

Kontinuierliche Prozessoptimierung durch modell- und sensorbasierte Dampferzeugerreinigung

Nina Heißen, Bhaumik Patel und Christian Mueller

1.	Einleitung.....	208
2.	Brennstoff- und verfahrenstechnische Herausforderungen der Dampferzeugerreinigung	209
3.	Dampferzeugerdiagnose – Stand der Technik –	209
4.	Modellbasierte Dampferzeugerreinigung	210
5.	Sensorbasierte Dampferzeugerreinigung.....	211
6.	Ergebnisse	212
7.	Zusammenfassung	213
8.	Literatur.....	214

Der weltweit steigende Energiebedarf und die permanente Fokussierung auf die Schonung von Umwelt und Ressourcen bedingen eine ständige Effizienzsteigerung von komplexen industriellen Prozessen.

Die Verbrennung von abfallstämmigen Brennstoffen und Biomassen ist durch ständige Veränderung der eingesetzten Brennstoffe gekennzeichnet. Die Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung eines Brennstoffs unterliegt zahlreichen, variierenden Prozessparametern. Die Bandbreite der Belagsintensität reicht dabei von leicht und staubförmig bis hin zu kompakt und klebrig mit der Tendenz zur Bildung von komplexen Ansätzen. Der direkte Einfluss der Prozessparameter auf die Belagsbildung erfordert die kontinuierliche Überwachung der Verschlackungs- und Verschmutzungssituation, um daraus brennstoff- und prozessspezifische Parameter für die Dampferzeugerreinigung abzuleiten. Mit dem Verbund aus direkter Messung, Datenanalyse und Datenbewertung liefert ein Diagnosesystem die notwendige Analysekompetenz, um kontinuierlich wichtige Kontrollparameter zu überwachen und in Echtzeit bedarfsorientierte Handlungsanweisungen festzulegen. Clyde Bergemann hat hierzu ein Dampferzeugerdiagnosesystem entwickelt, das den Anforderungen der Betreiber entspricht und zur Wirkungsgradsteigerung industrieller Prozesse beiträgt.

Im Rahmen dieses Beitrags werden verschiedene Methoden zur Steigerung der Prozesseffizienz von Abfall- und biomassegefeuerten Dampferzeugern untersucht.

Das Ziel ist es, den Dampferzeugerprozess durch den gezielten Einsatz intelligenter On-load Reinigungsgeräte zu optimieren. Das Optimierungssystem analysiert die Dampferzeugerprozesse mittels Sensormesstechnik und/oder anlagenspezifischer Bilanzierungsmethoden und steuert zur rechten Zeit in den richtigen Bereichen des Dampferzeugers Reinigungssysteme mit prozessangepassten Betriebsparametern an und trägt somit zur Steigerung der Anlageneffizienz und -verfügbarkeit bei.

Die Ergebnisse aus ersten Anwendungen bestätigten das Konzept der optimierten On-load Dampferzeugerreinigung: die Belagsansammlungen an den Verdampferheizflächen im Feuerraum und den Leerzügen sowie an den Wärmetauscherbündeln im Konvektivteil werden präzise bestimmt, so dass die Reinigungsaktionen gezielt und bedarfsorientiert ausgeführt werden können. Durch diese Analyse werden Prozessgrößen, wie z.B. Reinigungsmittelverbrauch, Einspritzwassermengen und Abgastemperatur hinter dem Economiser reduziert.

1. Einleitung

Betreiber von Anlagen zur thermischen Umwandlung von Brennstoffen sind ständig bestrebt, die Prozesseffizienz zu erhöhen und damit Betriebskosten sowie Emissionen zu reduzieren. Beim Betrieb dieser Anlagen ist es deshalb unerlässlich, zielgerichtete Optimierungsmaßnahmen durchzuführen, die wiederum detaillierte Kenntnisse über den Zustand der Anlagenkomponenten und über den Prozess voraussetzen. Hier kommen modell- und sensorbasierte Systeme zum Einsatz, die den Prozess analysieren und bewerten und anschließend die Reinigungsgeräte optimiert ansteuern.

Mit SMART Clean hat Clyde Bergemann einen modell- und sensorbasierten Reinigungsansatz entwickelt und erfüllt damit die Anforderung einer intelligenten, an Zielgrößen orientierten Dampferzeugerreinigung. Das System kombiniert die Online-Diagnose mit der Analyse von Belägen auf Heizflächen. Die Diagnose erfolgt dabei durch Sensorsysteme unterschiedlicher Ausprägung, die kontinuierlich wichtige Prozessgrößen messen. Diese Messwerte werden durch verschiedene integrierte Softwaremodule interpretiert und bewertet. Am Ende des Analyseprozesses stehen notwendige Reinigungsaktionen und die dazugehörigen Parameter (Zeitpunkt, Position und Intensität) fest.

