

Optimierungspotenzial bei der Kombination von video- und infrarot-kamera-basierten Kenngrößenberechnungen für die Feuerleistungsregelung

Christian Gierend, He Ping, Uwe Schneider und Sebastian Georg

1.	Motiv	94
2.	Zielstellung und Lösungsansatz	95
2.1.	Zielstellung und Lösungsansatz Videokamera	95
2.2.	Zielstellung und Lösungsansatz Infrarotkamera	101
3.	Vorteile beider Systeme in Symbiose und Synergie.....	104
4.	Ausblick und Zusammenfassung.....	106
5.	Literaturverzeichnis	108

Die thermische Behandlung von Abfällen basiert auf deren Verbrennung. Sie ist eine Weiterentwicklung der primär der Abfallbeseitigung dienenden Abfallverbrennung der letzten Jahrzehnte aufgrund einer geänderten Aufgabenstellung [1]. Die Verbrennung mittels Rostfeuerung hat sich über viele Jahrzehnte als ein Verfahren zur thermischen Behandlung von Hausmüll und hausmüllähnlichem Gewerbemüll bewährt. Neben der sicheren Entsorgung stehen der emissionsarme Anlagenbetrieb, die energetische Verwertung und eine weitgehend stoffliche Nutzung der Reststoffe im Vordergrund.

Somit kommt in Zeiten fortschreitender abfallwirtschaftlicher Maßnahmen dem umweltschonenden Energierecycling von Abfällen eine zunehmende Bedeutung zu. Von großer Relevanz sind dabei die Optimierung des Verbrennungsvorganges (gleichmäßige Wärmefreisetzung und ungestörte Verbrennungsabläufe, stabile Feuerlage, Feuerlänge und Feuerintensität) und die damit verbundene Verbesserung des Ausbrandes, der Abgaszusammensetzung und der festen Verbrennungsrückstände. Wichtige Voraussetzung für minimale Emissionen ist die Feuerungsregelung, die Unregelmäßigkeiten beim Verbrennungsvorgang ausregeln kann. Dies geschieht dann, wenn sichere Informationen zu Feuerlage, Feuerlänge und Feuerintensität vorhanden sind und diese Informationen auch in der Feuerleistungsregelung Einfluss finden oder deren Relevanz bei Handeingriffen zum Tragen kommt.

1. Motiv

Die erfolgreiche Applikation innovativer Technologien in einfachen Regelkreisen, insbesondere die Anwendung von kamera-basierten Systemen, weckte in der letzten Zeit die Hoffnung, solche Technologien ohne weiteres für Systemlösungen auf komplexe Prozesse mit direkter Flammenbildauswertung übertragen zu können. Technische und wirtschaftliche Grenzen bei Mehrgrößenproblemen in der Kraftwerkstechnik, speziell in der Feuerungstechnik und in wärmetechnischen Prozessen mit Flammeneinwirkung, Ruß- und Partikeleintrag, ebenso Wärmestrahlung von unverbrannten Gasen, fordern noch effektiver, anlagenspezifische Kenntnisse aus den verfahrenstechnisch nachvollziehbaren Reaktionsabläufen der Feuerung in optimierte Regelungsentwürfe einzubringen.

Diese Umstände und die ständig kritische Diskussion der Abfallverbrennung in der Öffentlichkeit zwingen die Betreiber zu noch deutlicheren Verbesserungen. Gerade weil sich viele Betreiber von Abfallverbrennungsanlagen dem Druck ausgesetzt sehen, dass nicht objektiv über ihre Arbeit in öffentlichen und privaten Medien berichtet wird, entsteht hier mitunter ein neuer Markt für innovative Technik zur Optimierung von komplizierten Verbrennungsprozessen. Die Verbesserung jeglicher Regelungen in thermischen Abfallbehandlungsanlagen stellt hinsichtlich einer Minimierung der Betriebskosten und der sich ständig verschärfenden gesetzlichen Emissionsgrenzwerte eine wichtige Aufgabenstellung dar, für Forschung und Wissenschaft, als auch primär für den Anlagenbau. Aus diesem Grund werden gerade von Anlagenbetreibern immer deutlichere Forderungen an die Industrie lauter. Leider erreichen diese Postulate die Wissenschaft- und Forschung verspätet, da zurzeit immer noch eine große Distanz besteht, dass innovative Betreiber sich mehr der Unterstützung wissenschaftlicher Dienstleistungen öffnen und Forschungseinrichtungen in den Tagesablauf für Optimierungsmaßnahmen einbeziehen.

Gründe dafür sind vielfältig, liegen aber im Schwerpunkt bei der ausgedünnten Personaldecke, die sich während des Tagesgeschäfts nicht mehr mit wissenschaftlich fundierten Optimierungsmaßnahmen auseinander setzen kann und will. Worüber sich aber alle, die heute Forderungen an eine innovative und intelligente Feuerleistungsregelung stellen, einig sind, ist der Umstand, dass folgende Anforderungen erfüllt sein sollten:

- Die Regelung der Prozesse ist so komplex, dass auch die Insider des Automatisierungsgeschäfts dazu ausschließlich so genannte *Multivariable Kennfeldregler* empfehlen und fordern.
- Lernfähige und vorausschauende Softwaretools zur Unterstützung der wissensbasierten Regelungen sollen folgen. Das heißt, dass sich die Anlagen mit ihrem eigenen Wissensspektrum optimieren wollen und somit eine noch stärkere Unabhängigkeit gegenüber externer Service-Leistung aufbauen möchten (Eigenständigkeit ist angesagt)
- Immer ein Auge am Feuer (Glas-, Stahl- und Kraftwerksindustrie steht im Fordergrund). Diese Forderung geht nur mit verbesserter Flammenbeobachtung, mittels Kamertechnik und Auswertesoftware.

- Einfache und schnelle Kopplung via OPC mittels TCP/IP-Protokolle, usw. ...
- Verständliche Regelanweisungen, womöglich *rein mit Sprachbefehlen*, vom Verfahrenstechniker für den Verfahrenstechniker oder vom Betriebsmann für den Betriebsmann. Ein Produkt, das in der Lage ist mit Sprache komplexe und mehrgrößenbehaftete Regelungsaufgaben zu übernehmen, womöglich verbal vorhandenes Wissen direkt in eine maschinenlesbare Schreibweise zu transferieren.

