel darauf zu achten hat, dass der Förderdruck, der Wasserdruck und die Menge des chemischen Binders immer optimal eingestellt sein müssen. Sein einziges Entscheidungskriterium dabei ist das Spritzbild, soll heißen, der Glanz der aufgespritzten Oberfläche, der Abprall des Spritzguts und die Menge des Staubs. All dies sind rein subjektive und erfahrungsbasierte Kontrollparameter, die nur vom gut geschulten Verarbeiter bewertet werden. Dem gegenüber kann angeführt werden, dass es entsprechende Möglichkeiten der Qualitätssicherung gibt. Dies z.B. mittels Anfertigung von Spritzproben etc. Es täuscht aber nicht darüber hinweg, dass dies auch nur eine Momentaufnahme ist von einem acht- bis zehnstündigen Arbeitstag. Somit birgt gerade die Einbringung mittels des Spritzverfahrens immer ein nicht unerhebliches Fehlerpotential. Demgegenüber steht aber die unschlagbar schnelle und günstige Form der Einbringung von feuerfestem Material.

Somit hat sich in der Vergangenheit immer wieder gezeigt, dass eine Vielzahl von Schäden am Feuerfest auf eine unsachgemäße Verarbeitung beim Spritzen zurückzuführen ist. Neben solchen rein auslegungsbedingten Fehlern wie zu wenig und/oder wenig geeigneten Ankern.

Was für den Fall von Spritzbetonen gilt, gilt auch bei der Verwendung von sogenannten Gieß- und Vibriermassen. Diese Produkte werden in den meisten Fällen bei der Notwendigkeit einer erhöhten Abriebsbeständigkeit verwendet. Dies ist meist im Wirbelbett wichtig und zwar wegen der erhöhten Geschwindigkeit und dem hohen Feststoffanteil bedingt durch das Sandbett. Größtes Fehlerpotential ist hier eine ungenaue Wasserdosierung sowie eine nicht ausreichende Verdichtung der Materialien. Beides zeigt sich unmittelbar in einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften im Besonderen der Abriebsbeständigkeit.

Immer wieder feststellbar ist auch der voreilende Verschleiß bzw. die Auswaschung im Bereich der Arbeitsfugen (Bild 4).

Dies liegt hauptsächlich daran, dass sich Feinanteile des Betons beim Einbringen und Vibrieren an der Oberfläche absetzen. Dieser Feinanteil wird aufgrund seiner geringen Festigkeit als erstes durch die Erosion ausgewaschen und führt zum voreilenden Fugenverschleiß. Im zyklischen Betrieb einer Anlage können sich nun genau an diesen Stellen Sand und Staub

in diese Fugen einlagern und kumulieren. Dies kann dann im schlimmsten Falle zu einer unterdrückten Dehnung führen und zum Abscheren eines gesamten Betonfeldes. Somit ist eine gute und regelmäßige Fugenpflege für diese Art von Zustellung wichtig und trägt entscheidend zur Lebensverlängerung der Auskleidung bei.



Bild 4:

Ausgewaschene Arbeitsfuge

Nicht zu unterschätzen ist auch bei der Verwendung von LC-Gießbetonen der enorme Aufwand für den Form- und Schalungsbau. Je nach Anlagengeometrie kann dieser Aufwand einen Großteil der Montagekosten ausmachen. Dies aber nicht nur aus Sicht der Montagekosten, sondern auch oft von der zeitlichen Dauer hergesehen.

Grundsätzlich unterliegen sowohl das Spritzen als auch das Gießen stark der Qualität der Verarbeitung und somit unausweichlich entsprechenden Schwankungen. Es wird mehr und mehr versucht, durch verstärkte und eine weitaus intensivere Qualitätsüberwachung einer Reduktion der Qualität entgegen zu wirken. Da in der Vergangenheit Schäden immer wieder auf eine mangelnde Verarbeitung zurückzuführen war.

Es muss aber auch angemerkt werden, dass es die Natur der Sache ist, dass die Verarbeitung von ungeformten Feuerfestprodukten (Massen) immer ein Resultat der Randbedingungen, wie Umgebungstemperatur, Erfahrung des Installateurs, Qualität der Schalung, Mischzeit etc. ist.

Nur wenig beleuchtet wurden bis dato die Mängel, die durch eine ungenügende Auslegung und durch Fehlinterpretation der Randbedingungen oder durch nicht vorliegendes Expertenwissen entstehen. Oft werden die Anlagen in Anbetracht der kommerziellen Nöte aus Sicht des Feuerfests schwach ausgelegt.

Was bedeutet dies im Einzelnen:

- es werden oft Betone und Massen verwendet die keine ausreichende Abriebsbeständigkeit haben,
- gewöhnliche oder günstige Bindsysteme,
- keine ausreichende Alkalibeständigkeit der Bindephase,
- es werden Spritzbetone verwendet wegen günstigerer Montage,
- es wird an der Verankerungsdichte oder der Stahlqualität der Verankerung gespart,

- es wird an Auskleidungsstärke (Material) gespart,
- keine oder nur eine unzureichende Trocknung wird ausgeführt,
- die Wärmeleitfähigkeit wird als wichtiger betrachtet als die chemisch-mechanischen Materialeigenschaften.

In der Summe der Nöte ergibt sich somit ein komplexes Fehlerpotential, welches in der Vergangenheit immer wieder zu den unterschiedlichen Feuerfestschäden geführt hat. Leider meist schon im ersten Betriebsjahr.

5. Entwicklung von Plattensystemen für die Wirbelschichtfeuerung

Wie ist es nun zur Entwicklung von Plattensystemen für die Wirbelschichtfeuerung gekommen. Sicherlich gibt es einen guten Grund und der liegt schlicht in den guten Ergebnissen von Plattenauskleidungen bei Rostfeuerungsanlagen in der Abfallverbrennung. Seien es geklebte (vermörtelte), hintergossene oder hinterlüftete Rohrformplatten [2]. Es gibt heute nur noch wenige Anlagen, die nicht mit Plattensystemen ausgekleidet sind. Dies einfach aufgrund der deutlich besseren Standzeiten im Vergleich zu Betonen und auch insbesondere wegen der geringeren Instandhaltungskosten. So liegt der Aufwand für das Entfernen und dem Wiedereinbau eines konventionellen Gießbetons oder auch von SiC-Massen bei mehr als den doppelten Kosten im Vergleich zu denen von Plattensystemen [3]. Im Bereich des aktiven Korrosionsschutzes konnte mit der hinterlüfteten Platte sogar ein System entwickelt werden, welches als einziges keramisches Schutzsystem nachhaltig die Korrosion an den Verankerungselementen und der Rohrwand verhindert. [2].

In Wirbelschichtanlagen wurden bereits Ende der neunziger Jahre geschraubte und geklebte Platten eingebaut, die sich auch noch heute im Einsatz befinden. Dabei handelte es sich jedoch in der Regel um rein kohlebefeuerte Kessel.

Ein weiterer technologischer Sprung von Plattenauskleidungen in der Wirbelschichtverbrennung konnte erst wieder im Jahre 2009 erzielt werden.

