

Betriebserfahrungen mit O₂-Gehalt im Abgas unter 4,5 Prozent

– Auswirkungen auf die Stabilität der Verbrennung, CO-Spitzen und Korrosion –

Maurice H. Waldner und Barbora Malisova

1.	Anlagenübersicht und Resultate	256
1.1.	Beschreibung der Anlage	256
1.2.	Verbrennungsstabilität	257
1.2.1.	Ausbrand der Schlacke	257
1.2.2.	Dampfstromkonstanz und Sauerstoffband	258
1.3.	CO-Emissionen	259
1.3.1.	CO-Mittelwert	259
1.3.2.	CO-Spitzen	262
2.	Korrosion	263
2.1.	Überhitzerkorrosion	264
2.2.	Korrosion des Inconel 625 im Feuerraum und Zug 1	264
3.	Zusammenfassung	268
4.	Literatur	269

Die Abfallverwertungsanlage Renergia in der Nähe von Luzern (Schweiz) ist seit 2015 in Betrieb. Die beiden Linien mit Rostfeuerungen wurden ursprünglich für einen Abfalldurchsatz von je 100.000 Jahrestonnen bei je 47 MW thermischer Leistung ausgelegt. Heute werden die Linien bei etwa 52 MW und einem durchschnittlichen Heizwert von 13,3 MJ/kg betrieben. Der Abfallmix setzt sich aus folgenden Chargen zusammen: 62 Prozent Hausmüll Verbände, 21 Prozent Industrie und Gewerbe mit Import, 17 Prozent Sperrmüll. Hitachi Zosen Inova lieferte die *Lose Feuerung und Dampferzeuger* sowie *Abgasnachbehandlung*. Das Ziel des Anlagenbauers war die Realisierung einer hocheffizienten Anlage mit der neusten Technologie.

Bereits in der Planungsphase wurde das Augenmerk auf hohe Flexibilität im Betrieb gelegt. Es können diverse Abfallfraktionen mit 9 bis 16 MJ/kg und unterschiedlicher Stückigkeit behandelt werden. Die Anlage sollte mit einstellbaren Sauerstoffgehalten am Kesselende zwischen 3 und 7 Vol.-% feucht betrieben werden können. Nach der kurzen Inbetriebnahmephase bei etwa 4,3 Vol.-% O₂ feucht wurde die Anlage nun während mehr als zwei Jahren bei 2,5 bis 3,5 Vol.-% O₂ feucht betrieben, was einen positiven Effekt auf Wirkungsgrad, Stromeigenbedarf (insbesondere Ventilatoren), Flugaschemengen und Roh-NO_x hat [3, 5].

Neben der Stromproduktion wird Prozessdampf in eine benachbarte Papierfabrik und Fernwärme exportiert, was einen hohen Gesamtanlagenwirkungsgrad ergibt (ENE-Faktor 89,9 Prozent, R1-Faktor 93,8 Prozent) obwohl die Frischdampfparameter mit 410 °C und 41 bar konservativ sind.

In diesem Beitrag werden Stabilität der Verbrennung, CO-Spitzen und Korrosionsverhalten genauer betrachtet.

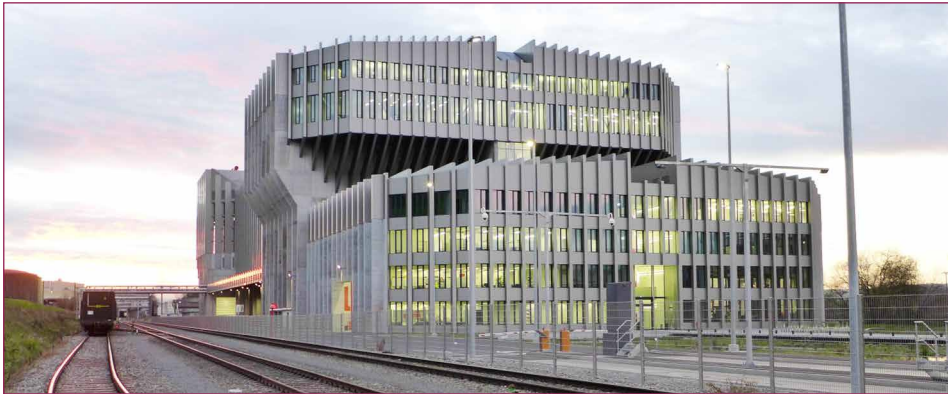


Bild 1: Außenansicht der Abfallverwertungsanlage Renergia; die moderne Fassade widerspiegelt die Technologie im Innern

1. Anlagenübersicht und Resultate

1.1. Beschreibung der Anlage

Die Linien der Renergia bestehen aus Rostfeuerung, Vierzug-Tailendkessel, 2-feldrigem Elektrofilter, 1. Stufe trockene Abgasreinigung mit Bicarbonat, De-NO_x Katalysator, externem Economizer und Fernwärmetauscher 1, 2. Stufe trockene Abgasreinigung mit Kalkhydrat, Fernwärmetauscher 2 (Bild 2).

Der zweibahnige Vorschubrost hat vier Zonen, die ersten beiden sind wassergekühlt. Die Primärluft (120 °C) wird separat den acht Rostelementen zugeführt. Die Sekundärluft (50 °C) und das rezirkulierte Abgas (Entnahme nach E-Filter bei 240 °C) werden in der Vorder- und Rückwand auf je zwei Ebenen über Koaxialdüsen eingebracht. Alle individuellen Gasströme werden einzeln gemessen und über angetriebene Klappen geregelt.

Erstmalig kam die neue Feuerleistungsregelung mit zusätzlichen Sensoren und erweiterter Logik zum Einsatz, die den Betrieb auch bei sehr tiefen Sauerstoffwerten sowie im Überlastmodus erleichtert. Dabei lag der Entwicklungsschwerpunkt auch auf Betreiberfreundlichkeit und einer nahezu vollständigen Automatisierung. Selbst bei schnellen Variationen der Abfallqualitäten sind kaum noch manuelle Eingriffe nötig, da sowohl Heizwertänderungen als auch mechanische Stoffeigenschaften des Abfalls erfasst und verarbeitet werden.

Der Feuerraum, der gesamte erste Kesselzug sowie der obere Teil des Zuges 2 sind vollständig mit Inconel 625 gecladdet, mit Ausnahme des Rostrandbereichs, der durch SiC-Platten geschützt ist. Die drei Strahlungszüge werden durch Sprenggeneratoren und der horizontale Konvektionszug durch pneumatische Klopfer abgereinigt.