Die automatisierte Steuerung des Reinigungsvorganges über diese Diagnoseergebnisse gewährleistet, dass die Dampferzeugerreinigung bedarfsorientiert zum Einsatz kommt und nicht der herkömmlichen Zeitsteuerung unterliegt. Abgestimmt mit anlagenspezifischen Prozessdaten ist zudem gewährleistet, dass sich die Reinigung flexibel auf variierende Brennstoff- und Anlagensituationen einstellen lässt.

In Abfallverbrennungs- und Biomasseanlagen sowie Industriedampferzeugern können Optimierungssysteme mit unterschiedlichen Ausprägungen zum Einsatz kommen. Unter anderem können Sensoren die Beläge in den Feuerräumen detektieren oder es werden Bilanzierungen und Prozessanalysen eingesetzt, um den Dampferzeuger bezüglich seiner Effektivität zu beurteilen und zu optimieren.

2. Brennstoff- und verfahrenstechnische Herausforderungen der Dampferzeugerreinigung

Bei der Verbrennung werden die anorganischen und mineralischen Komponenten des jeweiligen Brennstoffs Temperaturen ausgesetzt, bei der sie je nach Zusammensetzung aufschmelzen und sich vor allem im Feuerraum und den Leerräumen als Schlackeansätze ablagern. Auf ihrem weiteren Weg durch den Dampferzeuger, bleiben Aschepartikel auch im Überhitzerbereich als Ablagerungen zurück. Die Belagsbildung ist zahlreichen, kontinuierlich schwankenden Einflussgrößen unterworfen, wie z.B. der chemischen Zusammensetzung des eingesetzten Brennstoffs und der Dampferzeugerlast. Die Auswirkungen der damit verbundenen nicht gleichmäßig verteilten Belagssituation beschäftigt den Betreiber mitunter sehr intensiv. Die Belagsbildung z.B. bei Volllast ist eine andere als bei Teillast. Die Schlackebildung an den Brennkammerwänden ist sehr stark abhängig vom vorherrschenden Temperaturprofil. In den Überhitzer- und Economiser-Heizflächen ist die Entstehung von Ablagerungen neben dem Abgastemperaturprofil, das direkt die Temperatur der Aschepartikel beeinflusst, vor allem auch vom Strömungsverhalten der im Abgas mitgeführten Aschepartikel abhängig.

Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren und ihrer Abhängigkeiten untereinander, kann es keine generelle, einmal festgelegte und allzeit gültige Reinigungsstrategie geben. Das notwendige brennstoff- und prozesstechnische Wissen, um eine Dampferzeugerreinigung bedarfsorientiert und damit intelligent ausführen zu können, liefern Diagnosesysteme zur Auswertung, Interpretation und Optimierung der Prozesse.

3. Dampferzeugdiagnose – Stand der Technik –

Heute stehen verschiedene EDV gestützte, online arbeitende Systeme zur Diagnose von einzelnen Komponenten oder Bereichen des Kraftwerks zur Verfügung, die die Prozessanalyse und -optimierung erleichtern [1]. Sie erfassen relevante Daten und errechnen zeitgleich Gütegrade sowie andere Prozesskennzahlen. Damit wird die Datenflut auf eine überschaubare Zahl von Werten reduziert, die kontinuierlich visualisiert und für den effizienten Betrieb eines Dampferzeugers genutzt werden können.

Die auf dem Markt verfügbaren Systeme zur Dampferzeugdiagnose sind für den wichtigen Bereich der Dampferzeugerreinigung nur eingeschränkt nutzbar. Die thermodynamische Bilanzierungsrechnung, die in den verschiedenen Diagnosesystemen in unterschiedlicher Ausprägung implementiert ist, erlaubt zwar eine Aussage über die globale Wärmeaufnahme in der Brennkammer, es lässt sich daraus aber keine differenzierte Ableitung von optimalen Reinigungszeitpunkten für einzelne Reinigungsgeräte erzielen. Zudem erfolgt die Dampferzeugerreinigung in den meisten Anlagen zeitgesteuert. Das Diagnosesystem fungiert dabei als automatische Steuerung, wobei die Reinigungssequenz fest für einen typischen Betriebszustand eingestellt ist. Das führt zum verspäteten Reinigungseinsatz mit der Folge, dass die Verschmutzung bereits komplexe Strukturen angenommen hat, die wiederum nur schwer abreinigbar sind.