Der Grund hierfür lag darin, dass in einer zirkulierenden Wirbelschicht mit berohrten Ofenwänden massive Feuerfestprobleme aufgetreten waren. Wir waren mit einer Kombination aus mechanischen (Abrieb) und chemischen Verschleiß (Abplatzungen) konfrontiert. Zusätzlich war eine massive Ankerstiftkorrosion zu beobachten (Bild 5). Alles zusammen in Kombination hat des Öfteren zu *Rohrreißen* und zu einem entsprechenden Anlagenstillstand geführt.

Wichtig ist zu erwähnen, dass die Anlage ausschließlich auf aufbereitetem Ersatzbrennstoff gefahren wird. Damit ist prinzipiell schon das Grundübel für die feuerfesttechnischen Probleme benannt.

Die hohen Chlorfrachten des EBS-Brennstoffs haben dazu geführt, dass die Verankerung einer starken Chlorkorrosion ausgesetzt wurde, die zu einer erheblichen Abzehrung der Verankerung innerhalb von nur 8.000 Betriebsstunden geführt hat. Das Eindringen der niedrigschmelzenden Alkalisalze in das Feuerfest wiederum hat zu einer signifikanten Reduktion der Porosität in den vorderen Schichten des Feuerfests geführt und damit zu einem Rohdichtesprung innerhalb des Betongefüges. Dies wiederum inklusive des zusätzlichen Drucks, verursacht durch die korrodierten Verankerungsspitzen, haben die vordersten Betonschichten, unterstützt durch vielen schnellen An- und Abfahrzyklen, abscheren bzw. abplatzen lassen (Bild 6).



Bild 5:

Ankerstiftkorrosion durch Chlor-alkalisalze

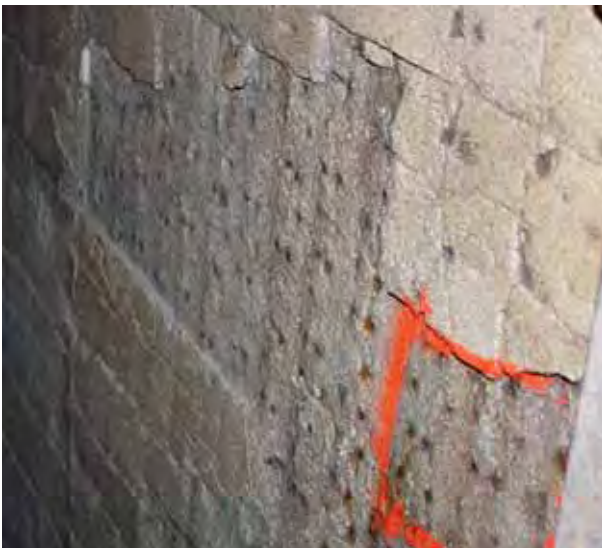


Bild 6:

Betonabplatzung durch Salzkondensation

Auch können schwerwiegende Schäden durch die Schwächung der Bindematrix des Betons entstehen und dadurch zum völligen Versagen der Ausmauerung führen (Bild 7).

Im Zuge der vorgefundenen Schadensphänomene wurde mit der Erfahrung und dem notwendigen Expertenwissen aus der Abfallverbrennung ein Plattensystem entwickelt, welches die vorhandenen Probleme zu lösen in der Lage sein konnte.

Dabei stellte sich als erstes die Frage, welche wichtigen Haupteigenschaften dieses System mitbringen muss, um unter den spezifischen und schwierigen Bedingungen zu bestehen.



Bild 7:

Schwächung der Bindephase durch chemischen Angriff und Abtrag der Verankerung durch die Kombination von Korrosion und Erosion

Haupteigenschaftsmerkmale eines Plattensystems für den Einsatz in EBS-befeuerten Wirbelschichtanlagen:

- hohe Abriebsbeständigkeit von Platte und Fuge,
- hohe Beständigkeit gegen Alkalisalzinfiltration,
- guter Schutz der Verankerung vor korrosivem Angriff,
- hohe Variabilität im Bereich der Wärmeleitfähigkeitseigenschaften,
- einfache, schnelle und kostengünstige Montage und Demontage.

Diese Merkmale führten zur Entwicklung des Plattensystems JuSyS CFB für Wirbelschichtanlagen. Damit ist es gelungen, ein Produkt zu entwickeln, welches genau die Eigenschaften in sich vereint, die es erlauben, auch schwierige Brennstoffe wie EBS und die mechanisch anspruchsvollen Bedingungen in der Wirbelschichtfeuerung bei akzeptablen Standzeiten zu erlauben.

Es hat sich im Rahmen der Entwicklung gezeigt, dass ein gebranntes, keramisch gesintertes Bauteil immer deutlich bessere physikalische Eigenschaften aufweist, als reine ungeformte nicht gebrannte Produkte wie Massen und Betone.

Beispielhaft konnte dies recht beeindruckend an einer Probe für die Abriebsbeständigkeit eines freifließenden SiC-Betons gezeigt werden. So besitzt dieser Beton lt. Herstellerdatenblatt einen Abrieb von 5 cm^3 bei 815 °C nach ASTM C704. Es wurde ein Abriebstest gemäß genannter Norm durchgeführt, wobei ein Abriebswert von $18,6 \text{ cm}^3$ ermittelt wurde. Zusätzlich wurde aber auch ein Probekörper bei 1.200 °C gebrannt und getestet. Bei dem höher gebrannten Probekörper lag nach Brand der Abriebswert bei $5,56 \text{ cm}^3$ (Bild 8).

Neben der Tatsache, dass Herstellerdatenblätter meist deutlich zu positive Werte angeben, zeigt sich hier sehr gut und nachvollziehbar, wie sehr sich gerade die physikalischen Eigenschaften von Betonen bei einem Brand $> 1.200 \text{ °C}$ positiv verändern. Nun herrschen aber in der Regel in Wirbelschichtanlagen niemals Temperaturen $> 1.000 \text{ °C}$. Somit kann keine noch so gute Masse oder ein noch so guter Beton jemals seine wirklichen Fähigkeiten erreichen. Es handelt sich somit immer nur um einen Kompromiss eines ungebrannten Produkts, bei dem sich der Betreiber immer im Klaren sein muss, dass es sich nur um ein halbfertiges Produkt handelt.



Bild 8: Test der Abriebsbeständigkeit eines freifließenden SiC-Feuerbetons bei unterschiedlichen Brenntemperaturen

Wie bereits zuvor erwähnt, sind beim Einsatz auf Rohrwänden die Produkte nur einem Temperaturgradienten von 250 bis max. 950 °C ausgesetzt und somit zum Teil nicht vollständig hydraulisch oder auch chemisch abgebunden. Dadurch befinden sich die Betone an der Rohrwand teilweise noch im *Rohzustand* und in einer metastabilen Phase in Bezug auf die Reaktionsfähigkeit ihrer Bindung.

