



Überwachung und Optimierung von Biomasse-Feuerungsanlagen mit Hilfe automatischer Bildanalyseverfahren

Trauer, O.¹; Kern, P.¹; Bongards, M.¹

¹ Fachhochschule Köln, Campus Gummersbach, Institut für Automation & Industrial IT, Steinmüllerallee 1, 51643 Gummersbach

Abstract

The control methods of today's, industrial biomass combustion plants is mostly done via fixed parameters. In the event of changes to the fuel visual observations of employees serve as a base of readjustment of these parameters.

The aim of this research is the optimisation of such control methods by the flame image analysis from a camera system in combination with an automated regulation system.

Such a system would also work regardless of the type of the fuel.

Kurzdarstellung

Die Regelung heutiger, industriell genutzter Biomasse-Feuerungsanlagen erfolgt meistens über fest eingestellte Parameter. Bei Veränderungen des Brennstoffs dienen visuelle Beobachtungen der Mitarbeiter als Basis der Neueinstellung dieser Parameter. Das Ziel der Forschung besteht in der Optimierung solcher Regelungen durch den Einsatz von Kamerasystemen in Kombination mit einer automatisierten Regelung, die auf Basis von Flammenbild-Analysen funktioniert. Ein solches System wäre auch unabhängig von der Art des Brennstoffs.

1 Einführung

Die auch zukünftig weiter steigende Nachfrage CO₂-neutraler Wärmegewinnung durch moderne Biomasse-Feuerungsanlagen führt zu steigenden Anforderungen an die Verbrennungssysteme und zu einer höheren Nachfrage nach geeigneten Brennstoffen. Immer häufiger werden klassische Brennstoffe wie Holzhackschnitzel durch unterschiedlichste Recycling-Mischbrennstoffe ersetzt. Dies stellt klassische Regelungs- und Überwachungssysteme vor neue Herausforderungen, denn jeder Brennstoff besitzt andere Brenneigenschaften (abhängig von Dichte, Feuchtegehalt, Zusammensetzung, Dosierung) und häufig sind auch Unterschiede des Heizwertes bei gleichem Brennstoff innerhalb einer Charge erkennbar.

Die Regelung heutiger, industriell genutzter Biomasse-Feuerungsanlagen erfolgt ausschließlich über fest eingestellte Regelparameter unter dem Einsatz sensorbasierter Messsysteme. Die entsprechenden Regelparameter werden bei der Inbetriebnahme der Anlage durch erfahrene Servicemitarbeiter der Biomasse-Feuerungsanlage auf die Verwendung eines spezifischen Brennstoffes eingestellt. Die optimale Einstellung der Regelparameter geschieht hierbei meist durch visuelle Beurteilung des Verbrennungsprozesses durch einen erfahrenen Servicemitarbeiter.

Ändert der Betreiber die Brennstoffart, so müssen diese Regelparameter auf den neuen Brennstoff angepasst werden, was für den Betreiber mit erhöhten Servicekosten und für den Vertreiber mit erhöhtem Serviceaufwand einhergeht. Da diese Parameter nur manuell erfasst und eingestellt werden können, sind eine schnelle Anpassung sowie eine Berücksichtigung von Schwankungen innerhalb einer Charge nicht möglich.

Die anschließende Regelung beruht auf Daten des sensorbasierten Messsystems. Dieses dient der Erhebung regelungstechnisch relevanter Daten, wie z.B. der Feuerraumtemperatur, dem Unterdruck oder des Restsauerstoffgehalts der Abgase.

Der Nachteil dieser Methode der Verbrennungsre-

gelung und Überwachung liegt zum einen im kostenintensiven Einsatz der verwendeten Sensorik, welche für die Erfassung der unterschiedlichen physikalischen Messwerte nötig ist. Zum anderen erfolgt die Messung des Verbrennungsprozesses indirekt, da nur die Endprodukte der Verbrennung gemessen werden. Eine direkte Messung des Verbrennungsprozesses, wie sie durch eine Analyse der Flammbildes möglich wäre, wird nicht durchgeführt.