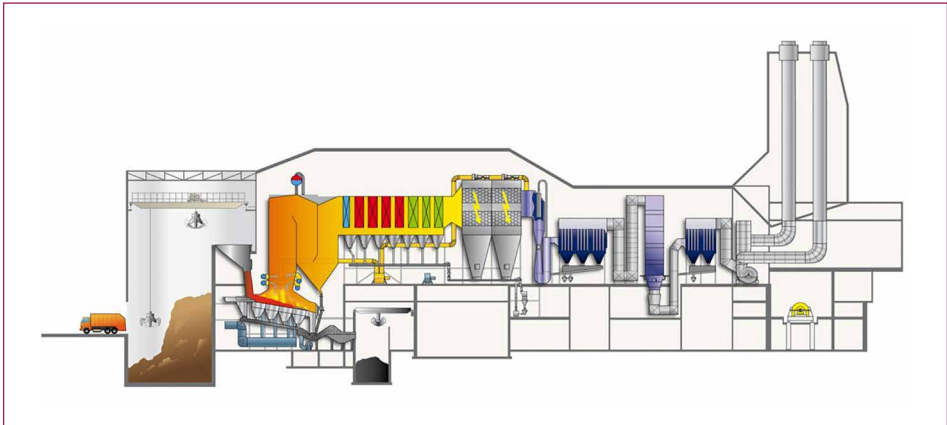


Bild 2: Längsschnitt Abfallverwertungsanlage Renergia

Quelle: Strobel, R.; Waldner, M.H.; Gablinger, H.: Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EfW) plant. Waste Management, In Press – Corrected Proof, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.049

Optimierung und Betrieb

1.2. Verbrennungsstabilität

Der Rost wird leicht unterstöchiometrisch betrieben. Die Lambdawerte der Primärluft (bezogen auf Gesamtrost) sind heizwertabhängig und bewegen sich im Bereich von 0,7 bis 1,0. Dies ist im Vergleich zu anderen Anlagen eher tief, was eine Absenkung der Temperatur im Brennbett zur Folge hat. Ebenso ist die Entstehung von NO_x-Vorläufersubstanzen durch die verminderte Sauerstoffkonzentration im Bett geringer, was einen positiven Effekt auf Roh-NO_x-Konzentrationen bewirkt [4].

Eine gute Verbrennungsstabilität kann durch mehrere Faktoren charakterisiert werden: Tiefe organische Restkohlenstoffgehalte in der Schlacke (TOC), stabiler Dampfstrom bei engem Sauerstoffband sowie geringe CO-Werte am Austritt der Feuerung selbst bei wechselnden Abfalleigenschaften. Auf die CO-Werte wird im nächsten Unterkapitel gesondert eingegangen.

1.2.1. Ausbrand der Schlacke

Tabelle 1: TOC-Gehalte der Schlacke bei unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen

	TOC Schlacke	
	Mittelwert	Std. Abw.
	%	
Betrieb bei > 4 Vol.-% O ₂	0,68	0,36
Betrieb bei ~ 3 Vol.-% O ₂	0,36	0,16

Während den ersten beiden Betriebsjahren wurden immer wieder Schlackeproben genommen und auf organischen Restkohlenstoff (TOC) hin untersucht. Es wurden total 32 Mischproben gezogen. Die gefundenen Werte (Tabelle 1) deuten auf eine sehr gute Verbrennung trotz tiefen Rost-Lambdawerten hin.

Bei den jüngsten Messungen bei tiefstem Sauerstoffgehalt im Abgas um 3,0 Vol.-% feucht sind die TOC-Werte am tiefsten und weisen die geringste Streuung auf, was auch darauf zurückzuführen ist, dass die Inbetriebsetzungsphase und Grundoptimierung der Anlage zum Zeitpunkt dieser Beprobung bereits abgeschlossen war. Der Sauerstoffgehalt im Abgas hat keine Korrelation zum TOC in der Schlacke.

1.2.2. Dampfstromkonstanz und Sauerstoffband

Je tiefer der Sauerstoffgehalt im Abgas, umso präziser muss die Feuerleistungsregelung arbeiten. Neben dem Dampfstrom müssen auch der Sauerstoffgehalt und weitere Regelgrößen innerhalb engen Grenzen gehalten werden. Dazu sind zusätzliche Sensoren nötig und es muss mehr Prozesswissen in der Feuerleistungsregelungslogik abgebildet werden. Zu diesem Zweck werden die Aktuator-Sollwerte der Basis-Feuerleistungsregelung, die im Leitsystem realisiert ist, mit Justierungen einer Zusatzregelung versorgt, die auf einem eigenständigen Industrierechner läuft. Diese Zusatzregelung überschreibt dabei nicht die Werte der Basis-Feuerleistungsregelung, sondern passt diese nur an.

Diese Zusatzregelung ist modular aufgebaut und erlaubt die Umsetzung komplexerer Regelalgorithmen als diese typischerweise auf einem Leitsystem realisiert sind. Die Hauptregellogik und alle sicherheitsrelevanten Funktionen sind im Prozessleitsystem untergebracht. Ein adaptives Verhalten ist jedoch beispielsweise bei CO-Spitzen oder schnellen Last- und Heizwertwechseln möglich. Ebenfalls wird die Abfalldosierung deutlich verfeinert, da weiterführende Sensorinformationen in der Zusatzregelung verarbeitet werden [6].

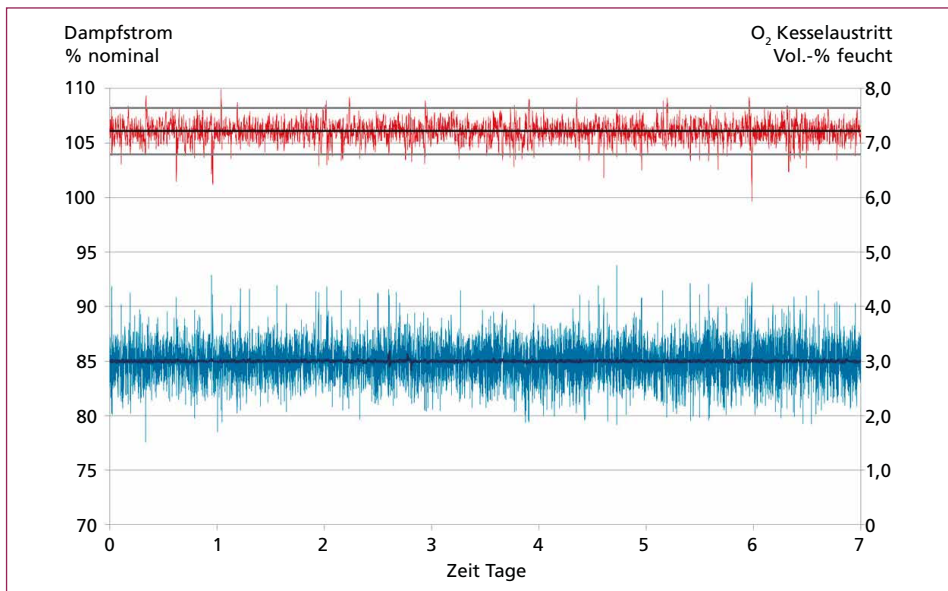


Bild 3: Dampfstrom (rot, Achse links) mit Sollwert (schwarz) und typisches Regelband von ± 3 Prozent, sowie Sauerstoff am Kesselaustritt (blau, Achse rechts) mit Sollwert von 3 Vol.-%; Datenpunkte über eine Minute gemittelt