Im Gegensatz dazu zeigt sich dadurch letztendlich der enorme technische Vorteil von gebrannten Produkten. Es handelt sich um ein definiert gefertigtes und gebranntes Feuerfestprodukt, mit einer voll ausreagierten und versinterten Bindung, dessen Eigenschaften über entsprechende Tests vor dem Einbau inspiziert und kontrolliert werden können.

Insbesondere, wenn eine verbesserte Alkalibeständigkeit kombiniert mit einer hohen Abriebsbeständigkeit benötigt wird, weisen gebrannte, feuerfeste Produkte deutlich bessere Eigenschaften als ungebrannte Werkstoffe auf. So existiert im Hause J+G das technologische Wissen, mittels einer *Insitu-Versiegelung* (JuRA⁴-Technologie) während des Produktionsbrands die Porositäten von gebrannten Fertigteilen aus Feuerbeton zwischen 30-50 % gegenüber dem ungebrannten Beton zu reduzieren. Durch diesen *Versiegelungseffekt* wird die Alkalibeständigkeit um ein Vielfaches erhöht, obwohl es sich eigentlich um ein und dasselbe Produkt handelt. Anhand eines gängigen Alkalitiegeltests lässt sich sehr gut der Versiegelungseffekt der Poren darstellen. Durch die deutliche Reduktion der offenen Porosität im Fertigteile von absolut < 8 Vol.-% (Bild 8/Probe A) im Gegensatz zu unbehandelten Bauteilen von etwa 13-16 Vol.-% (Bild 9/Probe E) sind die dünnflüssigen Salze nicht in der Lage, in den Werkstoff einzudringen. Gleiches gilt natürlich auch für flüchtige Alkalisalzverbindungen im Betrieb einer Anlage. Somit bildet sich eine Art *Passivierung* gegen Alkaliangriff im Feuerfestprodukt aus und dies über die gesamte Betriebstemperatur hinweg.

Wie bei Probe E gut erkennbar, führt die Alkalisalzinfiltration und die mineralogische Veränderung durch die Einlagerung der Alkalien zu einer deutlichen Volumenausdehnung und zu einem Reissen oder Abplatzen des Feuerfests. Dieser Effekt kann bei nicht Ausreagieren bzw. ungesinterten Produkten bereits bei 700 °C in der Bindephase von Betonen beginnen und schädigt je nach mineralogischer Zusammensetzung die Aluminosilikat-Phasen (z.B. Schamotte, Andalusit, Sillimanit) bis zu einer Temperatur von 1.400 °C beträchtlich.

Neben der Alkalibeständigkeit steigt aber auch die Abriebsbeständigkeit des Materials durch die Technologie und die keramische Sinterung beträchtlich. Somit können genau die beiden Eigenschaften gezielt optimiert werden, die für den Einsatz in Wirbelschichtanlagen erforderlich sind.



Bild 9: Alkalitest an Steinen mit Insitu-Infiltrationsschutz (JuRA⁴-Technologie)



Bild 10: Alkalitest an Steinen ohne Insitu-Infiltrationsschutz (JuRA⁴-Technologie)

Die geschilderten Schadensphänomene und die daraus folgenden Entwicklungen zeigen sehr anschaulich die Grenzen für den Einsatz von ungeformten, monolithischen, feuerfesten Werkstoffen für den Einsatz in berohrten Wirbelschichtkesseln. Die praktikabelste Lösung ist daher, wie bereits angedeutet, ein Rohrwandschutzsystem in Form von gebrannten keramisch gesinterten Platten.

Nachdem die Vorteile vorgebrannter Bauteilen offensichtlich sind, galt es nun in der Entwicklung eines wirbelschichttauglichen Plattensystems eine konstruktive Lösung zu finden. Hier fiel die Wahl auf eine Kombination aus bewährter Verankerung und einer Fugenausbildung die den erosiven Bedingungen in den Anlagen standhalten kann. Auch hier wurde auf ein bewährtes System der Fugenausbildung zurückgegriffen. Einziger Unterschied war der Einsatz einer hoch abriebsfesten, chemisch gebundenen Masse. Somit konnte der Anteil von ungebrannten Produkten, welche direkt im Feuer stehen, auf einen Wert von 5-10 % der Gesamtauskleidung reduziert werden. Die Platte selber wird vollflächig mit einem Feuerfestkitt an der Rohrwand vermörtelt. Die Fixierung erfolgt über einen Haltestift und eine entsprechende Halteöse, die an dem Rohrwandsteg anschweißt ist (Bild 11).

Die Plattengeometrie, die Fugenausbildung und die Art der Verankerung lassen ein weites Spektrum an geometrischer Formgebung für die Zustellung mit Platten zu. Somit kann selbst eine komplizierte Geometrie des Kessels, wie in Bild 11 dargestellt, zugestellt werden. Es besteht nur noch in wenigen Bereichen einer Anlage die Notwendigkeit einer Ausführung in Beton oder Masse. Des Weiteren ist auch noch anzumerken, dass eine Anlage generell stärker belastete Zonen und weniger belastete Zonen aufweist. Deshalb kann auch variabel entschieden werden, wo der Einsatz von Platten und der von Beton technisch und wirtschaftlich praktikabel ist. Eine generelle Verteufelung von ungeformten Produkten wäre falsch, es müssen nur die Konsequenzen offengelegt und diskutiert werden.



Bild 11:

Aufbau des Rohrwandplattensystems JuSyS CFB

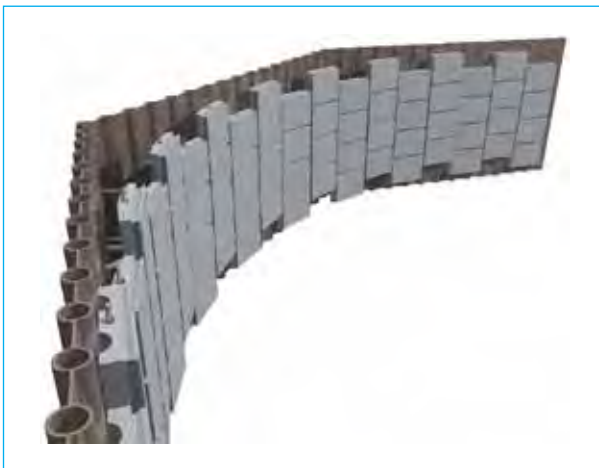


Bild 12:

Geometrische Optionen mit JuSyS CFB

6. Praktische Erprobung durch Versuchsfelder

Erste praktische Versuche mit JuSyS CFB wurden in einer zirkulierenden Wirbelschichtanlage mit hohem EBS-Anteil im Brennstoff durchgeführt. Dazu wurde einer der am stärksten belasteten Zonen in Bezug auf erosiven und korrosiven Angriff in der Anlage gewählt. In Bild 13 lässt sich gut erkennen, dass unterschiedlichste Betone in diesem Bereich bereits nach weniger als 8.000 Betriebsstunden massive Haltbarkeitsdefizite aufgewiesen haben.