Ein weiterer Nachteil des Messsystems liegt in der langsamen Reaktionszeit zwischen Aktion (Brennstoffzufuhr) und Reaktion (Nachregelung) sowie der damit einhergehenden Nachführung der Verbrennungsparameter. Ein solches Vorgehen kann zu Wirkungsgradverlusten über einen längeren Zeitraum führen.

Die aktuell übliche Betriebsweise – Verwendung von sensorbasierten Messsystemen und gelegentliche Begutachtung des Ausbrandes sowie des Heizraumes durch einen meist mäßig erfahrenen Betreiber einer Feuerungsanlage – führt zu einem weiteren Problem:

Ungenügende Einstellungen der Regelparameter, Verschlackungen auf dem Rost oder hohe thermische Belastungen bei problematischen Brennstoffen bleiben häufig über längere Zeit unerkannt. Während ungenügende Regelparameter oder Verschlackungen meist nur zu einem geringeren Wirkungsgrad und zu höheren Schadstoffbelastungen der Abluft führen, kann die unsachgemäße Verwendung problematischer Brennstoffe (z.B. von Miscanthus) zu erheblichen Beschädigungen des Brennraumes führen. Auf diese Weise können kostenintensive Reparaturen notwendig werden, so dass die Anlage im Extremfall für längere Zeit nicht einsetzbar wäre, was wiederum zu finanziellen Verlusten des Betreibers führen würde.

Um den Wirkungsgrad und die Verfügbarkeit des Verbrennungssystems bei der Verwendung von Recycling-Mischbrennstoffen zu erhöhen, arbeitet die Fachhochschule Köln an neuen Überwachungs- und Analyseverfahren für Biomasse-Feuerungsanlagen.

2 Bildanalytische Beurteilung des Verbrennungsprozesses

Anhand des Flammenbildes lassen sich viele Aussagen über die Verbrennungsqualität machen.

In der Regel wird eine große Flammenfläche angestrebt, denn sie führt meistens zu einer klei-

nen Luftzahl, zu einer geringen Schadstoffbildung und zu einem hohen Wirkungsgrad.

Ist die Luftzahl zu niedrig, so wird die Flamme dunkelrot und weist dunkle Flecken auf.

Ist die Luftzahl zu hoch, so verkleinert sich die Flammenfläche.

Tabelle 1: Darstellung verschiedener Flammenbilder sowie deren Auswirkungen. [Quelle Bilder: Z. Faragó, "Verbrennungsvorgänge in Kaminöfen". Deutsches Zentrum für Luft- Raumfahrt e.V., Mai 2012]

Definition	Flammenbild	Auswirkung
Verbrennung mit sehr kleiner Flamme [1]		Kleine Flammenflächen, Wirkungsgrad unter 50 % und hoher Schadstoffausstoß. Quasi keine Rußbildung und Luftzahl viel zu hoch.
Verbrennung mit zu geringem Luftüberschuss [2]		Rötliche Flammenfärbung, viele dunkle Flächen in der Flamme, starke Rußbildung, Rußbeschlag an der Feuerraumwand sowie hoher CO ₂ -Ausstoß. Allerdings mittlerer bis hoher Wirkungsgrad.
Verbrennung mit zu hohem Luftüberschuss [3]		Überschüssige Luft kühlt die Flamme aus, so dass Verbrennung in der kalten Flamme unvollständig ist. Hoher CO ₂ -Ausstoß, hohe Abgasbestandteile und somit sinkender Wirkungsgrad.
Verbrennung mit sehr guter Luftzahl [4]		Halbtransparente, goldgelbe Flamme. Geringe Rußbildung, niedrige bis mittlere CO ₂ -Bildung, mittlerer bis hoher Wirkungsgrad.
Optimale Verbrennung [5]		Ideales Flammenbild, goldleuchtende halbtransparente Flamme. Geringe Rußbildung, geringer CO ₂ -Ausstoß, hoher Wirkungsgrad (optimale Luftzahl).