2. Zielstellung und Lösungsansatz

Zur Regelung von Hochtemperaturprozessen ist es essentiell, genaue Kenntnisse der verbrennungstechnischen Abläufe zeitnah erfassen und bewerten zu können. Dies geht und ging mit dem menschlichen Auge ganz gut. Geschulte und erfahrene Anlagenfahrer kennen den Verbrennungsprozess in ihrer Anlage und können Veränderungen im Flammenbild unmittelbar einem vorausgehenden Ereignis und einem Umstand zuordnen. Aus diesem Grund wurden für die Ausbrandverbesserung Videokameras, auf den Ausbrandbereich schauend, eingebaut und deren Kamerabild auf separaten Monitoren in der Warte installiert. Oft finden sich solche Kamerabilder gestört durch verschmutzte Scheiben (eine zyklische Reinigung durch die Rundgänger ist notwendig) oder veralteter Bildschirmqualität. Dem könnte mit einfachen und kostengünstigen Neuanschaffungen Abhilfe zukommen, wenn man denn wollte. Das Anlagenpersonal wüsste das zu schätzen. In persönlichen Gesprächen mit dem Wartenpersonal wird sehr schnell deutlich, dass ein großes Wissenspotenzial über das Kamerabild existiert und dieses Wissen, was sich um das Flammenbild, die Schattierungen (völlig unscharf und fast hypothetisch anmutend) und die sich ändernde Flammenfront ballt, nicht so trivial ist, wie man glauben mag, aber sehr logischen Schritten im Verbrennungsablauf von Abfallverbrennungsanlagen gehorcht.

Schwankungen in der Abfallzusammensetzung können vom geschulten Personal anhand von diesen Bildern sehr früh erkannt werden. Leider ist die Aufmerksamkeit des Wartenpersonals nicht mehr primär bei der Feuerung, sondern wird von Sekundärprozessen, wie der komplexen Abgasreinigung und deren Aggregate oder das Rußblasen, eingefordert. Erst dann können notwendige Handeingriffe in die Automatik der Feuerleistungsregelung getätigt werden, meist zu spät, da nur eine kontinuierliche Beobachtung des Flammenbildes ein frühes Eingreifen veranlasst hätte. Somit entstehen Totzeiten, deren Auswirkungen im Ausbrandbereich behoben werden müssen. Diese Zeit der gezielten Kamerabildauswertung kann dem Anlagenpersonal aus Kostengründen nicht zugestanden werden. Um so mehr wird damit der Weg frei für eine vorausschauende Software (künstliches, permanentes Auge am Feuer), die solche Kamerabilder permanent beobachtet und mittels Kenngrößenberechnung und deren Veränderung (differenzierte Betrachtung) auch auf neue Feuerraumsituationen rechtzeitig aufmerksam macht.

2.1. Zielstellung und Lösungsansatz Videokamera

Die Einbausituation einer Videokamera findet sich meistens in einer bestehenden Öffnung zum Schlackeabwurf und zu den Feuerraumtüren. Eine Schnittzeichnung könnte wie folgt in Bild 1 aussehen. Die Kamera blickt hier zum Beispiel

auf einen Walzenrost mit einer kurzen Zünddecke und einer lang gezogenen Ausbranddecke. Der Öffnungswinkel dieser Kamera erlaubt nicht den Blick auf die Feuerfront, sondern nur auf den Ausbrandbereich. Von Vorteil wäre es, wenn der Einblickwinkel auf den Rost nicht sehr flach wäre, die Feuerwand direkt erfasst wird und deren Verlauf bis in die Umlenkung von *Feuerraum zu erstem Kesselzug* erfolgen könnte.

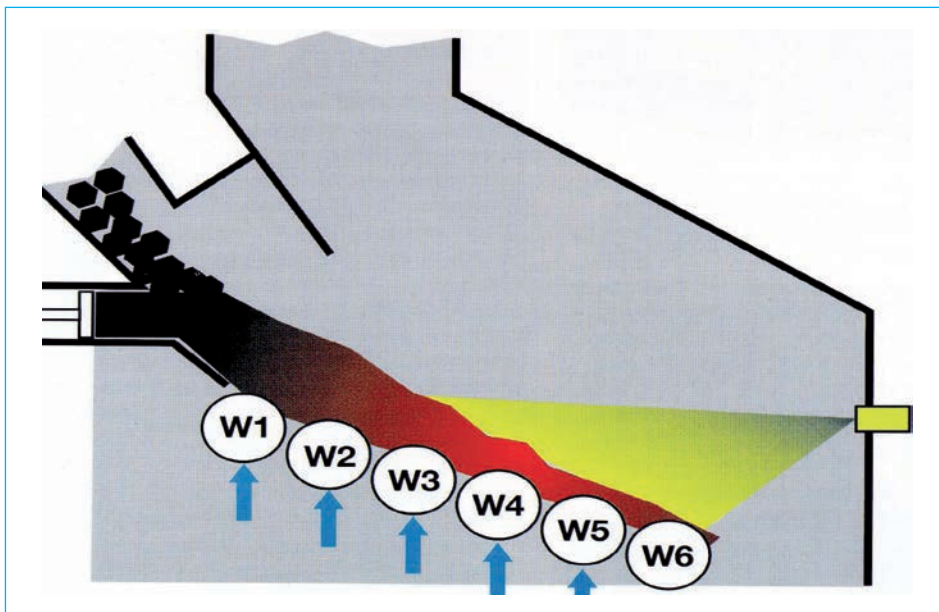


Bild 1: Schnitt durch den Feuerraum mit Beobachtungsprofil einer Videokamera

Quelle: Walzenrosthersteller

Für den Einsatz einer Videokamera und deren Einbauort sind ebenso essentiell, dass die örtliche Veränderung von Feuerlage, Feuerlänge und Feuerintensität verfolgt werden können. Daher eignen sich Feuerräume mit markanten geometrischen Einbauten, wie dem Sturz oder einer Ausbrandstufe sehr gut, die räumliche Orientierung (menschliches Auge, als auch Kamera) für die Lage des Verbrennungsprozesses wie in Bild 2 sicher zu stellen.

Der Einblick in den Betrieb einer Feuerung ist weniger klar und ist geprägt durch die vorab schon erwähnten Hinlänglichkeiten des Betriebsalltags einer Abfallfeuerung (verschmutzte Glasscheiben, schlechte Bildschirmdarstellung durch veraltete Bildschirme, Flimmern des Bildes durch elektromagnetische Störungen auf das Videokabel, etc. ...). Bild 3 zeigt ein Feuerraumbild über den Abwurf eines Horizontalvorschubrostes, einbahnig, vier Luft- und Rostzonen, mit direkt vorstehender Flammenfront. Der Ausbrand im unteren Teil von Bild 3 zeigt keine Flammenaktivität und das Ausbrandbett liegt geschlossen. Der Blick in die Mitte des Bildes und auf die stehende Flammenfront ist klar. Staub- und Brüdeneinwirkungen sind minimal oder gar nicht vorhanden. Eine erhöhte