Bild 13: Massive Haltbarkeitsdefizite verschiedener Betone

Um für diesen Bereich eine deutliche Haltbarkeitsverbesserung zu erreichen, wurden ein großflächiges Testfeld mit JuSyS CFB eingebaut (Bild 14). Als Feuerfestwerkstoff wurde ein tonerreicher Versatz mit hoher Abriebs- und Alkalibeständigkeit sowie guter Temperaturwechselbeständigkeit ausgewählt.



Bild 14:

Testfeld mit *JuSyS CFB*

Nach mehr als 12.000 Betriebsstunden konnte das Testfeld begutachtet werden. Es hat sich gezeigt, dass es im Vergleich zu allen vorherigen Zustellungen eine nicht erwartete Performance aufweist (Bild 15). Es ist ein oberflächlicher erosiver Angriff an den Platten erkennbar. Ebenfalls lässt sich eine leichte Fugenauswaschung erkennen. Weder die Fuge noch die Platte haben aber in irgendeiner Weise einen beunruhigenden Schichtstärkeverlust aufzuweisen. Auch hat sich die Wahl eines kleinen Plattenformats (etwa 250 x 250 mm) als vorteilhaft erwiesen, da hierdurch keine einzige Platte gerissen ist. Die Fugen sind aufgrund ihrer vergleichsweise großen Breite sehr gut mit den Platten verzahnt und weisen nur geringe Schwindungshaarisse auf.



Bild 15: Testfeld mit *JuSyS* CFB

An einer ausgebauten Platte kann man deutlich die massive erosive Beanspruchung an der Oberfläche der Platte erkennen (Bild 16). Hier ist anzumerken, dass die Platte im Zuge produktionsbegleitender Tests eine Abriebsbeständigkeit von $2,79 \text{ cm}^3$ nach einem Brand bei $> 1.250 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgewiesen hat. Des Weiteren lässt sich auch gut erkennen, dass der Haltebolzen inkl. Halteteil kaum Korrosionsangriff aufweist. Dies maßgeblich durch eine gute Abdichtung der Fuge vor aggressiven Abgasmedien mit einem zusätzlichen keramischen Abdichtstreifen. Aktuell besitzt das Testfeld eine Laufzeit von über 16.000 h. Seit dieser Zeit ist es zu keinerlei Schäden, Abplatzungen oder ähnlichen Ereignissen gekommen. Somit konnte mittels des Testfeldes nachgewiesen werden, dass diese Auskleidung gerade in den hochbeanspruchten Anlagenzonen das Mittel der Wahl für die Zustellung von Wirbelschichtanlagen ist.

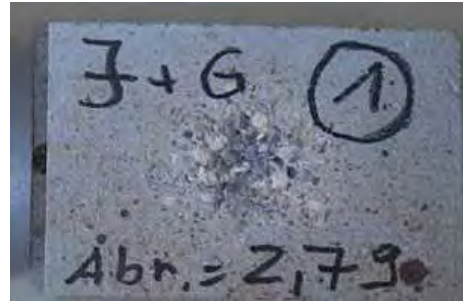


Bild 16:

Platte nach > 12.000 h Einsatz und Ergebnis des produktionsbegleitenden Abriebtests

7. Feuerfestkonzeption für das RHKW der Linz AG

Was unterscheidet nun die Feuerfestauskleidung der Wirbelschichtanlage der Linz AG im Vergleich zu anderen Anlagen vergleichbaren Typus. Es ist eigentlich nur ein Detail und dies liegt in einer konsequenten Substitution von monolithischen, feuerfesten Massen hin zu einer Plattenauskleidung wie sie in der Abfallverbrennung üblich ist.

Was sich in kurzen Worten einfach zusammenfassen lässt, spiegelt aber nicht die Entscheidungswege und die Dauer bis zur endgültigen Realisierung wieder. Dieser Entscheidungsfindungsprozess über die einzelnen Vertragsstufen hinweg nahm sehr viel Zeit in Anspruch.

Die technischen Argumente waren recht schnell ausgetauscht und jedem der Beteiligten war klar, dass für die Besonderheit des hohen EBS-Anteils im Brennstoff der Anlage in Linz eine Plattenauskleidung die bessere Wahl sein würde als eine reine monolithische Auskleidung. Es galt aber neben den technischen Themen, auch die ökonomischen Zwänge zu lösen.

Diese ergaben sich schlicht aus der Tatsache, dass im Angebotsstadium eine konventionelle Auskleidung mit einem abriebsfesten Gießbeton im Wirbelbereich und einer SiC-Spritzmasse im oberen Bereich geplant war und so auch der Auftrag zwischen der Linz AG und STRABAG-Energieanlagen erteilt wurde.

Erst im Stadium der endgültigen Planungskonzeption kamen mehr und mehr Zweifel auf, ob diese Form der Auskleidung überhaupt in der Lage ist, die geforderten Ansprüche in Bezug auf Gewährleistungs- und Verfügbarkeitszusagen zu halten.

Es haben sich zur Erstellung eines Konzeptes alle Parteien an den Tisch gesetzt, welches es ermöglicht hat, die etwa 25-30 % Mehrkosten, die maßgeblich durch den Einsatz der

hinterlüfteten Platten begründbar sind, zu schultern. Dies ist vor allem dadurch gelungen, dass die Linz AG den langfristigen, wirtschaftlichen Zusatznutzen für ihre Instandhaltung erkannt hat, wodurch die Mehrkosten des Projekts über die Reduktion der sowieso geplanten Instandhaltungskosten finanziert wurde. Dadurch konnte auch dank eines attraktiven Finanzierungsmodells die doch signifikant teurere Auskleidung für die Anlage der Linz AG realisiert werden.

7.1. Auskleidungskonzept

Wie bei allen stationären Wirbelschichtanlagen üblich, besteht im Bereich Anlagenteilkomponente Ausmauerung eine signifikant unterschiedliche, werkstofftechnische als auch systemtechnische Trennung zwischen dem Wirbelbettbereich und dem Freeboard. So wurde im Wirbelbereich über eine Höhe von 6 m das zuvor in seiner Entwicklung beschriebene Plattensystem eingesetzt (Bild 17). Kurz unterhalb der ersten Sekundärlufteindüsungsebene