In anderen Anlagen wird der berechnete Gesamtverschmutzungszustand einer Heizfläche als Auslöser für die Abreinigung genutzt. Somit müssen aufgrund einer fehlenden lokalen Auflösung des Verschmutzungszustands alle Reinigungsgeräte für diese jeweilige Heizfläche in Betrieb genommen werden. Aufgrund des schon beschriebenen ungleichmäßigen Verschmutzungsverhaltens führt die vollständige Reinigung der Heizflächen an einigen Stellen zu unnötigen Reinigungseinsätzen und damit zu unnötigem Dampfverbrauch und erhöhtem Erosionsrisiko. An anderen stark verschmutzten Stellen ist die Reinigung ungenügend, wobei nicht mehr ablösbare Verschmutzungen über die Reisezeit des Dampferzeugers zu einer irreversiblen Reduzierung der Dampferzeugereffizienz führen.

Da die bisher verwendeten Online-Diagnosesysteme nur Hinweise auf die globalen Verschmutzungszustände liefern, ist eine Anpassung der Reinigungsparameter bezogen auf den aktuellen Brennstoff- und Prozessstatus nicht möglich. Ebenso ist das Ergebnis der Reinigungsleistung nicht bewertbar, da lokale Veränderungen der Wärmeaufnahme innerhalb einer Heizfläche aufgrund der globalen Betrachtung nicht ableitbar sind. Gerade dieser Aspekt hat aber weitreichende Konsequenzen auf eine optimierte und effiziente Reinigung und dementsprechend auf die Dampferzeugereffektivität.

Eine prozessbezogene, optimale Einstellung der Reinigungsintensität und eine direkte Diagnose und Beurteilung der Reinigungsleistung führt nicht nur zu einem optimierten Dampferzeugerbetrieb, sondern dient auch der Verminderung des Betriebsmittelverbrauchs, der Erweiterung des nutzbaren Brennstoffbands und der Verringerung der Instandhaltungskosten am Dampferzeuger durch zustands- und wissensbasierte Diagnose.

4. Modellbasierte Dampferzeugerreinigung

Die Komplexität des Prozesses einer thermischen Abfallverbrennungsanlage fordert ein leistungsstarkes Berechnungssystem zur automatischen Überwachung und Optimierung sämtlicher Reinigungsmaßnahmen, denn durch eine manuelle oder intervallgesteuerte Reinigung ist ein optimales Ergebnis nur schwer erzielbar. Bei der modellbasierten Dampferzeugerreinigung wird der Nutzen der Reinigungsmaßnahmen kontinuierlich berechnet und protokolliert. Die Reinigungsgeräte werden darauf aufbauend so gesteuert, dass eine optimale Prozessqualität erzielt wird.

Das hier beschriebene System basiert auf einer eigens entwickelten Berechnungssoftware und verwendet ein auf die konkrete Anwendung zugeschnittenes Prozessmodell, das zur Optimierung von Reinigungsmaßnahmen online Messungen des Anlagenprozesses nutzt. Zur gezielten Untersuchung wird jeder Dampferzeuger in separate Bereiche, wie z.B. Feuerung (einschließlich Rost), Strahlungsteil und Konvektivteil, eingeteilt. Jeder Dampferzeugerbereich umfasst wiederum bestimmte *Reinigungszonen*, die sich durch den Einsatz einzelner Reinigungsgeräte – hier Rußbläser – abreinigen lassen. Zusätzlich werden beim Start der Reinigungsmaßnahmen definierte Minimal- und Maximalzeiten berücksichtigt.

Die Minimalzeit oder auch Sperrzeit genannt, ist die Zeit, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Reinigungen mindestens vergehen muss, bevor eine erneute Heizflächenreinigung ausgeführt werden darf. Die Maximalzeit ist die Zeit, die höchstens zwischen zwei aufeinanderfolgenden Reinigungen vergehen muss, bevor die Reinigung gestartet werden kann.