Quelle: Strobel, R.; Waldner, M.H.; Gablinger, H.: Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EFW) plant. Waste Management, In Press – Corrected Proof, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.049

Die auf Bild 3 ersichtliche Dampfstromkonstanz ist selbst bei sehr tiefem Sauerstoffgehalt sehr gut. Es ist eine willkürliche Phase von einer Woche bei 3 Vol.-% O₂ feucht am Kesselende dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte entsprechen dabei Minutenmittelwerten. Sehr selten weicht der Dampfstrom um mehr als drei Prozent vom Sollwert ab. Damit verknüpft ist auch, dass die gemessene Sauerstoffkonzentration in einem sehr engen Band von ± 1 Vol.-% um den Sollwert von 3 Vol.-% O₂ feucht pendelt. Die Logik vermeidet Sauerstoffkonzentrationen unter 1,2 Vol.-% O₂ (Sekundenwerte), bei denen typischerweise der CO-Gehalt sehr schnell ansteigt.

Die Häufigkeitsverteilung des Sauerstoffgehalts und der Abweichung des Dampfstroms vom Sollwert sind auf Bild 4 dargestellt. Hier wurden Minutenmittelwerte während eines ganzen Monats ausgewertet. Die Standardabweichung des Dampfstroms entspricht 0,9 Prozent und 96 Prozent der Werte liegen näher als 2 Prozent am Sollwert. Das gefahrene Sauerstoffband liegt zwischen 2 und 4 Vol.-% bei einem Sollwert von 3 Vol.-%, entspricht also ± 1 Vol.-% Abweichung vom Sollwert.

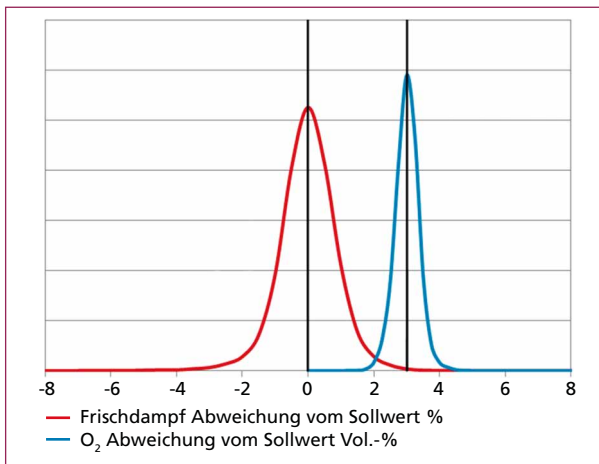


Bild 4:

Häufigkeitsverteilung der Abweichung Dampfstrom vom Sollwert (rot) sowie des effektiven Sauerstoffgehalts am Kesselende mit Minutenmittelwerten über die Dauer eines Monats

Quelle: Strobel, R.; Waldner, M.H.; Gablinger, H.: Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EfW) plant. Waste Management, In Press – Corrected Proof, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.049

Diese herausragende Leistung wird durch die Kombination einzelner verfahrenstechnischer Faktoren ermöglicht. Neben der umfangreichen Regelungsstrategie und der erweiterten Sensorik sind begünstigende Faktoren beispielsweise die kontinuierlich bewegenden Roststäbe wie auch der mit Cladding geschützte erste Kesselzug, der eine relativ kurze Antwortzeit zwischen Feuerung und Dampferzeugung aufweist. Damit ist die schnelle Erfassung von Prozessänderungen sowohl über das Sauerstoffsignal (Verzögerung etwa dreißig Sekunden) als auch über den Dampfstrom (typischerweise knapp über eine Minute) möglich.

1.3. CO-Emissionen

1.3.1. CO-Mittelwert

Tiefe Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid (CO) werden als Maß für vollständigen Gasausbrand herangezogen. CO wirkt allerdings auch als Reduktionsmittel für NO_x und liegt im unterstöchiometrischen Bereich (d.h. über dem Brennbett oder nach der ersten Eindüsungsstufe) in größeren Mengen vor. Im Hinblick auf möglichst tiefe

Roh-NO_x-Gehalte im Abgas ist es also sinnvoll, CO über ein möglichst großes Kesselvolumen zu erhalten bevor es vollständig zu CO₂ aufoxidiert wird. Bei Renergia sind nach Betriebsbewilligung als Tagesmittelwert 50 und als Stundenmittelwert ebenfalls 50 mg/Nm³ (bei 11 Prozent O₂ trocken) einzuhalten.

Bild 5 zeigt die Korrelation der Minutenmittelwerte zwischen CO und Roh-NO_x (beide am E-Filterausgang gemessen) über einen Monat bei Sauerstoffwerten zwischen 2,0 und 4,0 Vol.-% feucht. Bei höheren CO-Werten wurden besonders tiefe Roh-NO_x-Werte gemessen, was das Reduktionspotenzial von CO unterstreicht. Gleichzeitig ist ersichtlich, dass CO meist bei etwa 20 mg/Nm³ liegt.

Als Vergleich: bei der Fahrweise um 4,5 Vol.-% O₂ lag der CO-Wert am Kamin bei etwa 8 mg/Nm³ und die Roh-NO_x-Werte im Schnitt bei 220 mg/Nm³.