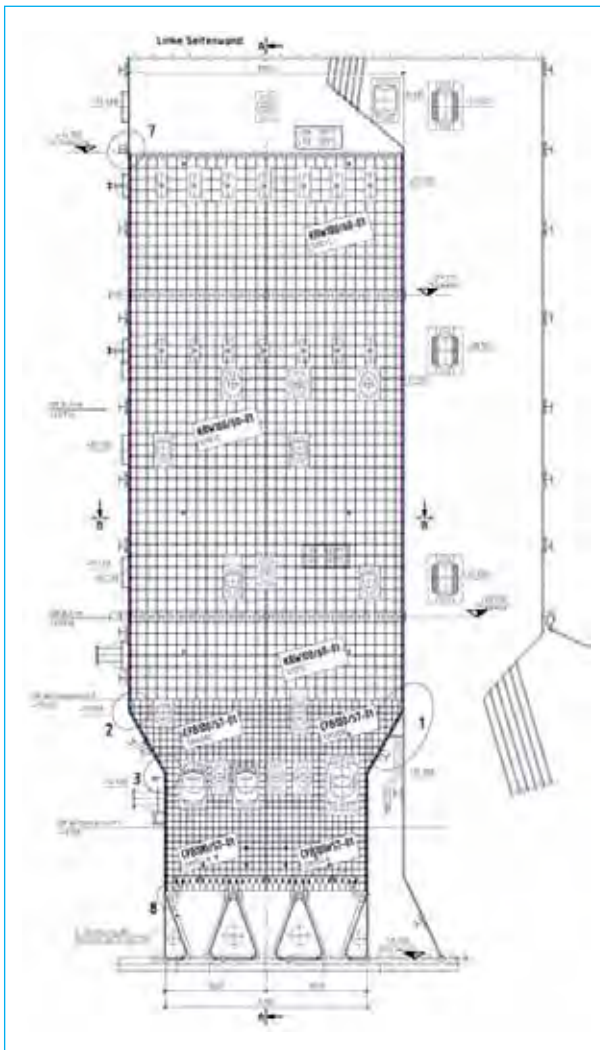


Bild 17:

Ausmauerungskonzeption der Wirbelschichtanlage Linz AG



Bild 18:

Keramische Düsenstangen

beginnt der Bereich, welcher mit hinterlüfteten Platten zugestellt wurde. Dieser Bereich erstreckt sich über mehr als 26 m in der Höhe der Anlage. Die Details und die Funktion der einzelnen Ausmauerungsbereiche werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Zusätzlich zu den Kesselbereichen mit Plattenausmauerung wurden auch alle Asche-trichter, Kesselöffnungen sowie Steherrohre abgekleidet. Ebenfalls eine Entwicklung von Jünger+Gräter sind die keramischen Düsenstangen, welche in Zusammenarbeit mit Strabag-Energieanlagen über die Jahre hinweg zum heutigen Design entwickelt wurden (Bild 18). Dieses Anlagenteil war immer von hohem Verschleiß geprägt und führt nicht selten auch zu entsprechenden Ausfällen der Anlage. Mittels einer neuartigen Armierungsmethode und einem speziell entwickelten abrasions- und thermoschockbeständigen Feuerfestbeton ist es gelungen, die Standzeiten dieses extrem wichtigen Anlagebauteils deutlich zu verbessern. Damit sind die Düsenstangen nicht mehr als das revisionszyklenbestimmende Element der Anlage anzusehen. Hier ist zu erwähnen, dass alle Versuche mit unterschiedlichsten Materialien und Verankerungen nie viel länger als 8.000 h ohne aufwendige Sanierung erreicht haben. Die erstmalig nach J+G-Konzept zugestellten Düsenstangen befinden sich nun seit Mitte 2010 ohne Unterbrechung im Einsatz.

7.2. JuSyS CFB – Wirbelbett

Im Wirbelbereich der Anlage wurde bis auf eine Höhequote von +17.550 m das neu entwickelte Plattensystem eingebaut. Warum hat man sich für dieses System entschieden, obwohl doch bereits so viele Plattensysteme aus der Abfallverbrennung bekannt sind. In Kap. 6 sind die wichtigen Eigenschaftsmerkmale eines Plattensystems für die Wirbelschichtfeuerung im Detail beschrieben. Das Besondere an den neu entwickelten Platten im Vergleich zu den bekannten Rohrwandschutzplatten der Abfallverbrennung liegt in ihrer hohen Variabilität in Bezug auf die physikalischen Werkstoffeigenschaften, die da Abriebsbeständigkeit- und Temperaturwechselbeständigkeit sowie Wärmeleitfähigkeit sind. Dies wird nur dadurch erreicht, dass für den Grundwerkstoff der Platten eine Vielzahl monolithischer Feuerfestprodukte zur Verfügung steht.

Die wärmetechnische Forderung seitens der Verfahrenstechnik wurde für den Anlagenbereich des Wirbelbetts mit 6-8 W/mK definiert. Diese Forderung konnte mittels zweier unterschiedlicher SiC-Betone erreicht werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Feuerfester Werkstoff im Wirbelbett

| Materialtyp | Chemische Zusammensetzung | | | KDF | RD | WLF | Abrieb ^{1.200 °C} |
|---------------|--------------------------------|------------------|------|-----|--------------------|-----------|----------------------------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | SiC | | | | |
| | % | | | MPa | kg/dm ³ | W/m·K | cm ³ |
| JUFLOW SM208A | 27,0 | 2,5 | 70,0 | 90 | 2,50 | 6,0 – 8,5 | < 6,0 |
| JUFLOW SM154A | 20,0 | 13,0 | 65,0 | 85 | 2,40 | 6,4 – 6,8 | < 6,0 |

Beide Produkte wurden bei > 1.200 °C nach dem Vergießen in die Formen gebrannt. Damit konnten die sehr guten Abriebswerte von < 6 cm³ gesichert werden. Bei einem Brand von > 850 °C weisen beide Produkte eine deutlich geringere Abriebsbeständigkeit aus, welche diese von der Wärmeleitfähigkeit her idealen Produkte für den Einsatz ungeeignet gemacht hätten. Ein weiterer Vorteil von JuSyS CFB ist die variable Formgebung bei niedrigen Formkosten im Vergleich zu einem geformten Feuerfeststein (gepresst/gebrannt). Im Bereich der konischen Aufweitung der Vorder- und Rückwand wurden spezielle Eckplatten hergestellt. Somit folgen die Platten sehr exakt der Kontur der Kesselrohre (Bild 19).



Bild 19:

Umlenkbereich Konusbereich im Wirbelbett *JuSyS CFB*

Generell wird, wie in Bild 20 gut zur erkennen ist, jede Platte an den oberen und unteren Enden mit einem Verankerungsbolzen fixiert. Somit kann es nur zu sehr geringen Versätzen in vertikaler Plattenreihenrichtung kommen. Sicherlich ist aber die Toleranz der Ausmauerung immer auch von der Genauigkeit der Kesselfertigung abhängig. Im Falle der Projekts Linz war die Qualität des Kessels in Hinblick auf die Kesseltoleranzen sehr gut, was sich auch in einem sehr homogenen Oberflächenbild des Feuerfests wiedergespiegelt hat. Weiterhin sieht man in der Installationsfolge auch, wie satt die Platten in Mörtel verlegt werden. Dabei handelt es sich beim Mörtel um einen SiC-Mörtel mit hohem SiC-Gehalt. Nachdem die vermörtelte Platte an den im Vorlauf der Plattenmontage verschweißten Plattenhaltern fixiert ist, muss im Anschluss an die gesamt Montage noch die oberflächliche Frontfuge geschlossen werden.