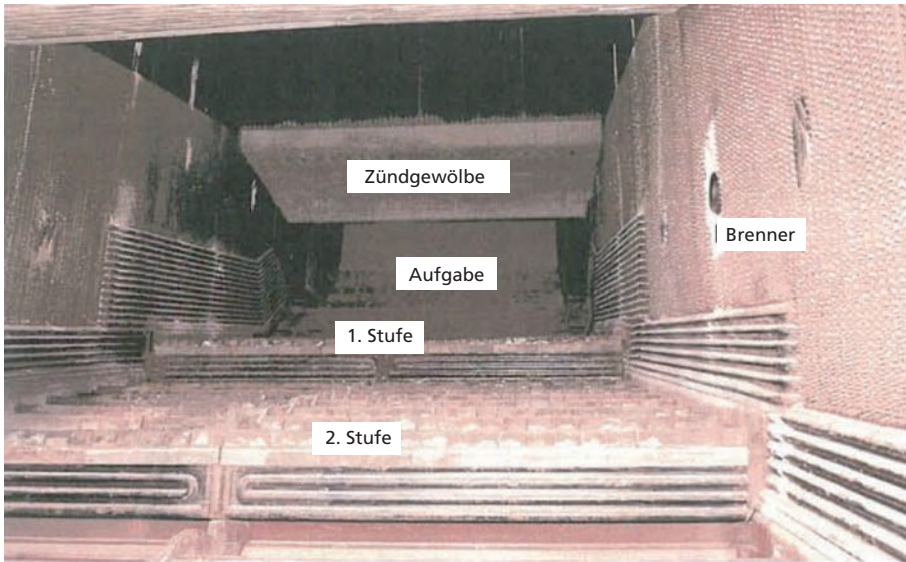


Bild 2: Leerer Feuerraum eines Vorschubrostes mit 2 Stufen

Quelle: VorschubrosthHersteller

Primärluftfrate im Bereich der Ausbrandzone ist auszuschließen. Der Betrieb scheint an für sich ungestört abzulaufen, wäre da nicht das geschulte Auge des motivierten und engagierten Anlagenfahrers oder einer Videobildauswertesoftware, die in der Flammenfront Unregelmäßigkeiten und ein Hindeuten auf eine Überschüttung registrieren. Die in diesem Feldversuch von uns verwendete Videobildauswertesoftware wurde vom Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für angewandte Informatik IAI, entwickelt und wird vertrieben von der ci-Tec GmbH, ebenfalls in Karlsruhe.

Die hellen Schattierungen in Bild 3 und Bild 4 deuten auf Flammenmaxima hin. Das linke und das rechte Flammenmaximum sind deutlich größer als das mittlere Flammenmaximum. Über den Flammenmaxima stehen graue Ruß- und Flammenwalzen (Verwirbelungen und lokale Rückströmungen), denn nur die Flammenmaxima sind sehr hell und haben eine hohe Flammenfluktuation (Strömungsgeschwindigkeit). Genau am Übergang von hellweißer Flamme und grauen Flammenwalzen reißt die Flammengeschwindigkeit ab und lässt auf sehr viel Ruß, Staub und unverbrannte Gase schließen, die nun in den ersten Kesselzug hineingerissen werden. Weiterhin deuten diese zerrissenen Flammenmaxima im Vordergrund darauf hin, dass sich eventuell die zwischen den Flammenmaxima abzeichnenden Schattierungen als Abfallberge hinter der Flamme entpuppen. Es droht ungezündeter Brennstoff durchzubrechen oder noch schlimmer, dass ein Berg an Brennstoff die ganze Flammenfront erdrücken könnte. Damit würde dem Gesamtprozess im Feuerraum die notwendige Energie für die ungestörte Verbrennung fehlen. Erschwerend kommt noch dazu, dass sich auf der rechten Bildseite, also der linken Feuerraumwand eine Wächte gebildet hat, die fast

bis auf den Rost herunterreicht. Die Videobildauswertesoftware hat sofort die Flammenmaxima erkannt, diese weiter differenziert beobachtet und notwendige Kenngrößen für die Feuerleistungsregelung errechnet. Anhand dieser geänderten Kenngrößen wurde von der Feuerleistungsregelung zuerst das schnellste Medium, eine notwendige Primärlufterhöhung in Zone 1 und 2, angefahren (Bild 5). Diese Erhöhung der Primärluft in Zone 1 und 2 hat dazu beigetragen, dass sich zwar die Flammenmaxima nicht zu einer Flammenfront vereinigt haben, aber dennoch konnten sie sich stabilisieren und weiter ausbrennen, was an den hellen Flammen (in rot eingerahmt) erkennbar ist. Ganz leicht angedeutet finden sich in Bild 5 auch helle Flammenerscheinungen über der linken und der mittleren Flamme im oberen Bildrand. Diese Flammenaktivität entsteht an den Sekundärluftdüsen, die von diesem Kamerabild noch erfasst werden.



Bild 3: Aufnahme des Feuerraumgeschehens zum Zeitpunkt x plus 0 Minuten



Bild 4: Aufnahme des Feuerraumgeschehens zum Zeitpunkt x plus 0 Minuten Kennzeichnung der Flammenmaxima

Quelle: Horizontalvorschubrot, einbahnig, vier Luft- und Rostzonen

Eine Verbesserung der Situation von Bild 5 kann jetzt nur noch eine Rostschürwirkung herbeiführen. Diesen Eingriff zeigt Bild 6 mit verbesserten Bedingungen für Feuerlage, Feuerlänge und Feuerintensität. Die Ausbildung von Fackeln im Bereich der Sekundärluftdüsen (Bild oben links) und die nun endlich geschlossene Feuerfront deuten auf vermehrtes Entgasungsverhalten und ein effektives und nachweisliches Einwirken der Primärlufterhöhung und der Schürbewegung hin. Die Feuerwand ist geschlossen, die Flammenhöhe und Flammenfluktuation sind annähernd gleich und sehr intensiv, so dass eine ausreichende Flammenstrahlung auf den hinter der Flammenfront liegenden Brennstoff erfolgt ist und weiter hin erfolgen kann.

Auch die grauen Ruß- und Walzenflammen sind weitgehend verschwunden. Die Kenngrößenberechnung der Videobildauswertesoftware liefert optimale Werte an die Feuerleistungsregelung. Das Erscheinungsbild von Fackeln im Sekundärluftbereich lässt die Gesamtsekundärluftmenge weiter ansteigen um unverbrannte Gasbestandteile (Kohlenmonoxid CO, CO-Strahlenbildung) und Heißgasstrahlen

schon im Keim zu ersticken, bevor diese über die Emissionsmessungen am Kesselende verspätet dem Anlagenfahrer mitgeteilt werden. Mit dieser Art der Flammenbetrachtung lässt sich auch eine effektivere und vorausschauende Regelungsstrategie mittels Videobildauswertesoftware verwirklichen. Sie dient damit nicht nur der Ausbrandsicherung.