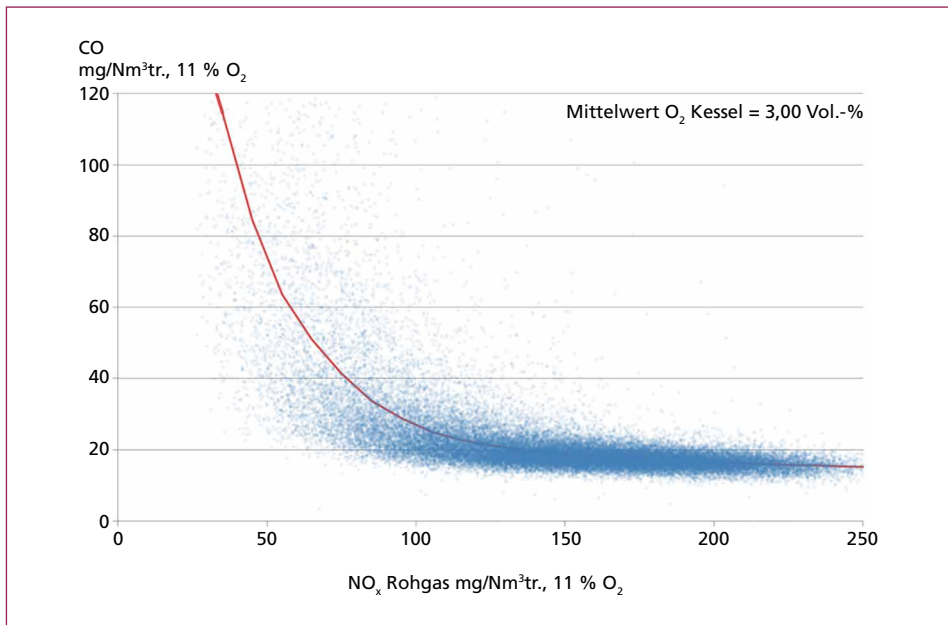


Bild 5: CO in Abhängigkeit von Roh-NO_x, Ein-Minutenmittelwerte

Quelle: Strobel, R.; Waldner, M.H.; Gablinger, H.: Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EFW) plant. Waste Management, In Press - Corrected Proof, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.049

Der ideale Betriebspunkt hinsichtlich Roh-NO_x liegt also etwa da, wo die CO-Werte noch in sicherem Abstand zu den Emissionsgrenzen sind, aber bereits von der Reduktion von NO_x durch CO profitiert werden kann.

Über eine Logik in der Zusatzregelung kann nun der Sauerstoff-Sollwert situativ nach unten angepasst werden, solange die Emissionswerte dies erlauben. Als sinnvolle Grenzen wurden dabei maximale CO-Stundenmittelwerte von etwa 25 bis 30 mg/Nm³ resp. CO-Tagesmittelwerte von etwa 20 mg/Nm³ erachtet (am Kamin).

Bild 6 zeigt die CO/NO_x-optimierte Fahrweise. Bei einem Sauerstoffsollwert von 3 Vol.-% pendelte der Roh-NO_x-Wert um 150 mg/Nm³ (bei elf Prozent O₂ trocken), zu sehen bis etwa Tag 10. Dann wurde der Sollwert adaptiv zwischen 2 und 3 Vol.-% O₂ gefahren. Dabei erhöhte sich der CO-Tagesmittelwert von etwa 13 auf 20 mg/Nm³, während sich das Roh-NO_x bei etwa 90 bis 120 mg/Nm³ (bei elf Prozent O₂ trocken) einstellte.

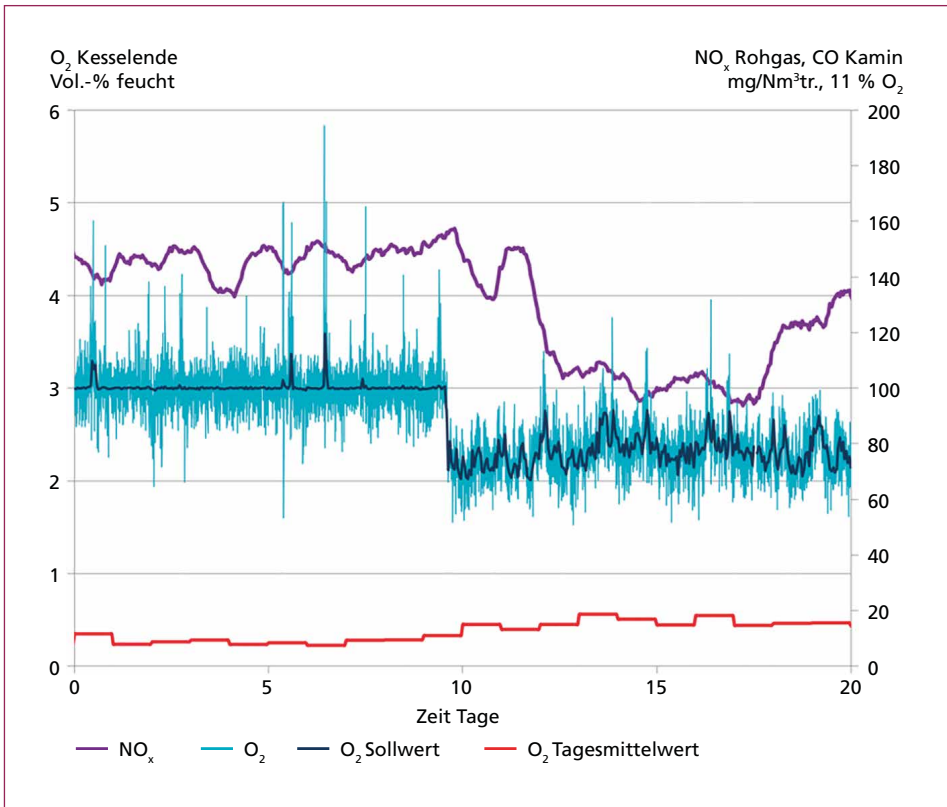


Bild 6: Zusammenhang O₂-CO-NO_x; bis Tag 10: Betrieb der Anlage bei konstantem Sauerstoffsollwert von 3 Vol.-%; ab Tag 10: adaptive Anpassung des O₂-Sollwerts unter Einhaltung der CO-Stunden- und CO-Tagesmittelwerte; Reduktion der Roh-NO_x-Konzentration auf etwa 100 mg/Nm³ bei elf Prozent O₂ trocken

Quelle: Strobel, R.; Waldner, M.H.; Gablinger, H.: Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EfW) plant. Waste Management, In Press - Corrected Proof, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.049

Die Einhaltung der CO-Tagesmittelwerte bei der Fahrweise unter 3 Vol.-% Sauerstoff stellt für Renergia kein Problem dar. Trotzdem müssen kurzzeitigen CO-Spitzen Beachtung geschenkt werden, da diese umso heftiger ausfallen können, je näher man die Feuerung an stöchiometrischen Bedingungen betreibt. Schnellen Eingriffen sind hierbei jedoch apparative und regeltechnische Grenzen gesetzt.