Diese Fuge wird mit einer hochabriebsfesten Masse mit kombiniert hydraulisch-chemischen Bindungssystem durchgeführt. Diese Masse erreicht bei < 700 °C ihre volle Festigkeit. Damit werden schon bei vergleichsweise geringen Temperaturen hohe Beständigkeit gegen Abrieb und Erosion erreicht. Durch die vergleichsweise kleine Plattengeometrie von etwa 250 x 250 mm erhält man ein System ähnlich einem Mosaik. Diese Kleinteiligkeit besitzt

im Vergleich zu den in der Regel deutlich größeren Segmenten einer konventionellen Betonausführung einen entscheidenden Vorteil. Dies ist eine extrem geringe Rissanfälligkeit durch mechanische als auch thermische Spannungen. Auch kann die verhältnismäßig breite Fuge bis zur vollständigen Aushärtung bei 700 °C einen Großteil der beim Aufheizen auftretenden Spannungen aufnehmen. Deshalb kann auf eine sonst bei Plattensystemen übliche Expansionsfuge aus Faser verzichtet werden. Es wäre im Grunde auch völlig widersinnig im Bereich des Wirbelbetts mit fasergefüllten Expansionsfugen zu arbeiten.

Mit dem neu entwickelten Plattensystem ist es gelungen, die Vorteile verschiedener feuerfester Werkstoffe so zu kombinieren und zu bearbeiten, dass damit ein feuerfestes Funktional-System entstanden ist, welches exakt auf die Bedürfnisse und Notwendigkeiten einer Wirbelschichtenanwendung zugeschnitten ist.

7.3. JuSySAir – Freeboard

Das hinterlüftete Plattensystem hat sich in den letzten zehn Jahren als *das Plattensystem* für schwierige Abfallverbrennungsprozesse etabliert. Je nach Brennstoffzusammensetzung und damit je nach Korrosionspotential durch die im Brennstoff enthaltenen Schadstoffe, gibt es nur eine wirklich sichere technische Lösung im Bereich feuerfester Ausmauerungen, dies ist ein hinterlüftetes Plattensystem (Bild 21).

Durch eine einzige Besonderheit im Vergleich zu allen anderen Plattensystemen erreicht das hinterlüftete System diese Ausnahmestellung und dies ist das Hinterlüften oder auch Spülen mit Frischluft in einem Spalt zwischen Platte und Rohrwand. In der Literatur sind viele Abhandlungen über die exakte Funktionsweise des hinterlüfteten Plattensystem vorhanden, so dass hier nur auf die Besonderheiten in der Wirbelschicht eingegangen werden soll [2].



Bild 20:

JuSyS CFB während der Montage

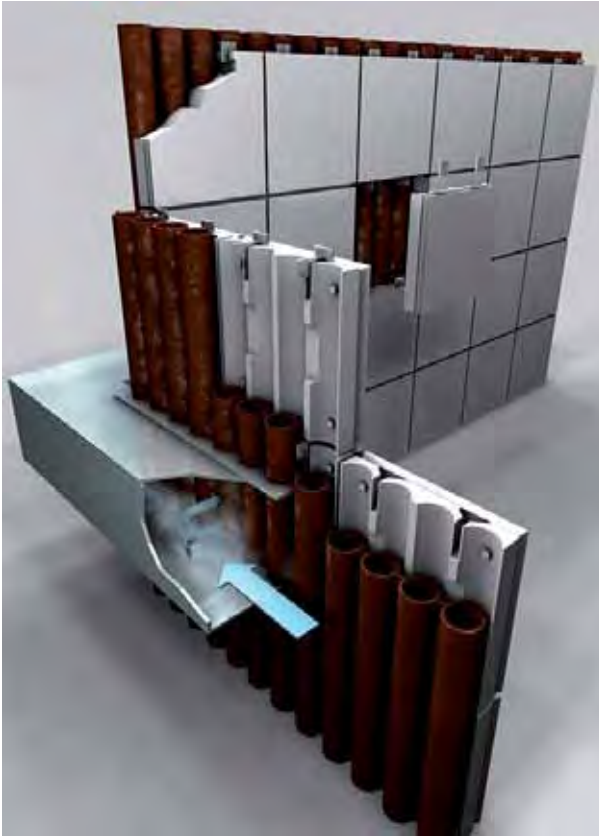


Bild 21:

JuSySAir – Schematische Darstellung

Worin liegen nun die Neuerung und die Innovation? Vor allem darin, dass *JuSySAir* erstmalig in einer Wirbelschichtanlage eingesetzt wurde. Bestand doch immer in der Vergangenheit bei der Diskussion über den Einsatz eines hinterlüfteten Plattensystems die Ungewissheit, ob es nicht zu Undichtigkeiten des Systems durch lokale Druckunterschiede der Wirbelschicht und dadurch zum Eintrag von Sand bzw. Staub kommen kann. Diese Ungewissheit wurde im Fall des Projekts Linz durch Verwendung einer besonderen Fugenmasse zur Abdichtung der Platten abgestellt.

Auch kam die Frage auf, ob das Plattensystem durch den Luftspalt nicht zu stark isoliert und somit zu hohe Abgastemperaturen entstehen lässt.

Die der Entscheidung vorgeschalteten wärmetechnischen Berechnungen haben gezeigt, dass das hinterlüftete Plattensystem, dank seiner einzigartigen Fähigkeit des nichtlinearen Wärmeübertrags in Abhängigkeit der Plattenoberflächentemperatur, sehr gut alle gesamten Lastfälle abdecken kann [4].

War zu Beginn der Planung daran gedacht, die Ausmauerung im Bereich des Freeboards in unterschiedliche Zonen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Feuerfests zu unterteilen, wurde mit der hinterlüfteten Platten-Lösung nur noch ein Produkt im gesamten Freeboardbereich eingebaut. Somit war eine werkstoffabhängige Abstufung der Materialien nicht mehr notwendig. Dies kam wiederum der Baustellenlogistik deutlich zu Gute.

Auch die speziell geregelte Luftzufuhr der Wirbelschichtfeuerung in der Freeboard-Zone mit ihrem vergleichmäßigendem Temperaturprofil und den dadurch recht geringen Turbulenzen im Vergleich zur Rostanlage in der Abfallverbrennung waren ein Grund, den Einsatz von hinterlüfteten Platten in diesem Bereich zu wagen.

Mit dem Bewusstsein, dass alle bisherigen Referenzanlagen der Strabag-Wirbelschichtfeuerung entweder mit reiner Biomasse oder mit einem Gemisch aus A4-Restholz und Biomasse betrieben werden, die Anlage in Linz aber mit einem maximalen Anteil von 100 % EBS, war die Entscheidung ein hinterlüftetes System in der Anlage einzubauen nicht sonderlich schwer. Bei solch hohen EBS-Anteilen ist mit einer hohen Chlorfracht und mit einem entsprechenden Korrosionsangriff zu rechnen bzw. ist dieser nicht auszuschließen. Auch deshalb wurde die Entscheidung für das hinterlüftete Plattensystem in einer Wirbelschicht getroffen.