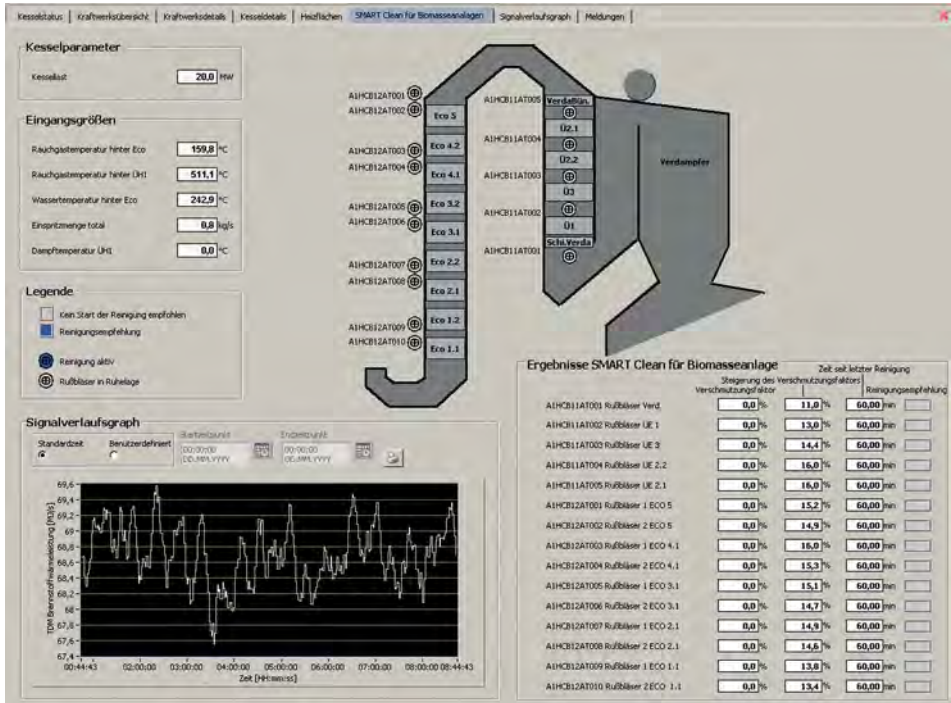


Bild 1: Beispiel eines Bedienbildschirmes mit dargestelltem Prozessmodell

Durch die Verwendung vorhandener Prozessgrößen (Dampf-, Wasser- und Abgasmessungen) wird die Wirksamkeit der Reinigungsmaßnahmen überwacht. Das System optimiert die Reinigungsmaßnahmen nach jeder Reinigung rechnerisch, indem die Ergebnisse des Prozessmodells mit Informationen der vorangegangenen Reinigungsaktionen verknüpft werden. Dabei wird berücksichtigt, welchen Einfluss jede einzelne Reinigungsaktion auf die Steigerung der Wärmeaufnahme und dadurch auf die Dampferzeugereffektivität hat.

5. Sensorbasierte Dampferzeugerreinigung

Der Einsatz von digitalisierten Sensorsignalen in thermischen Anlagen ist heute Stand der Technik. Sensoren gibt es in unterschiedlichen Ausprägungen und können an die jeweilige Anwendung angepasst werden.

In jedem Dampferzeuger sind beispielsweise Temperatur-, Druck und Konzentrationsmessung installiert, um den Prozess zu überwachen. Wenn aber die Verschmutzung detektiert werden soll, müssen besondere Sensoren verwendet werden. Hierzu zählen unter anderem Wärmestromsensoren, die die Wärmeübertragung vom Abgas auf den Wasser-Dampf-Kreislauf messen. Hierbei wird zwischen direkten und indirekten Messmethoden unterschieden.



Bild 2: Direkt messender Wärmestromsensor: SMART Flux Sensor

Ein direkt messender Sensor wird in die Membranwand integriert und misst die Wärmeaufnahme des Wasser-Dampf-Kreislaufes über Thermoelemente auf der dem Feuer zugewandten Seite des Sensors (Bild 2).

Der indirekt messende Sensor misst die Temperaturdifferenz zwischen Rohrscheitel und Membran auf der wärmeisolierten Seite der Flossenwand (Bild 3). Durch Zuhilfenahme von Analysesoftware kann aus der jeweiligen Temperaturdifferenz der Wärmestrom berechnet werden.

Die beiden zuvor beschriebenen Wärmestromsensoren werden zur Detektion von Verschlackungen in Feuerräumen und Leerzügen über die jeweils charakteristischen Wärmeströme verwendet. Entsprechend der Analyse der Messergebnisse werden die jeweiligen Dampferzeugerreinigungsgeräte vollautomatisch angesteuert.