Bild 5: Aufnahme des Feuerraumgeschehens zum Zeitpunkt x plus 1 Minute; Kennzeichnung Flammenmaxima, jedoch noch keine geschlossene Front



Bild 6: Aufnahme des Feuerraumgeschehens zum Zeitpunkt x plus 2 Minuten; Kennzeichnung Flammenmaxima, geschlossene Front unterer roter Rahmen; Sekundärluftdüsen als Fackeln im oberen roten Rahmen

Ein wirkliches Erkennen der vorgeschalteten Intensitäten der Reaktionsabläufe (Trocknung, Pyrolyse, Zündung, Vergasung) im Brennstoff auf dem Rost ist beim Blick mit einer Videokamera nicht wirklich gegeben. Sowohl die Draufsicht auf die Feuerfront, die Flammenlage, -verteilung und Fluktuation, als auch das Verhalten und die Bildung von Fackeln an den Sekundärluftdüsen lassen nur erahnen, was hinter den Flammen reaktionstechnisch abläuft oder ablaufen müsste. Feuerlage, Feuerlänge und Feuerintensität sind ein mannigfaltiges Produkt aus Heizwert, Stückigkeit, Entgasungs- und Abbrandverhalten des Brennstoffs. Feuerraumgeometrie, Ausprägung und Lage der Ausbranddecke, der Seitenwände, das Wärmestrahlungsreflexionsverhalten oder das Absorptionsverhalten bei einwirkender Wärme sind unendliche Freiheitsgrade bei der Modellierung eines Abfallfeuers. Ein tieferes Verstehen der möglichen Einflussnahme eines ungestörten Ablaufs der Reaktionen hinter der Flammenfront wäre entscheidend. Die Grundlagen zu den Reaktionsabläufen sind in vielen Sekundärliteraturstellen nachzulesen, nur die Gewissheit, dass auch an diesen Stellen die notwendige Energie über direkte oder indirekte Flammenstrahlung zur Verfügung steht, bleibt als Frage offen.

In Bild 7 bis 10 wird dem theoretischen Teil der Spekulationen über Wärmestrahlung Rechnung getragen. Brennstoff mit normal üblichem Heizwert, Stückigkeit, Entgasungsverhalten, Zünd- und Abbrandverhalten ohne Auffälligkeiten wird wie in Bild 7 verbrennen und gleichmäßig seine Intensität der Reaktionszonen ausprägen, wenn ausreichend Strahlungseintrag in das Abfallbett erfolgt. Steigen der Heizwert und alle anderen Werte, werden sich Feuerlänge, Feuerlage und

Feuerintensität danach ausrichten und Richtung Brennstoffzuteiler intensivieren (Bild 8). Fällt dagegen der Heizwert und alle anderen Werte, wird gerade für die Ausprägung der ersten drei Reaktionszonen mehr Zeit und mehr Raum (Länge) auf dem Rost benötigt.

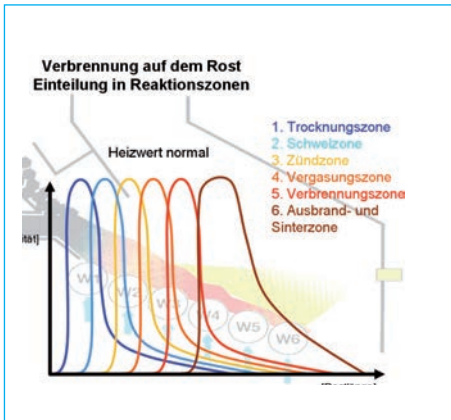


Bild 7: Intensität und Ausbreitung der Reaktionszonen bei normalem Heizwert

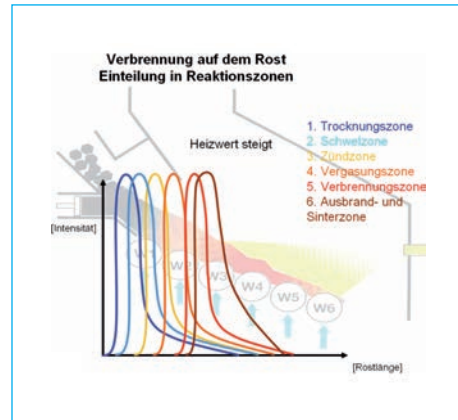


Bild 8: Intensität und Ausbreitung der Reaktionszonen bei hohem Heizwert

Ein Ausbleiben der notwendigen Energie für die vollständige Ausprägung der ersten Reaktionszonen und eventuell deren unvollständige Erweiterung in die nachfolgenden Zonen würde die Verbrennung behindern und einen sicheren Ausbrand gefährden. Diesen Problemen kann nur durch eine direkte Temperaturmessung von Zünddecke, Seitenwänden und Abfallbett Rechnung getragen werden.

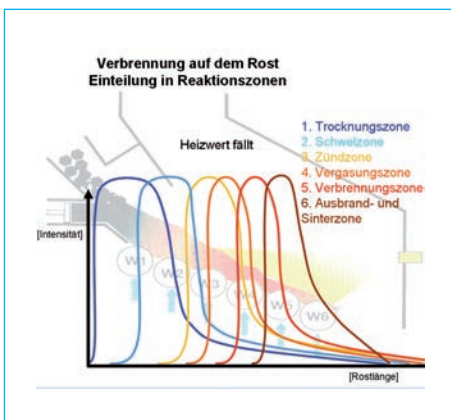


Bild 9: Intensität und Ausbreitung der Reaktionszonen bei fallendem Heizwert

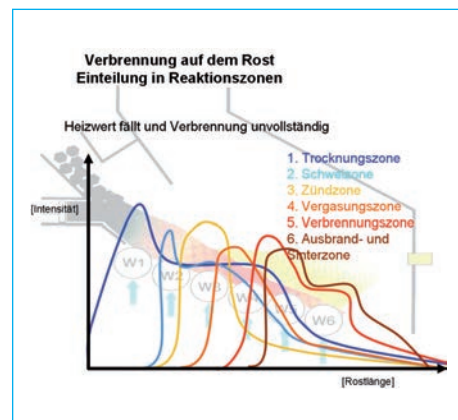


Bild 10: Intensität und Ausbreitung der Reaktionszonen bei fallendem Heizwert und unvollständiger Verbrennung

2.2. Zielstellung und Lösungsansatz Infrarotkamera

Den Vorteilen einer intensiveren Bildauswertung von Videokamerabildern stehen die Unzulänglichkeiten der Temperaturerfassung von eben genannten Temperaturbereichen an Zündecke, Seitenwänden und Abfallbett noch entgegen. Infrarotkameras, die bisher nur auf Flammentemperaturen und deren Flammenstrahlung ausgelegt sind, sind hier fehl am Platz. Notwendig ist eine Kameratechnik auf Infrarotwellenlänge, die genau das ermöglicht, nämlich den Blick durch die Flammen auf die Oberflächentemperaturen der dahinter liegenden Feuerraumgeometrie. Nur so wird eine nachweislich schlüssige Interpretation der Wichtigkeit von Strahlungseinwirkung bei der Abfallverbrennung bewiesen.