1.3.2. CO-Spitzen

Wie bereits dargestellt, liegt die beobachtete Bandbreite der Sauerstoffwerte bei etwa ± 1 Vol.-% um den Sollwert. Bei inhomogenem Abfall können jedoch die kurzzeitigen Fluktuationen innerhalb einer Minute auch größer sein. Sinkt dabei der Sauerstoffgehalt unter eine kritische Schwelle ab, können CO-Spitzen auftreten. Kann bei solch kurzzeitigen Spitzen überhaupt eingegriffen werden? Um diese Frage zu beantworten, muss man die verwendete Messtechnik betrachten. CO wird extraktiv sowohl am E-Filterausgang als auch am Kamin gemessen. Sauerstoff wird in-situ am Kesselende mittels einer Lambda-Sonde feucht sowie extraktiv am E-Filterausgang und am Kamin trocken gemessen. Ebenfalls zu bedenken gilt, dass die Messungen immer einen zeitlich leicht gemittelten Zustand wiedergeben und in Wirbeln schnelle Konzentrationsfluktuationen möglich sind.

Damit existiert eine gewisse Verzögerungszeit zwischen CO-Entstehung in der Feuerung und deren Detektion an den Messgeräten. Typische Verzögerungszeiten inklusive Signalfilterung sind in Tabelle 2 dargestellt.

Gas	Ort	Methode	Verzögerung Sekunden
O ₂	Kesselende	in situ	20
O ₂	E-Filter	extraktiv	60
O ₂	Kamin	extraktiv	140
CO	E-Filter	extraktiv	60
CO	Kamin	extraktiv	140

Tabelle 2:

Messung von CO und O₂ und deren Verzögerung

Die schnellste Reaktion wäre also über das Sauerstoffsignal möglich. Je tiefer jedoch der Sollwert liegt, umso stärker wirkt sich eine Störung im Prozess auf die Emissionen aus. Gleichzeitig treten CO-Spitzen aber nicht immer bei einem bestimmten Sauerstoffgehalt auf, da die Mischung unter Umständen zu einer Zeit erfolgte, bei der die Temperatur nicht mehr ausreichend war für die Oxidation zu CO₂. O₂ alleine kann also nicht als Frühindikator für CO-Spitzen dienen.

Wird eine CO-Spitze am E-Filterausgang detektiert, so liegt deren Entstehung mindestens eine Minute zurück. Hier stellt sich die Frage, ob ein Eingriff noch nötig ist (Spitze dauert länger als sechzig Sekunden) oder nicht. Gleichzeitig wird die Wahrscheinlichkeit von sehr lokalen Spitzen immer größer, je tiefer man den Sauerstoffgehalt absenkt. Damit sinkt die Möglichkeit, mit globalen Methoden wie beispielsweise der Zugabe von mehr Sekundärluft die Spitzen ganz zu stoppen. Die Spitzen können sehr viel lokaler auftreten als verfahrenstechnische Freiheitsgrade vorhanden sind.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Regelung so eingestellt, dass bei sehr tiefen Sauerstoffwerten um 1 bis 2 Vol.-% so schnell wie möglich eingegriffen wird, bei CO-Spitzen aber ein progressiver Eingriff über längere Zeit vorgenommen wird, da keine schnelle Regelung aufgrund der Totzeiten möglich ist. Die Spitzen werden so nicht aktiv bekämpft, sondern in einem gewissen Masse zugelassen. Die Regelung stellt jedoch sicher, dass die gesetzlich einzuhaltenden Grenzwerte und die Anlagensicherheit nicht gefährdet sind.

Um die CO-Spitzen zu quantifizieren wurde das 2. Quartal 2017 ausgewertet. Während dieser Zeit wurden beide Linien kontinuierlich bei 108 bis 115 Prozent Last gefahren. Der Sauerstoffgehalt wurde adaptiv aufgrund des gemessenen CO-Wertes eingestellt und lag bei beiden Linien um 3,10 Vol.-% O₂. Für die Auswertung wurden nur Betriebszustände mit O₂ < 9 Vol.-% ausgewertet, das heißt keine An- oder Abfahrvorgänge oder Trips. Die Resultate sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: CO-Emissionen Renergia, 2. Quartal 2017

	Total Spitzen Q2 2017		Durchschnittliche Spitzen pro Tag		Durchschnittliche Spitzen-Zeit Minuten	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
CO-Spitzen > 50 mg/Nm ³	969	1.226	10,6	13,5	2,50	3,01
CO-Spitzen > 100 mg/Nm ³	378	310	4,2	3,4	2,01	2,46
CO-Spitzen > 200 mg/Nm ³	116	65	1,3	0,7	1,67	2,42
CO-Spitzen > 500 mg/Nm ³	14	8	0,2	0,1	1,36	2,88
Überschreitungen CO-Tagesmittelwert	0	0				
Überschreitungen CO-Stundenmittelwert	0	1				

Es ist ersichtlich, dass im Schnitt etwa zehn Spitzen über 50 mg/Nm³ pro Tag auftreten. Große Spitzen über 200 mg/Nm³ treten etwa einmal pro Tag auf, noch größere wöchentlich. Ebenfalls ist zu sehen, dass die durchschnittliche Spitzendauer mit 2 bis 3 Minuten in der Größenordnung der Totzeit zwischen Entstehung und Detektion liegt. Aus diesem Grunde ist bei Renergia eine schnelle Regelung bei Erfassung einer Spitze nicht zielführend oder nötig.

Eine einzige Überschreitung eines Stundenmittelwertes ist bei der Linie 2 aufgetreten, welche aber auf einen Ausfall bei der Emissionsmessung zurückzuführen ist. Generell kann durch leicht progressiveres Eingreifen (wenn der Mittelwert gefährdet ist) oder generell höhere Sauerstoffgehalte (z.B. 3,5 Vol.-% O₂ statt 3,0 Vol.-% O₂) in jedem Falle einer Überschreitung entgegen gewirkt werden.

Für einen schnelleren Eingriff in die Feuerung müsste CO und allenfalls O₂ im 1. Kesselzug gemessen werden, z.B. via Lasermessung. Ein abruptes Absinken des Sauerstoffgehalts und damit eine mögliche CO-Spitze könnte auch über eine schnelle Temperaturmessung im 1. Zug erfasst werden, beispielsweise mittels Schall- oder Infrarotmessung. Wie die Daten zeigen sind diese Maßnahmen jedoch nicht notwendig für den sicheren und effizienten Betrieb der Anlage.