2.1 Einsatz eines optischen Messsystems

Ein erfahrener Servicemitarbeiter kann anhand der oben dargestellten Flammenmerkmale, die aktuellen Regler-Einstellungen beurteilen und entsprechend handeln.

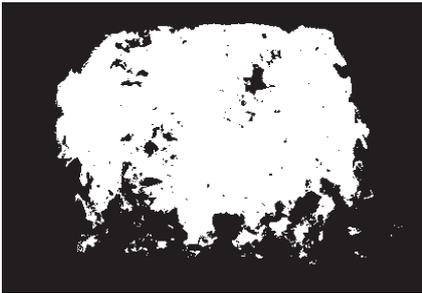
Im Vergleich dazu bieten der Einsatz einer Kamera sowie die Anwendung moderner, bildanalytischer Verfahren ebenfalls gute Beurteilungsmöglichkeiten des Verbrennungsprozesses. Auf diese Weise kann der Prozess kontinuierlich und über einen frei wählbaren Zeitraum dauerhaft optimiert und überwacht werden.

Im Rahmen erster Untersuchungen hat die Fachhochschule Köln diverse Algorithmen entwickelt, die der Analyse eines aufgenommenen Flammen-

bildes dienen. Während der Anwendung sollen diese Algorithmen Aussagen über die Flammengröße, die vorherrschende Temperatur, den Wirkungsgrad sowie die Luftüberschusszahl ermöglichen. Ziel ist die stattfindende Verbrennung optisch zu erfassen und anhand ihrer eine Bewertung vornehmen zu können. Zu diesem Zweck wird der Verbrennungsvorgang mit einem Kamerasystem aufgenommen und zunächst in ein Binärbild umgewandelt. Bei diesem Vorgang wird der Flammenanteil des Bildes weiß (Binärwert 1) und der Hintergrund schwarz (Binärwert 0) gefärbt.

Die Erstellung der Binärbilder wird nach dem Verfahren von Otsu vorgenommen. Hierbei bestimmt der Schwellwert ab welcher Helligkeit Pixel im Ein-

Tabelle 2: Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte von der Originalaufnahme, über das Binärbild bis zum separierten Flammenbild. [Quelle Bilder: Kampa]

Titel	Flammenbild	Beschreibung
Originalaufnahme		Originalaufnahme des laufenden Verbrennungsprozesses.
Separierung		Die Separierung der Flamme vom Bildhintergrund wird mit Hilfe des Verfahrens von Otsu vorgenommen. Der Schwellwert bestimmt die Einteilung der Pixel in die Farbstufen weiß und schwarz.
Maskierung		Das schwarze Binärbild wird über das Originalbild der Verbrennung gelegt (<i>Maskierung</i>), wodurch die Flamme verarbeitet werden kann.

gangsbild den Wert „Eins“ zugewiesen bekommen und somit im Binärbild als weiß dargestellt werden. Alle Pixel, die dunkler als der Schwellwert sind, werden dem Wert „Null“ und damit der Farbe Schwarz zugeordnet.

Das Verfahren von Otsu nach Nobuyuki Otsu stammt aus dem Jahre 1979 und verwendet statistische Hilfsmittel, wie zum Beispiel die Varianz um einen optimalen Schwellwert zu bestimmen. Die Varianz ist ein Maß für die Streuung, in diesem Fall für die Streuung der Grauwerte des Bildes, welches in ein Binärbild umgewandelt werden soll.

Durch die Bestimmung des Verhältnisses zwischen dem Anteil der weißen Pixel zur Gesamtpixelzahl des Binärbildes, wird die Flammengröße des Verbrennungsvorganges ermittelt. Im weiteren Verlauf der Flammenbildanalyse wird das schwarze Binärbild über das Originalbild der Verbrennung gelegt (maskiert), was ein Ausblenden des Hintergrundes bewirkt und eine weitere Verarbeitung der nun verbleibenden Flammen ermöglicht.