8. Wirtschaftlichkeit von Plattensystemen versus Betonaukleidungen am Beispiel des RHKW der Linz AG

Wie immer bei großen Investitionsprojekten, so auch bei diesem Projekt, wird immer mehr die Wirtschaftlichkeit der Anlage hinterfragt. Der größte Hebel zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit einer Anlage besteht immer in der Verfügbarkeit, also dort, womit eine Anlage in der Regel ihr Geld verdient (Bild 22). Somit kann eine gut ausgewählte Ausmauerung trotz höherer Erstinvestition schnell diese Mehrkosten amortisieren. So verliert eine Verbrennungsanlage durch ihren Stillstand ohne Weiteres je nach Größe zwischen 50.000-100.000 EUR/Tag. Umso unverständlicher ist daher manchmal, wenn dann doch oft wissentlich, eine *unsichere* Technologie aufgrund eines geringen Kostenvorteils den Zuschlag erhält.

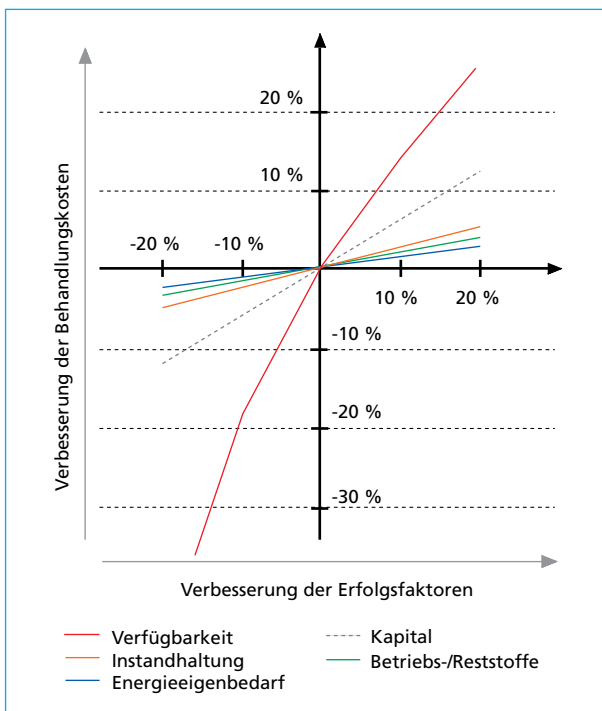


Bild 22:

Einfluss unterschiedlicher Erfolgsfaktoren auf die Abfallbehandlungskosten

Quelle: Zickert, U.: Improvement of the availability of MVV's WtE plants. In: PREWIN General Assembly Meeting, MVV Mannheim 2011

Bei dieser hier vorliegenden Rentabilitätsbetrachtung wurde dieser Verfügbarkeitseffekt bewusst ausgeklammert. Dies aus zwei Gründen, zum einen ist dieser Effekt sehr stark abhängig vom Typ der Anlage und den Randbedingungen und sollte immer individuell vom Betreiber bewertet werden und zum anderen ist alleine schon der Effekt der reduzierten Instandhaltungskosten im Vergleich zu anderen System sehr signifikant.

Somit wurde in der vorliegenden Betrachtung nur die Einsparung durch reduzierte Kosten bei Ausbruch, Montage und längerer Haltbarkeit sowie den Mehrkosten der Erstinvestition und des Plattensystems gegenübergestellt. Vernachlässigt wurden ebenfalls Kosten, die immer bei einem Stillstand anfallen, wie Gerüstbau und Grundreinigung des Kessels bevor die eigentliche Feuerfestmontage beginnen kann. Generell sind hier auch je nach Kesselgröße Kosten von 20.000 bis 40.000 Euro in Berücksichtigung zu ziehen. Zusätzlich wurde die Kostenentwicklung auf Basis einer diskontierten Rentabilitätsrechnung aufgebaut, damit auch die Effekte von Zins- und Inflationseffekte über den vergleichsweise langen Betrachtungszeitraum von zehn Jahren berücksichtigt werden.

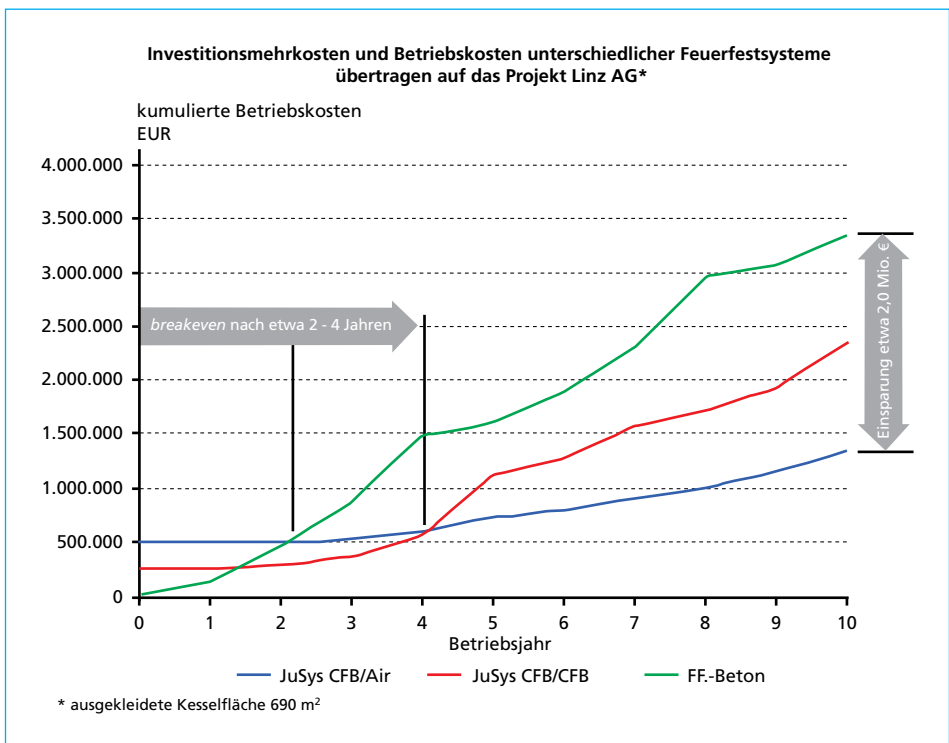


Bild 23: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Projekt Linz AG

Anhand der Grafik ist gut erkennbar, dass bereits nach einem vergleichsweise geringen Zeitraum von etwa zwei Jahren die doch deutlich höheren Zusatzkosten von etwa 25-30 % gegenüber einer gewöhnlichen SiC-Massenauskleidung (FF-Beton) kompensiert sind. Sicherlich gibt es für Investoren und Betreiber ein schlagendes Argument, welches da lautet *Gewährleistungszeitraum*. Tritt jedoch einmal der Gewährleistungsschaden ein, so kann kein Betreiber oder Investor davon ausgehen, dass nicht doch irgendwelche Kosten im Zusammenhang des Schadens bei ihm verbleiben. Selbst wenn ein Großteil der Kosten von

anderen Parteien getragen werden müssen, verbleibt die Unsicherheit einer nicht leistungsfähigen Auskleidung bei ihm zurück. In der Regel werden dann nach und nach schwierige und doch auch wieder kostspielige Nachbesserungen auf Kosten des Betreibers notwendig.