Übliche Kamerapositionen der Videokamera sind am Schlackeabwurf und für die Infrarotkamera in der Kesseldecke (Bild 11). Die Videokamerabildauswertung benötigt in dieser Einbausituation eine an den Betrachtungswinkel ausgelegte optische Entzerrung, da durch die flache Draufsicht nur ein sehr kleiner Teil des Rostes mit der Hauptverbrennung erfasst wird. Die Optimierungspotenziale dieser Betrachtung wurden zuvor erläutert.

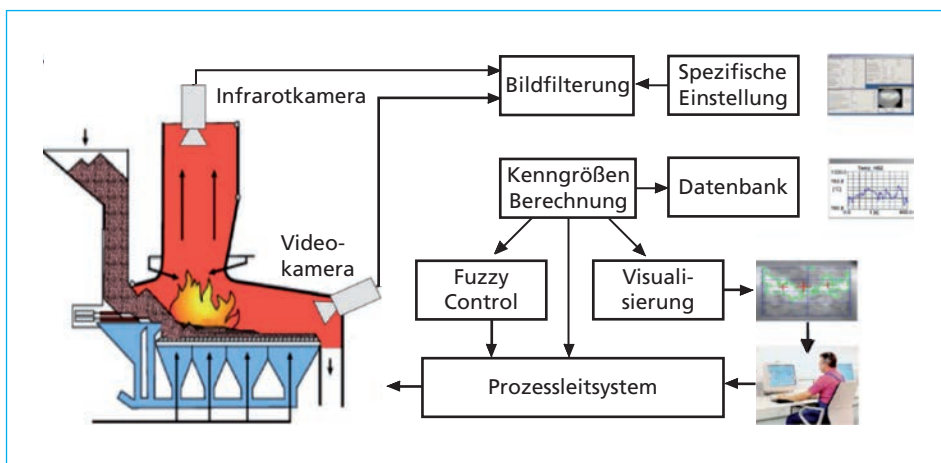


Bild 11: Messprinzip und Bildverarbeitung von Video- und IR-Messtechnik

Quelle: KIT, IAI in Karlsruhe und Firma ci-Tec, Produkt INSPECT

Der Blickwinkel der IR-Kamera über die Kesseldecke bei Umlenkung erster zu zweiter Kesselzug erlaubt eine direkte Draufsicht auf den Verbrennungsrast. Die Blickrichtung ist bei Mittelstromfeuerungen und Gegenstromfeuerungen fast ungestört und wird ausschließlich an Kopf- und Stirnseite des Übergangs von Feuerung zu Kessel durch den Einbau von Nasen verengt. Bild 12 zeigt eine Falschfarbendarstellung mit der entsprechenden Temperaturskala auf der linken Bildleiste von etwa 600 °C bis 1.200 °C. Die Abfallbetttemperaturen erlauben auch einen Einblick in die Rostaufteilung. Mittelbalken und Übergänge von Roststabsreihen, durch die gerade massiv kühlere Primärluft strömt, sind deutlich zu erkennen.

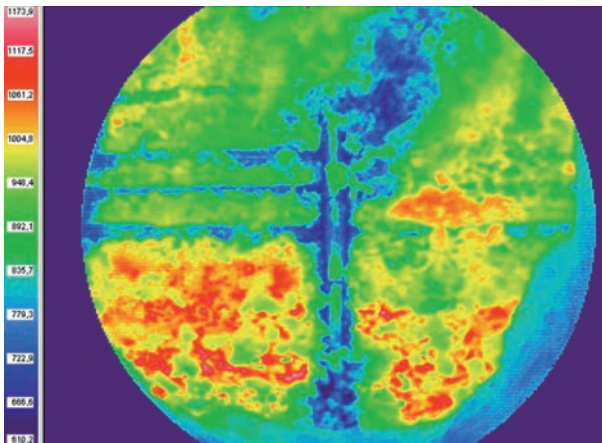


Bild 12:

IR-Aufnahme bei $3,9 \mu\text{m}$ und Durchsicht auf den Rost von oben

Quelle: KIT, IAI in Karlsruhe und Firma ci-Tec, Produkt INSPECT

Eine Gleichstromfeuerraumgeometrie erlaubt keine Draufsicht von der Kesseldecke. Die IR-Kamera müsste in die Zünddecke integriert werden. Ein solches Beispiel bietet die Anlage in Göppingen. Generell ist für diese Art der Draufsicht aber die wichtige Information der Temperaturverläufe an Zünddecke und Seitenwänden nicht verfügbar. Es empfiehlt sich aus Kostengründen und den nun zu nennenden verfahrenstechnischen Vorteilen, die gleiche Kameraposition, wie bei der Videokameraeinbausituation zu wählen. Die Optimierung der Prozessführung der Verbrennung auf dem Rost erfordert den Einsatz von Infrarot-Kameratechnologien bei $3,9 \mu\text{m}$ wie aus dem folgenden Bild ersichtlich ist.

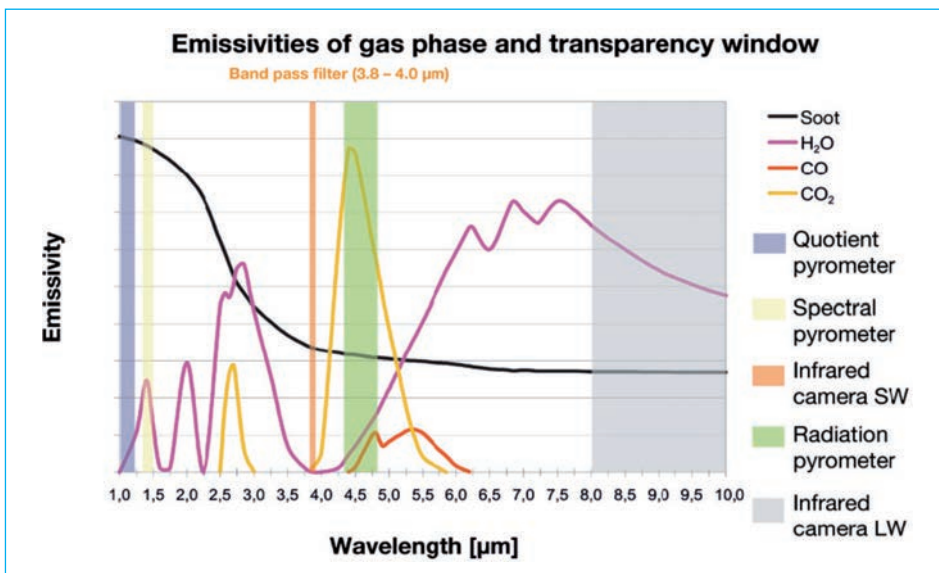


Bild 13: Transparenzfenster im Spektralbereich bei $3,9 \mu\text{m}$

Quelle: C. B. Ludwig et al., Handbook of Radiation from Combustion Gases, NASA SP-3080, 1973/Martin GmbH, München