2. Korrosion

Der Sauerstoffgehalt im Abgas wird hauptsächlich durch Anpassung des Sekundärluftstromes eingestellt. Unterhalb der Sekundärluftzugabe ist deshalb kaum ein Einfluss der Fahrweise mit tiefem O₂ auf die Korrosion zu erwarten. Interessant hingegen ist der Bereich stromab der letzten Luftzugabe wo sich die Prozesse unterscheiden. Durch

die Reduktion des Luftüberschusses werden die maximalen Temperaturen nahe der Eindüsung ebenfalls potenziell höher. Dem kann mit einer Luftstufung sowie durch Eindüsung von rezirkuliertem Abgas entgegen gewirkt werden, was beides bei Renergia realisiert ist.

Die Korrosionsuntersuchung beläuft sich aus diesem Grunde auf diese Bereiche: 1. Kesselzug und Konvektionszug. Die Resultate sind vorläufiger Natur. Für eine abschließende Beurteilung ist die Datenlage noch gering.

Frühere Untersuchungen an anderen Anlagen zeigten, dass *CO-Korrosion* aufgrund von Strähnen und einer damit einhergehenden Verzunderung eine untergeordnete Rolle spielt [2]. Dies erstaunt nicht, da die Konzentration an viel stärker korrosiven Gasen wie HCl im Abgas dauerhaft höher ist als bei einer gelegentlichen CO-Strähne, unabhängig vom O₂-Gehalt des Abgases. *CO-Korrosion* durch CO-Spitzen dürfte damit eine sehr untergeordnete Rolle spielen.

2.1. Überhitzerkorrosion

Die Überhitzer und der Schutzverdampfer sind aus 16Mo3 gefertigt (keine Cladding Schutzschicht). Seit Inbetriebnahme wurden regelmäßig Wanddickenmessungen durchgeführt [7]. Die Abzehrraten (Tabelle 4) liegen in einem Bereich, wie sie auch bei anderen Anlagen bei den vorliegenden Dampf- und Abgastemperaturen (Korrosionsdiagramm Bild 6) erwartet werden.

Tabelle 4: Abzehrraten Linie 2

Bündel in Richtung Abgasweg	Durchschnittl. Abzehrrate mm/Jahr
Überhitzer 3	0,16
Überhitzer 2.2	0,17
Überhitzer 2.1	0,11
Überhitzer 1.2	0,10
Überhitzer 1.1	0,09

Im Korrosionsdiagramm sind typische Betriebstemperaturen (etwa 52 MW Leistung, etwa 7.900 h) und zum Vergleich die Auslegungstemperaturen (47 MW, nach 8.000 h Betriebszeit) eingetragen. Die Betriebspunkte sind etwas weiter vom Korrosionsfenster entfernt als erwartet, obwohl die gefahrene Leistung etwa 10 Prozent über dem Auslegungswert liegt.

Einerseits sind die Verbrennungstemperaturen durch die Senkung des O₂ gestiegen, andererseits ist dadurch der Abgasstrom praktisch unverändert. Die Leerzugreinigung ist effizient und das Verschmutzungsverhalten ist allgemein gutmütig. (Bild 7)

2.2. Korrosion des Inconel 625 im Feuerraum und Zug 1

Nach zwei Jahren Betrieb wurden lokale Zerrüttung sowie flächige Abzehrungen des Cladding-Materials festgestellt. Durch die Firma CheMin wurden während eines Stillstandes nach 2,6 Jahren Betrieb umfangreiche Schichtdickenmessungen durchgeführt, Belagsproben genommen und die gefundenen Schäden verschiedenen Abzehrungsmechanismen zugeordnet [1].

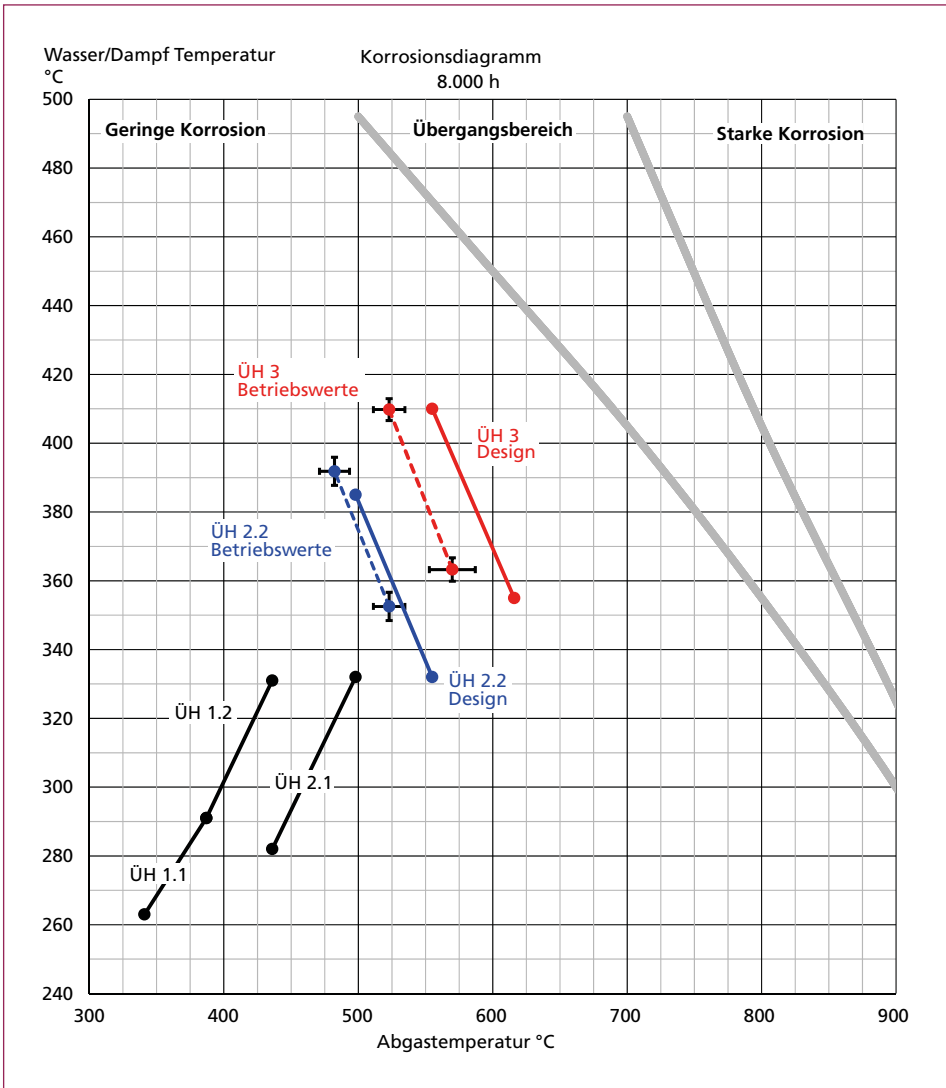


Bild 7: Korrosionsdiagramm für Überhitzer (Auslegungswerte für ÜH 1.1 bis 2.1)

Die vertragliche Minimalschichtdicke des Claddings ab Werk war 2 mm. Testmessungen bei Werksabnahme zeigten an den meisten Stellen eine Dicke von 2,5 mm. Da keine Nulldaten pro Rohr vorliegen, wird bei der Auswertung der Abzehraten eine Anfangsdicke des Claddings von 2,5 mm angenommen.