2.2 Konvertierung in Farbraum

Im nächsten Schritt kommt eine Clusteranalyse zum Einsatz, wofür das Bild zunächst in den $L^*a^*b^*$ Farbraum konvertiert wird. Der $L^*a^*b^*$ Farbraum ist auf Grundlage der Gegenfarbtheorie konstruiert. Der $L^*a^*b^*$ Farbraum ist ein geräteunabhängiger Farbraum, das heißt, die Farbdarstellung ist unabhängig von der Art ihrer Erzeugung und Wiedergabetechnik. Der so standardisierte Farbraum ist gleichabständig und jede wahrnehmbare Farbe ist durch den Farbort mit den Koordinaten $\{L^*,a^*,b^*\}$ definiert. Hierbei orientieren sich die Koordinaten an den physiologischen Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung und basieren nicht unmittelbar auf physikalischen Farbvalenzen. Zudem sind Farben und Helligkeiten im Gegensatz zum RGB-Farbraum in separaten Kanälen.

Die Helligkeit (Lightness) wird durch den Parameter L^* beschrieben und die Werte liegen in einem Bereich von 0 bis 100 %. Hierbei entspricht 0 % schwarz und 100 % weiß. (Bei dem RGB-System lie-

gen alle Parameter im Bereich von 0 bis 255 %).

Die Parameter a^* und b^* enthalten die Farbinformation. Diese liegen in einem Bereich von -100 bis 100. In Anwendung der Gegenfarbtheorie liegen Grün und Rot auf dem a^* -Parameter, Blau und Gelb auf dem b^* -Parameter. Das heißt, positive a^* -Werte sind rötlich, negative a^* -Werte grünlich, positive b^* -Werte gelblich und negative b^* -Werte bläulich.

Der Vorteil dieser Konvertierung liegt darin begründet, dass die Farbinformation getrennt von der Helligkeitsinformation analysiert werden kann.

2.3 Clusteranalyse

In einem nächsten Schritt kommt die Clusteranalyse zum Einsatz, die mittels des k-means-Algorithmus erfolgt. Der k-means-Algorithmus bildet aus einer Menge ähnlicher Objekte eine vorgegebene Anzahl von Gruppen (Cluster). Nachfolgend findet eine Schwerpunktbestimmung der einzelnen Cluster statt, diese Bestimmung erfolgt zufällig. Im Anschluss hieran wird jedes Objekt dem ihm am nächsten gelegenen Schwerpunkt zugeordnet.

Der beschriebene Vorgang der Schwerpunktbestimmung wiederholt sich solange, bis sich die Schwerpunkte nicht weiter verändern, bzw. bis die Anzahl der vorgegebenen Wiederholungen erreicht wurde.

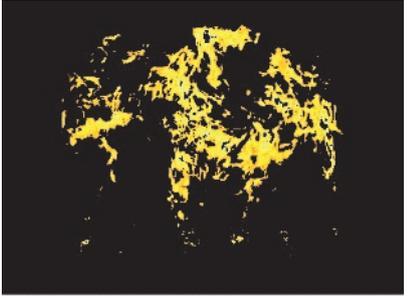
Auf diese Weise wird das Flammenbild in drei Bereiche aufgeteilt:

- rote Flamme
- gelbe Flamme
- weiße Flamme

Hierbei handelt es sich um die Flammenfarben, wie sie während einer Verbrennung auftreten können. Dabei kann anhand der Farbanteile die entsprechende Temperatur der Verbrennung identifiziert werden. Hierbei gilt, je heller die Farbe, um so heißer die Temperatur (vgl. Tabelle 3).

Durch eine genauere Analyse dieser Cluster können somit Rückschlüsse auf die Verbrennungsqualität und die kritischen Verbrennungszustände getroffen werden.