Sowohl die Rußstrahlung als auch die Emissionen der Gaskomponenten sind im Bereich um 3,9 µm nahezu vernachlässigbar. Vorhandene Störungen werden durch leistungsfähige Bildverarbeitungsverfahren eliminiert. Das Ergebnis dieser Einstellungen zeigt Bild 14. Die zeitlichen Veränderungen sind in fünf Minuten-schritten von linker über mittlerer zur rechten Bildhälfte. Die Falschfarbendarstellung geht von niedrigen Temperaturen von dunkelblau von 600 °C bis weiß von 1.200 °C. Diese heißen Temperaturen werden an der Zünddecke angezeigt. Für die Bildfolge gilt nur festzuhalten, dass sich innerhalb von nur 15 Minuten drei unterschiedliche Temperaturmaxima als unterstützende Strahlungsquelle der ersten Reaktionszonen über dem Rost ausbilden. Bei einem gezielteren Blick in die Darstellung von Bild 15 werden alle für uns angewählten Temperaturpunkte deutlich und können für die mittlere Strahlungsintensität und davon abgeleitet für die Reaktionsunterstützung als Kenngrößen in die nachgeschaltete Feuerleistungsregelung übertragen werden.

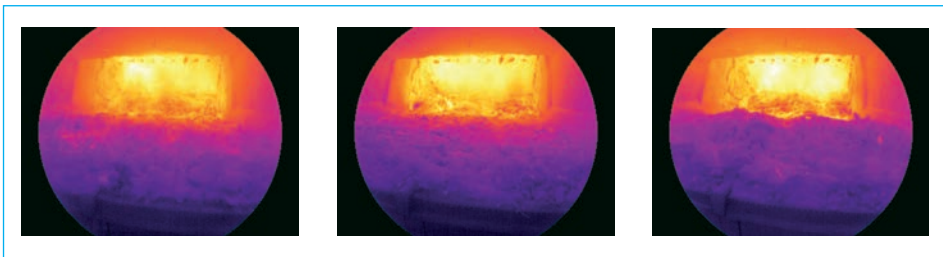


Bild 14: IR-Feuerraumkamerabild in fünfminütiger Abfolge

Quelle: Vorschubrost, AVA Velsen, HTW-IPP

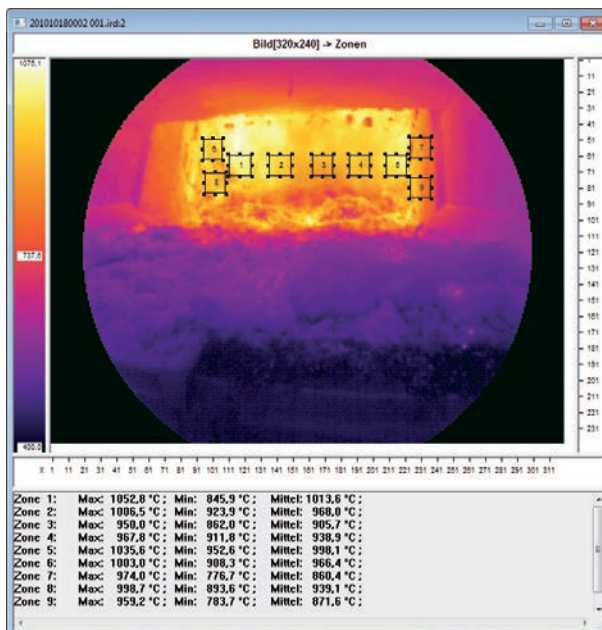


Bild 15:

IR-Feuerraumkamerabild mit Stützpunkten

Quelle: Vorschubrost, AVA Velsen, HTW-IPP

Der Einblick in die Tiefe des Feuerraums durch die Flammenfront zeigt sehr schön die Lage des Brennstoffbetts bis in den Aufgabebereich der Stöbelzuteilung. Während des Betriebs sind Anbackungen, Schlackefluss und die Öffnungen der Luftdüsen (hier rezirkulierendes Abgas) klar zu erkennen. Die Temperaturverläufe in Bild 15 wurden für 9 Zonen (kleine Fenster von 1 bis 9) aufgenommen und mit den tatsächlichen Messgrößen der Anlage verglichen. Aufgrund der perspektivischen Entzerrung der Seitenansichtsfelder treten Temperaturdifferenzen von minimal 845 °C zu maximal 1.052 °C im ersten Berechnungsfeld (Zone 1) auf. Das ist auch der Grund dafür, dass diese Berechnungsfelder sehr klein gehalten wurden, so dass die Fehlertoleranz auf ein Minimum zurückgeht. Vorteilhaft ist bei diesen neuen Kamerabild-Software-Tools, dass fast unbegrenzt über solch kleine Zonen verfügen werden kann. Das erhöht die notwendigen Freiheitsgrade und ermöglicht auch punktuell an neuralgischen Stellen im Feuerraum hinter der Flammenfront zu messen.

Die Korrelation der IR-Kamerabild-Temperaturen mit dem Dampfmengeverlauf und den Emissionswerten ist in ersten internen Auswertungen erkennbar und verläuft in starker Abhängigkeit. Die vorliegenden Informationen sind bis auf drei Minuten vorauseilend und geben einer optimierten Feuerleistungsregelung ausreichend Zeit dagegen zu regeln. Die bisherigen Kenngrößenberechnungen, wie beispielsweise die Hauptbrennzonentemperatur des Brennstoffbetts, werden durch die viel besser informierenden Zünddecken- und Seitenwandtemperaturen komplettiert. Diese schnelle Information über die bereitstehende Strahlungswärme lässt die Abfallverbrennung noch berechenbarer erscheinen. Eine verbesserte Feuerleistungsregelung oder eine an die Realität stärker angepasste Modellbildung werden möglich.

3. Vorteile beider Systeme in Symbiose und Synergie

Wird eine Videokamera zur Erfassung des Ausbrandes, des Flammenbildes und der Beobachtung des Gasausbrandes an den Sekundärlufteindüsung eingesetzt, so kann die Verbrennungssituation in der Flamme und der Gasphase zeitnah erfasst werden. Kenngrößen hier sind z.B.

- Bereiche von Flammenmaxima, starke Flammenfluktuation,
- Bereiche mit geringer Verbrennung bzw. geringer Flammenhöhe,
- Bereiche fehlender Flammenfluktuation und Schwelgasführung,
- Bereiche mit hoher Rußkonzentration sowie starke Strähnen, Schwelgasturbulenzen,
- Bereiche mit starker Flammenentwicklung an den Sekundärluftdüsen.