Die mit einer angenommen ursprünglichen Schichtdicke von 2,5 mm berechneten Abzehraten (Tabelle 4) liegen über den Erwartungswerten (erwartete Standzeit mindestens fünf Jahre). Auffällig ist, dass die Rohre der Seitenwände lokal die höchsten Abzehraten aufweisen. Die Abzehraten unterhalb der Sekundärlufteindüsung sind im

Mittel dreißig Prozent größer als oberhalb. Die Rohrflanken, die zur Abfallaufgabe hin zeigen sind oft stärker abgenutzt. Dieses Verhalten deutet auf den Einfluss randnaher Abgasströme hin [2].

Es wurden insbesondere die optisch am stärksten angegriffenen Rohre vermessen. Aus diesem Grunde sind die Raten nicht auf alle Rohre anwendbar. Als Vergleich sind Messdaten derselben Periode der Firma Kiene Konstruktion + WDM angegeben, die spezifisch nach einem Messplan definierte Rohre vermessen hat [7] (also teils andere Rohre als von CheMin). Wie erwartet sind dabei die Abzehrraten etwas geringer. Kiene hat bereits ein halbes Jahr zuvor die gleichen Rohre gemessen, womit die Entwicklung der Abzehraten berechenbar wird. Dabei ist ersichtlich, dass die Abzehrrate jüngst stark abgenommen hat.

Die Lokalisierung der Abzehrungen ist im Übersichtsbild auf Bild 7 ersichtlich.

Während die durchschnittlichen Raten eine Standzeit von mehr als fünf Jahren zulassen würden, muss die Ursache für die lokal stark erhöhten Raten geklärt und gelöst werden.

	Durchschnittl. Abzehrrate [Magel]	Durchschnittl. Abzehrrate [Westphal]	Durchschnittl. Abzehrrate [Westphal]
	mm/Jahr		
Periode	01/15 – 08/17	01/15 – 08/17	01/15 – 01/17
Linke Seitenwand	0,31 (± 0.16)	0,25 (± 0.11)	0,34 (± 0.12)
Rechte Seitenwand	0,28 (± 0.12)	0,26 (± 0.08)	0,36 (± 0.10)
Vorderwand (wenige Daten)	0,27* (± 0.13)	–	–
Rückwand	0,21 (± 0.11)	–	–

Tabelle 5:

Gemessene Schichtdicken und berechnete Abzehrraten, Linie 2, Zug 1

Quellen:

Magel, G.; Friedl K.: CheMin GmbH, Bericht (intern), 2017

Westphal, U.: Kiene Konstruktion + WDM, Bericht (intern), 2017

* Im Bereich der stärksten Abzehrungen/in den stark betroffenen Bereichen

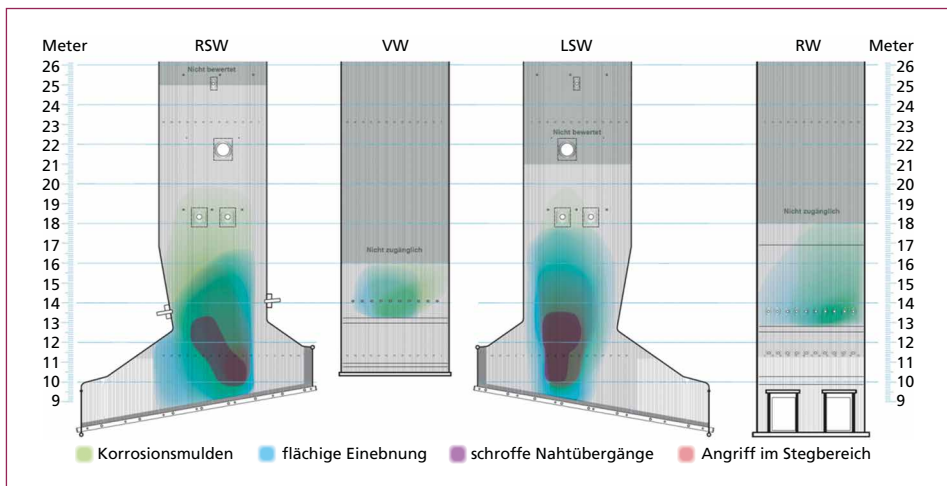


Bild 8: Abzehrungsphänomene im Feuerraum

Quelle: Magel, G.; Friedl K.: CheMin GmbH, Bericht (intern), 2017

Aus dem Bild wird deutlich, dass

- die Seitenwände, insbesondere nahe über dem Brennbett in der Hauptverbrennungszone stärker betroffen sind als die Vorder- und Rückwand,
- die Abzehrungsphänomene im Anschluss an die Hauptverbrennungszone deutlich abnehmen,
- ab einer Höhe von etwa acht Meter über dem Rost (Kote +17,50) keine nennenswerte Abzehrung mehr auftritt. Diese Kote liegt etwa 3,5 m über der letzten Luftzugabe.

Es ist anzunehmen, dass die detektierten Abzehrungen durch die lokal sehr hohen und stark schwankenden Wärmestromdichten in die Kesselwände verursacht werden. Damit ist die Wahrscheinlichkeit für Salzschnmelzenkorrosion erhöht [2], was sich mit den Beobachtungen deckt. Ebenso wechselten sich im Randbereich häufig heiße Flammstrahlen mit kühleren Randstrahlen ab, wobei die Ausfällung gesättigter Salzfrachten vorkommen kann [2].