Mit der Perspektive eines sicheren Anlagenbetriebs, in Bezug auf die feuerfeste Auskleidung sowie einem erheblichen Einsparpotential innerhalb eines langfristigen Anlagenbetriebs, sollte eigentlich der Schritt für die langfristig sichere Variante gewählt werden.

Am Beispiel der Wirbelschichtanlage der Linz AG haben die involvierten Parteien diesen Weg beschritten und sich für die langlebige Auskleidungsvariante einer kombinierten Auskleidung aus den Plattensystemen JuSyS CFB und Air entschieden (blaue Kurve).

9. Zusammenfassung und Ausblick

In der Abfallverbrennung ist der Einsatz von Plattensystemen seit nunmehr über zwanzig Jahren üblich und hat in den letzten zehn Jahren Betonzustellungen auf Rohrwänden verdrängt. Trotz diesem eindeutigen Trend laufen die wenigsten Wirbelschichtanlagen in Europa, welche mit Rohrwänden ausgestattet sind, mit vergleichbarer Feuerfestzustellung. Dies liegt vor allem darin begründet, weil die meisten Anlagen bisher vergleichsweise unkritische Brennstoffe wie Biomasse, Klärschlamm oder Resthölzer als Brennstoff verwertet haben.

Im Zuge einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Entsorgungsindustrie und der Verfügbarkeit von hochkalorischen, gut aufbereiteten Ersatzbrennstoffen gibt es mehr und mehr den Wunsch, auch solche Brennstoffe effizient und wirtschaftlich zu nutzen. Technologisch besitzt die Wirbelschichtverbrennung aufgrund des guten Ausbrands hier zum Teil Vorteile gegenüber der klassischen Rostverbrennung.

Um nicht die gleichen schmerzhaften Erfahrungen der Abfallverbrenner zu erleiden, wurde beim Neubau der Wirbelschichtanlage in Linz von Anfang an auf ein Rohwandplattensystem gesetzt. Durch gute Erfahrungen bei großflächigen Testfeldinstallationen in Anlagen, welche mit der Brennstoffzusammensetzung mit der Anlage in Linz vergleichbar sind und mit dem Wissen, dass auch bereits die Verbrennung von Biomasse und Resthölzern in der Vergangenheit feuerfesttechnische Probleme mit sich gebracht haben, wurde in der Wirbelschichtanlage der Linz AG eine kombinierte Auskleidung aus zwei Plattensystemen eingesetzt.

Erstmals in einer Wirbelschicht wurde auch ein hinterlüftetes Plattensystem eingebaut. Durch adaptive Maßnahmen wurde das System auf die spezifischen Wirbelschichtbedingungen eingestellt, damit insbesondere die Fugen einer höheren Erosionsbelastung standhalten können. Mit der Wahl einer Hinterlüftung im Brennkammerbereich (Freeboard) wurde die Gefahr einer Kessel- und Verankerungskorrosion deutlich minimiert. Aus der Abfallverbrennung ist bekannt, dass das hinterlüftete Plattensystem 2 bis 3-fach längere Standzeiten als konventionelle Betonauskleidungen aufweisen. Somit wurden maximale Standzeiten von zwölf Jahren bei einer Austauschrate von > 25 % Gesamtfläche über diesen Zeitraum in Müllöfen erzielt. Mit dem Wissen des Einsatzes von EBS in der Anlage Linz war eine Entscheidung für das hinterlüftete System somit logisch konsequent.

Im Wirbelbereich fand aufgrund des geringeren Korrosionspotentials und der hohen Erosionsbelastung JuSyS CFB das Plattensystem für die Wirbelschicht Anwendung. Dieses System wurde über die letzten Jahre dahin entwickelt, dass es die wirklich schwierigen Anlagenbereiche einer Wirbelschicht mit hohem Erosionsrisiko und starker Temperaturwechselbeanspruchung schützt. In schwierigen Referenzanlagen wurde das System im Vergleich zu Betonauskleidungen erprobt und hat hier nie erwartete Standzeiten generiert.

Ein weiterer Vorteil des Systems ist seine hohe Variabilität in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe. Damit kann über eine Spanne von 1,0-20,0 W/mK die Wärmeleitfähigkeit fast stufenlos nach dem Bedarf der verfahrenstechnischen Auslegung eingestellt werden.

Zukünftig sollte bei der Auswahl der feuerfesten Auskleidung für Wirbelschichtkessel eine mögliche Zustellung mit Plattensystemen bei der Planung einer Neuanlage als auch bei einer Totalsanierung einer Bestandsanlage immer in die Evaluation mit aufgenommen werden. Dies insbesondere aufgrund der deutlichen und langfristigen Vorteile für die Reduktion der Instandhaltungskosten und der Stillstandszeiten. Beide Faktoren tragen im höchsten Maße zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit aufgrund einer höheren Verfügbarkeit bei.

Die Zielsetzung in der Zukunft wird es sein, nicht nur das hinterlüftete Plattensystem für schwierige Brennstoffe in der Wirbelschichtverbrennung zu etablieren, sondern vor allem auch JuSyS CFB als die Systemlösung im Bereich der stationären und zirkulierenden Wirbelschicht. Dabei sollte das Denken nicht bei berohrten Wirbelschichtkesseln enden, sondern ohne Weiteres auch die Auskleidung von *adiabaten*, d.h. mehrschichtisolierten, Brennkammern mit in die Entwicklung einbezogen werden. Denn die Vorteile einer dünnwandigen, hochverschleißfesten Frontschicht ohne Expansionsfugen, welche sich gewöhnlich mit Staub und Asche zusetzen können, haben auch für solche Anlagentypen nicht nur rein aus wirtschaftlicher Sicht einen extremen Scharm.

Dank

Besonderer Dank gilt der Planungs- und Betriebsmannschaft der Linz AG, die dem Projektteam der Strabag Energy Technologies GmbH und der Jünger+Gräter GmbH das Vertrauen für die Umsetzung des innovativen Auskleidungskonzeptes gegeben haben.

10. Literaturverzeichnis

- [1] Schmieder, R.: Die Verbrennungsbedingungen der 17. BImSchV – Probleme bei Wirbelschichtfeuerungen und Lösungsansätze –. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M.: Energie aus Abfall, Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 53-62
- [2] Imle, J.: Hinterlüftetes keramisches Rohrwandschutzsystem – Problemlöser für kritische Bereiche von Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M.: Optimierung der Abfallverbrennung 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 681-697
- [3] Horn, M.; Schuierer, F.; Drexler, J.; Beul, H.-G.: Acht Jahre hinterlüftetes Plattensystem – JuSySAir. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M.: Optimierung der Abfallverbrennung 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009
- [4] Horn, M.; Alešio, H.-P.; Bratzdrum, C.; Brell, J.; Molitor, D.: Wärmeübertragungsverhalten von hinterlüfteten Platten am praktischen Beispiel einer Abfallverbrennungsanlage. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M.: Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011
- [5] Zickert, U.: Improvement of the availability of MVV's WtE plants. In: PREWIN General Assembly Meeting, MVV Mannheim 2011