Tabelle 3: Clusterbildung der Flammenbilder nach Farbanteilen. [Quelle Bilder: Kampa]

Flammenfarbe	Flammenbild	Beschreibung
Rot		Pixelcluster mit orangem Flammenanteil (niedriger relativer Temperaturbereich).
Gelb		Pixelcluster mit gelbem Flammenanteil (mittlerer relativer Temperaturbereich).
Weiß		Pixelcluster mit weißem Flammenanteil (hoher relativer Temperaturbereich).

3 Ergebnisse

Die automatische Betrachtung der Verbrennung unterscheidet anhand verschiedener Faktoren über die Verbrennungsqualität. Ein besonderes Ziel liegt in der Früherkennung von nicht gewünschten Zuständen.

Bei einem Feueranteil von unter 30 % ist die Flamme zu klein, auch die ermittelten Farbwerte sind sehr niedrig (vgl. Tabelle 1, Bild 1). Hieraus kann geschlossen werden, dass der Luftüberschuss zu hoch ist und der Wirkungsgrad unter 50 % sinkt. In diesem Fall wäre es sinnvoll neuen Brennstoff in den Brennraum zu fördern, allerdings nur so viel, dass die Luftüberschusszahl in den idealen Bereich gelangt.

Liegt eine Verbrennung mit zu niedrigem Luftüberschuss vor, so ist der gesamte Farbwert niedrig, und es gibt viele Pixel in den dunklen Clustern. Hieraus lässt sich auf ein niedriges Temperaturniveau schließen, obwohl der Feueranteil relativ hoch ist (vgl. Tabelle 1, Bild 2). In einem solchen Fall liegt zwar ein relativ guter Wirkungsgrad vor, allerdings ist der CO₂-Ausstoß unerwünscht hoch. Als erste Maßnahme würde die Luftzufuhr erhöht.

Bei einem Flammenbild mit sehr hohem Farbwert, und einer Clusterverteilung mit vielen Pixeln in den helleren Clustern, liegt eine Verbrennung mit zu hohem Luftüberschuss vor (vgl. Tabelle 1, Bild 3). Bei diesem Flammenbild wird durch den hohen Luftüberschuss die Flamme ausgekühlt und redu-

ziert sich auf die heißen Bereiche direkt oberhalb der Glut bzw. des Brennstoffes. Außerdem liegt hierbei nur ein geringer Wirkungsgrad, dafür aber ein hoher Schadstoffausstoß vor. Potenzielle Maßnahmen wären das Umschichten des Brennstoffs, das Fördern von neuem Brennstoff oder auch das Senken der Luftzufuhr, wodurch der Luftüberschuss gesenkt und eine optimale Verbrennung erreicht werden können.

Im Idealfall liegt ein optimales Flammenbild vor (vgl. Tabelle 1, Bild 5). Dieses besitzt einen großen Feueranteil, hohe Farbwerte in den einzelnen Clustern und auch insgesamt einen hohen Farbwert. Extreme Pixelverteilungen sind auch in den einzelnen Clustern nicht vorhanden. In Bild 5 ist gut zu erkennen, dass die Flamme eine relativ große Fläche besitzt und neben weißen, heißen Flammenbereichen auch kühlere, orange Bereichen besitzt. Die Luftzahl liegt hierbei im optimalen Bereich und die Regelung würde keine weiteren Schritte veranlassen.

Zukünftig sollen die gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen eines weiteren Projekts genauer untersucht werden.

Referenzen

- Farago, Z. (2012): Verbrennungsvorgänge in Kaminöfen. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Kampa, J. (Bachelorarbeit) (2013): Entwicklung und Erprobung bildanalytischer Verfahren zur Optimierung von Verbrennungsprozessen industrieller Biomasse-Feuerungsanlagen. Cologne University of Applied Sciences.
- Rehbach, J. (Bachelorarbeit) (2012): Entwicklung und Erprobung bildanalytischer Methoden zur Optimierung der Verbrennungsprozesse von nachwachsenden Rohstoffen in industriellen Feuerungsanlagen. Cologne University of Applied Sciences.
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Abgasmessung> [Online]