Folgende Ursachen sind plausibel:

- Im 1. Betriebsjahr war die rostseitige Seitenwandabdichtung ungenügend ausgeführt. Dadurch kam es zu intensiven Flammstrahlen an die Wände (lokal stark erhöhte Primärluftzufuhr/*Schweißbrennereffekt*).
- Dieser *Schweißbrennereffekt* führte abfallseitig im Rostrandbereich zu tieferen Abfallschichthöhen aufgrund des beschleunigten Abbrandes. Dadurch wird dort der Luftstrom weiter erhöht und der Effekt verstärkt. Dieser Effekt wurde inzwischen durch eine konstruktive Verbesserung vermindert. Die jüngsten Cladding-Schichtdickenmessungen von Kiene Konstruktion + WDM bestätigen eine starke Abnahme der Abzehraten.
- Das Primärgas oberhalb der Abfallschicht kann bei hohen Abfallheizwerten lokal sehr hohe Temperaturen erreichen. Bei unterstöchiometrischer Betriebsweise des Rostes sind hierbei im Vergleich zu überstöchiometrisch betriebenen Rosten die Primärgastemperaturen tiefer, was hinsichtlich Korrosion positiv ist. Jedoch liegen auch bei unterstöchiometrischem Betrieb des Rostes die Brennbetttemperaturen im Bereich, bei dem Salze aus dem Abfall ausgetrieben werden.
- Im Vergleich zu einer Feuerfestzustellung resultieren beim Cladding tiefere Wandtemperaturen und höhere Wärmestromdichten. Das Abgas ist dabei im direkten Kontakt mit dem Rohr. Salze können so direkt auf das Cladding abgelagert werden.

Salzschnmelzenkorrosion dominiert das gesamthaft stattfindende Korrosionsverhalten [1]. Beläge infolge reduzierender Abgasatmosphäre wurden zwar lokal auch gefunden (harte, schwarze, kohlige Beläge infolge unvollständiger Verbrennung), weisen aber nicht auf Korrosionserscheinungen oder auf anderweitige negative Auswirkungen auf das Cladding hin. Es lässt sich zusammenfassen, dass der Anlagenbetrieb mit abgesenktem O₂-Gehalt zwar nach der Sekundärluftzugabe höhere Abgastemperaturen zur Folge hat und damit Korrosion tendenziell begünstigt, die größten Korrosionsangriffe jedoch unterhalb der ersten Eindüsungsstufe erfolgt sind. Diese wären bei herkömmlichem

Betrieb mit höherem Primärlambda durch höhere Temperaturen stärker ausgefallen. Im Übergangsbereich zwischen der ersten und der zweiten Eindüsenstufe sind lokal sehr hohe Temperaturen denkbar. Die Form der Korrosionsverläufe deutet jedoch viel stärker auf hohe Flammtemperaturen zwischen Brennbett und Eindüsung hin.

Bei andere Anlagen mit gecladdeten (Inconel 625) Wänden im Feuerraum und vergleichbaren Bedingungen unterhalb der Sekundärlufteindüsung wurden bisher keine derartige Abzehrungen festgestellt.

3. Zusammenfassung

Die Anlage Renergia wird sehr zuverlässig bei etwa 3 Vol.-% O₂ feucht im Abgas betrieben, was etwa $\lambda = 1,20$ entspricht. Der Betrieb bei diesen tiefen Sauerstoffwerten wirkt sich positiv auf Effizienz, Möglichkeit zur Überlastfahrweise sowie Betriebsmittelkosten aus. Diese Fahrweise wird durch moderne Verfahrens- und Regelungstechnik ermöglicht. Die Stabilität der Verbrennung ist als herausragend zu bezeichnen.

Aufgrund der Tatsache, dass die Dauer von CO-Spitzen nur etwa das zwei- bis dreifache der Totzeit zwischen Entstehung und Messung beträgt, wird auf einen schnellen Regeleingriff verzichtet. Vielmehr wird der Sauerstoffgehalt jeweils so angepasst, dass die Einhaltung von Stunden- und Tagesmittelwerten gut gesichert bleibt.

Es ist kein Einfluss dieser Fahrweise auf Korrosion im oberen Teil des 1. Kesselzuges oder auf die Überhitzer im Konvektionszug erkennbar.

Zwischen Rost und knapp oberhalb der letzten Eindüsenstufe wurde Salzschmelzkorrosion festgestellt. Aufgrund des geometrischen Verlaufs und der Tatsache, dass die Angriffe an den Seitenwänden deutlich stärker sind als an Vorder- und Rückwand, ist anzunehmen, dass im Rostrandbereich lokal schwankende Luftüberschüsse und Temperaturen hauptursächlich für die hohen Abzehrungen sind. Dies ist auf bauliche Unzulänglichkeiten zurückzuführen, die nach dem ersten Betriebsjahr weitgehend gelöst wurden. Der Seitenwandabdichtung muss ausreichend Augenmerk geschenkt werden. Ein stärker unterstöchiometrisch betriebener Rost führt zu abnehmenden Spitzentemperaturen im kritischen Bereich. Die periodisch vorgenommenen Messungen an denselben Rohren deuten auf eine zeitliche Abnahme der Korrosionsraten resp. auf die Verbesserung der Seitenwandabdichtung hin. Das weitere Verhalten wird zukünftig über einen längeren Zeitraum untersucht.

Danksagung

Wir danken den Herren Ruedi Kummer und Felix Bolli stellvertretend für das gesamte Renergia-Team herzlich für die Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit während der Anlagenoptimierung.

4. Literatur

- [1] Magel, G.; Friedl K.: CheMin GmbH, Bericht (intern), 2017
- [2] Spiegel, W.; Herzog, T.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.; Albert, F.W.: Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen. CheMin GmbH (online), 2010
- [3] Strobel, R.; Waldner, M.H.; Gablinger, H.: Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EfW) plant. Waste Management, In Press – Corrected Proof, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.049.
- [4] Sørum, L.; Skreiberg, Ø.; Glarborg, P.; Jensen, A.; Dam-Johansen, K.: Formation of NO from combustion of volatiles from municipal solid wastes. Combust. Flame, Vol. 124, 1, 2001, S. 195-212.
- [5] Waldner, M.H.; Halter, R.; Sigg, A.; Brosch, B.; Gehrmann, H.J.; Keunecke, M.: Energy from Waste – Clean, efficient, renewable: Transitions in combustion efficiency and NO_x control. Waste Management, Vol. 33, 2, 2013, S. 317-326
- [6] Waldner, M.H.: HZI Feuerleistungsregelung und FLR+: Sensorik, Leistungsfähigkeit und Potentiale für Laststeigerungen. Fachbeitrag 14. Potsdamer Fachtagung, 2017
- [7] Westphal, U.: Kiene Konstruktion + WDM, Bericht (intern), 2017



STEAG Technischer Service GmbH

Ihre Anlage ist bei
uns in guten Händen.

STEAG Technischer Service GmbH

Trierer Str. 4, 66111 Saarbrücken

Telefon +49 681 9494-01

Telefax +49 681 9494-2277

info-technischerservice@steag.com

www.steag-technischerservice.com

steag
TECHNISCHER SERVICE