Jede Kenngröße repräsentiert einen physikalisch-chemischen Hintergrund (Ursache) und ist damit direkt zur Optimierung der jeweiligen Verbrennungssituation (Wirkung) einsetzbar. Die regelungstechnische Umsetzung kann beispielsweise durch überlagerte Fuzzy Regler oder adaptive PID-Regler zur Sollwertvorgabe unterlagerter Regelkreise erfolgen [3]. Kamerasysteme in Kombination mit einem

intelligenten Kontrollsystem bieten ein hohes Optimierungspotential für thermische Prozesse im Allgemeinen. Im Besonderen kann die von uns verwendete Flammenfluktuationsanalyse mit Video-basierter Bildverarbeitung wichtige Informationen über das aktuelle und das zu erwartende Feuerraumgeschehen liefern. Videosysteme sind für eine kostengünstige und effiziente Analyse technischer Flammen prädestiniert. Durch den Einsatz leistungsfähiger Bildverarbeitung ist es auch möglich, sich schnell ändernde Prozesse im Bereich des Gasausbrandes (Sekundärlufteindüsung oder REZI-Gas-Eindüsung) in Echtzeit zu überwachen und zu regeln. Die Wärmeentbindung und die Sauerstoffumsetzung erfolgen überwiegend in der Gasphase über dem Brennstoffbett. Die ersten Reaktionszonen bestehend aus Trocknung, Pyrolyse, Zündung und Vergasung sind für die Wärmefreisetzung über dem Abfallbett hauptverantwortlich. Leider sind diese Reaktionszonen verdeckt durch die Flammenfront. Den Einblick hinter diese Flammenfront kann nur mittels IR-Kamera-Einsatz realisiert werden. Hierbei ist eine sehr enge Bandbreite bei etwa 3,9 μm einzuhalten.

Es ist deshalb notwendig, über eine IR-Kamera neben dem Brennbett die Zünddecken- und Seitenwandtemperaturen kontinuierlich und differenziert zu beobachten und die daraus abgeleiteten Kenngrößen, wie

- die mittleren Temperaturen der kleinen Flächensegmenten,
- die mittleren Temperaturen aller Zonen je Bahn,
- die relative Fläche und Temperatur der Decken- und Seitenwände,
- den Bedeckungsgrad als Verhältnis von frisch beschicktem zu gezündetem Brennstoff,
- die Transportgeschwindigkeit und die Verweilzeit des Brenngutes,

sowie weitere Kenngrößen in die Regelung einzubeziehen.

Diese Kenngrößen lassen sich über eine Echtzeitauswertung von Infrarot- und Videoaufnahmen mit einem Kamerabild-Auswerte-Tool berechnen. Die Kenngrößen dienen einerseits der manuellen Optimierung der Prozessführung durch das Bedienpersonal (siehe Bild 11), andererseits können sie direkt für automatisch arbeitende Regelungs- bzw. Optimierungsstrategien z.B. mittels Fuzzy Control genutzt werden. Da die Komplexität der Feuerleistungsregelung (die Erfassung von Mehrgrößenproblemen) sich hervorragend mit Fuzzy Control beschreiben lässt, wird diese Regelungsvariante bevorzugt. Fuzzy Control ist der einzige multivariable Kennfeldregler, der ohne technisches Verständnis für Automatisierungstechnik, programmiert werden kann und der dem Anspruch gerecht wird, dass verbal vorhandenes Wissen in maschinenlesbare Schreibweise übertragen werden kann.

Auf Grund des heute erreichten Entwicklungsstandes auf dem Gebiet der Hochleistungsrechner, der stetigen Kenngrößenberechnung sowohl bei Flammenüberwachung, bei Flammenausbreitung und Flammenfluktuation, als auch bei dynamisch realer Temperaturerfassung wird die thermochemische Gleichgewichtsmodellierung als Werkzeug zur Beschreibung und Optimierung von Hochtemperaturprozessen für die ersten Reaktionszonen auf dem Rost mit

Trocknung, Pyrolyse, Zündung und Vergasung realistisch. Mit Hilfe thermochemischer und thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen, die auf Daten der Elementaranalyse der Brennstoffe und auf online-Temperaturerfassung basieren, lassen sich Prognosen zum Verhalten von Brennstoffen und deren Produkte in Feuerungen und Abgaswegen aufstellen. Die Kombination beider Feuerraumanalysen aus Flammenbeobachtung und Temperaturverteilung (Video und Infrarot) in den ersten Reaktionszonen lässt auf verbesserte Ergebnisse schließen, wenn diese Erkenntnisse gebündelt und mit einer modellierenden Software aufbereitet werden.

Bereits vor der eigentlichen thermischen Behandlung können Brennstoffe auf ihr Potenzial zur Schadstoffbildung (CO , NO_x , Dioxine und Furane, unverbrannte Kohlenwasserstoffe), Ansatzbildung und Verschlackungsneigung, aber auch zur Hochtemperatur-Chlor-Korrosion hin eingeordnet werden und für diesen Rostyp mit entsprechender Feuerraumgeometrie empfohlen oder abgelehnt werden. Die für eine Kopplung dieser Technologien interessanten Anwendungsgebiete sind Abfallfeuerungen, Feuerungen auf der Grundlage nachwachsender Rohstoffe, Kraftwerksfeuerungen auf der Basis von Kohle, Öl oder Erdgas, aber auch metallurgische Hochtemperaturprozesse mit Abfallbrennstoff als Reduktionsmittel.

Diese Informationen und die Kenngrößenberechnungen werden mit Einführung von Fuzzy Control und Künstlich Neuronaler Netze (KNN) wichtige Verfahrensparameter, wie Luftstufung, Feuerlage und Feuerlänge zur neuen Arbeitspunktbestimmung vorhersagen, regeln und optimieren. Der Vorteil des Einsatzes dieser Feuerleistungsregelung liegt in der Flexibilität und in der höheren Dynamik, um sich schneller auf neue Brennstoffe einzustellen. Die Online-Arbeitspunktbestimmung dieser Regelung erfolgt mit Hilfe eines Künstlich Neuronales Netzes (KNN), das der Kamerabildauswertung, dem Fuzzy Controller und der Gleichgewichtsmodellierung untergeordnet ist. KNN unterstützen dabei durch ihre Lern- und Prognosefähigkeit von Prozessabläufen. Die daraus abzuleitenden Ziele sind die Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades, die Steigerung der Anlagenverfügbarkeit und die Stabilisierung des Prozessablaufes am optimalen Arbeitspunkt zur Minimierung der Schadstoffemissionen. Die genannten Optimierungsprogramme (video- und IR-Kamera-basierte Feuerraumüberwachung, thermochemische Gleichgewichtsberechnungen, Fuzzy Control und KNN) werden derzeit noch nicht gekoppelt eingesetzt. Hier liegt echtes Optimierungspotenzial, das in Wissenschaft und Forschung an Hochschulinstituten forciert wird, aber auch in der Industrie aufgegriffen werden sollte.