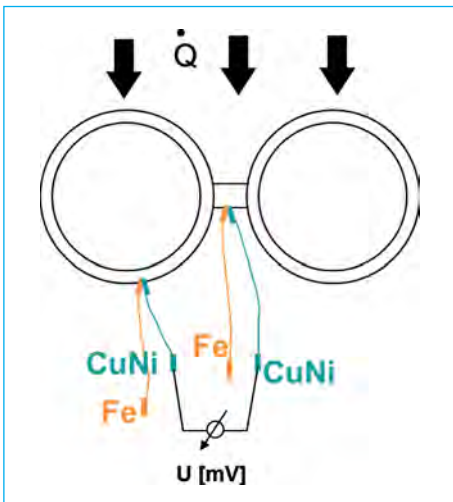


Bild 3: Indirekt messender Wärmestromsensor: Multipoint Sensor

6. Ergebnisse

Erste praktische Erfahrungen zeigen, dass durch den Einsatz modell- und sensorbasierter Systeme zur Dampferzeugerdiagnose der On-Load Reinigungsvorgang optimiert, die Wärmeaufnahme gesteigert und dadurch die Effektivität des Dampferzeugers erhöht wird. Bei der modellbasierten Dampferzeugerreinigung wird der Einfluss jeder Rußbläsergruppe bzw. jedes Rußbläfers beurteilt. Hierüber wird die Wirksamkeit der jeweiligen Rußbläser

ermittelt und es kann der optimale Reinigungszeitpunkt jedes Rußbläasers oder jeder Rußbläsergruppe bestimmt werden. Durch eine kontinuierliche Berücksichtigung der vorangegangenen Reinigungsaktionen und -ergebnisse passt sich das System selbstständig an die aktuelle Situation im Dampferzeuger an. Ergebnisse dieser modellbasierten Dampferzeugerreinigung sind unter anderem eine Steigerung der Wärmeaufnahme der Heizflächen, eine damit einhergehende Reduzierung der Abgastemperatur nach Economiser und eine Steigerung der Generatorleistung. Durch den optimierten Rußbläserinsatz werden weiterhin die Betriebsstunden der Reinigungsgeräte und der Dampfverbrauch reduziert.

Bei der sensorbasierten Reinigung wird die Auflösung der zu überwachenden Wärmetauscherfläche deutlich erhöht und es werden ähnliche bzw. komplementäre Ergebnisse wie bei der modellbasierten Dampferzeugerreinigung erreicht. Zusätzlich kann beispielsweise der absolute Wärmestrom vom Abgas auf den Wasser-Dampf-Kreislauf ermittelt werden. Es ist zudem möglich, dass die installierten Sensoren eine direkte Rückmeldung über den Erfolg einer Reinigungsaktion liefern und übermäßige Materialabzehrung und Schäden an den Rohren vermieden werden.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass sowohl ein modell- als auch eine sensorbasierte Dampferzeugerreinigung jeweils für sich den Wirkungsgrad der Dampferzeugungsanlage steigert, aber im Idealfall eine brennstoff- und anlagenspezifische Kombination beider Methoden zur Prozessoptimierung eingesetzt werden sollte.

7. Zusammenfassung

Optimierte On-load Reinigung spielt in allen Dampferzeugern eine immer größere Rolle. Optimierter Einsatz bedeutet: wann, wo und wie eine On-Load Reinigung unter Berücksichtigung der durch den Anlagenbetrieb vorgegebenen Randbedingungen erfolgen soll.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Prozessdiagnose- und Optimierungssystem leistet einen nachhaltigen Beitrag zur brennstoff- und anlagenspezifischen Reinigung von Dampferzeugerheizflächen. Insbesondere die Kombination von direkten Sensorsignalen mit einer modellbasierten Softwarelösungen führt zu deutlichen Vorteilen beim Betrieb von Dampferzeugern, der heute durch unterschiedlichste Anforderungen gekennzeichnet ist.

Zusätzlich zu den in diesem Beitrag vorgestellten Diagnose- und Optimierungssystemen bietet Clyde Bergemann innovative On-load Reinigungsgeräte an, die gezielt, flexibel und äußerst wirkungsvoll Verschlackungen und Verschmutzungen beseitigen. Als Reinigungsmedium kann je nach Problemstellung Dampf oder Wasser verwendet werden. Gesteuert vom sensorbasierten Diagnose- und Optimierungssystem reinigen diese Geräte nur die verschmutzten Bereiche oder Zonen eines Wärmeübertragers unter Aussparung sauberer Bereiche.

Das System kann sowohl beim Neubau als auch bei der Nachrüstung von Dampferzeugern installiert werden.

Durch den Einsatz modell- und/oder sensorbasierter Dampferzeugerreinigung wird die Reinigung optimiert, die Wärmeaufnahme gesteigert und dadurch die Effektivität des Dampferzeugers erhöht.

8. Literatur

- [1] Leithner, R., Harnisch, K.: Bewertungskriterien für Diagnosesysteme. In: VDI Berichte, Nr. 1641, 2001