4. Ausblick und Zusammenfassung

Trotz eines ständig zunehmenden Automatisierungsgrades in allen Lebensbereichen bleiben die menschlichen Sinne und Fähigkeiten das Maß aller Dinge. Eine Automatisierung lässt sich zwar grundsätzlich beliebig weit steigern, der dafür erforderliche Aufwand ist jedoch in keiner Weise mehr vertretbar. Gerade wenn es um die Erhöhung der Produktivität moderner Produktionseinrichtungen geht, wird die Entscheidung für Mehrinvestitionen zugunsten einer weiteren

Automatisierung immer schwieriger. Das meiste ist bereits geleistet, jetzt geht es um Feinheiten, die bisher immer noch das Geschick und das Können von erfahrenerm Bedienpersonal erfordern [2]. An diesem Punkt kann die Fuzzy-Technologie neue Impulse bringen. Verfügt man über eine Technologie, die *Technische Systeme* mit Hilfe menschlicher Denkansätze zu beschreiben sucht, so lässt sich das Feld für Automatisierungslösungen erweitern. Eben eine solche Technologie ist Fuzzy Logic.

Die Anwendung der Fuzzy Logic in der Regelungstechnik eröffnet viele Möglichkeiten, Regelungsaufgaben einfacher als mit herkömmlicher Technik zu beherrschen. Das Verhalten des Reglers wird mit einfachen sprachlichen Beschreibungen an Stelle von komplizierten mathematischen Algorithmen programmiert. Fuzzy Logic verarbeitet diese Beschreibungen und erzeugt eine physikalische Stellgröße, die an den Prozess weitergegeben wird. Auch wenn man nicht Experte für Regelungstechnik ist, kann man mit dieser Technik anspruchsvolle Regelungsaufgaben lösen.

Aber auch bei der Regelung komplexer, nicht linearer Prozesse, die nur unzureichend mit Näherungen zu beschreiben sind, bietet die Fuzzy Logic wesentliche Vereinfachungen. Fuzzy Logic ist eine innovative Technologie, die es ermöglicht, das gewünschte Systemverhalten zu beschreiben, indem die alltägliche Sprache benutzt wird.

Diese Vorgehensweise trägt auch der Forderung nach weitgehender Selbstgängigkeit des Verbrennungsprozesses Rechnung und verdeutlicht die Ziele, die man sich mit der Einführung von Kamerasoftware-Tools und Fuzzy Logic gesetzt hat:

- Emissionen durch verbesserte Primärmaßnahmen zu verringern,
- Emissionsspitzen zu vermeiden,
- den Brennergasanteil zu reduzieren,
- eine konstant hohe Temperatur in der Nachbrennkammer sicherzustellen,
- die Schlackequalität weiter zu erhöhen,
- den Energieanteil der Abfallstoffe optimal umzuwandeln, Luft-/Brennstoffverhältnis optimieren,
- eine weitergehende Homogenisierung am Prozess und für die nachfolgenden Aggregate (Kessel und Abgasreinigung) zu erreichen.

Um diese Ziele zu erreichen, müsste der Anlagenfahrer permanent den Verbrennungsbereich, sprich die Feuerung, kontrollieren und analysieren. Das ist aus heutiger Aufgabenverteilung im Arbeitsumfeld einer Leitwarte nicht möglich und diese notwendige Zeit der Beobachtung steht dem Anlagenpersonal nicht zur Verfügung. Hauptsächlich werden diese Eingriffe bei der Stabilisierung der Ausbrandgrenze notwendig. Insofern bedarf die bestehende Regelung einer Berücksichtigung höherer dynamischer Anteile bei der Verantwortlichkeit der Flammen in der Hauptverbrennungszone.

Noch wichtiger wäre indes die Beobachtung der Intensitäten der Vorreaktionen der Verbrennungsabläufe (Trocknung, Pyrolyse, Zündung und Vergasung), wodurch von vorne herein eine Schwankungsbreite im Feuerleistungsverhalten minimiert werden könnte. Die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich der Emissionsgrenzwerte und eine wirtschaftlich nutzbare Auskopplung von Energie in Form von Strom und Dampf sind relevante Kriterien.

Die Forschungsvorhaben an der HTW des Saarlandes und dem Institut für Physikalische Prozesstechnik IPP stellen sich diesen Zielen. Die im Ansatz diskutierten Vorhaben werden zurzeit in Anträgen zu Forschungsvorhaben erstellt und eingereicht. Die Ziele zur Offenlegung von weiteren Optimierungspotenzialen in der Feuerleistungsregelung mittels Video- und IR-Feuerraumkameras sind klar formuliert:

Ziel ist es, die wissenschaftlichen Voraussetzungen zu schaffen, die innovativen und fachrichtungsübergreifenden Ingenieurleistungen von der anwendungsorientierten Forschung in praxisorientierte Produktentwicklung umzusetzen.

In der Betrachtung der IR-Kamera-Feuerraumtemperaturverfolgung wurden die vorausschauende Instandhaltung, der Kesselschutz, die Kessel- und Feuerraumauslegung vernachlässigt. Die Höhe der Temperaturen an Zünd- und Seitenwanddecke, der Grad an Verschmutzung durch Anbackungen und Feuerraumwächten, wurden nicht als weiterer Vorteil dargestellt. So könnte neben der Analyse des mechanischen Stresspotenzials durch sich schnell ändernde und zu hohe Temperaturen auch der Grad an Verschmutzungsneigung und Schlackefluss aufgenommen und zu einem Frühwarnsignal verarbeitet werden. Probleme der Wasser-Dampf-Kreislaufführung könnten somit schneller detektiert werden, Temperatur-Flächenanteile durch Summenfunktionen interpoliert und Temperaturexkursionen durch gesicherte Extrapolationsverfahren annähernd als Warnfunktion berechnet werden. Einige Künstliche Neuronale Netz-Programme verfügen zurzeit schon über diese Kapazitäten, damit eine gesicherte Extrapolation mit dem dazugehörigen Korrelationskoeffizienten jederzeit angezeigt wird.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Zellner, Klaus, Skriptum zur Vorlesung Abfallverfahrenstechnik, FH Trier, Fachbereich Versorgungstechnik, Trier 2000
- [2] Gierend, Chr., Moderne Feuerleistungsregelung, Einsatz von Kameratechnik Institut für Physikalische Prozesstechnik, Jahresbericht 2010 HTW des Saarlandes, Saarbrücken 2010
- [3] Keller, Hubert; Mattes, Jörg Infrarot-basierte Optimierung des Verbrennungsprozesses in der thermischen Abfallbehandlung, KIT, IAI Karlsruhe 2010, ci-Tec GmbH

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Energie aus Abfall – Band 8

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011

ISBN 978-3-935317-60-3

ISBN 978-3-935317-60-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dipl.-Ing. Ernst Thomé, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc. und Dr.-Ing. Stephanie Thiel

Erfassung und Layout: Janin Burbott, Dipl.-Kffr. Elke Czaplewski, Petra Dittmann,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.