

Kaiser, M.; Brell, J.; Spiegel, W.; Pohl, M.; Wen, T.; Jentschke, L.;
(2022)

**Möglichkeiten zur In-Situ Brennstoffdiagnose
für heterogene Abfallströme**

In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P., Gosten, A. (Hrsg.):
Energie aus Abfall, Band 19
Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, 2022
S. 535-551

Abstract

Possibilitis for In-Situ Fuel Diagnostics for Heterogeneous Waste

Authors:

CheMin GmbH, Augsburg:

Dipl.-Ing. (FH) Marie Kaiser, Dipl.-Ing. (FH) Joos Brell, Dr. Wolfgang Spiegel

ENVERUM Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltverfahrenstechnik mbh, Dresden:

Dr. Martin Pohl, Dr. Tao Wen, Dipl.-Ing. Lars Jentschke

Waste, treated in power plants is a highly complex and inhomogeneous material with strongly fluctuating properties. After delivery of the waste to the incineration plant, the operator of the plant is responsible for the further treatment or disposal path. Steering interventions are to be assessed as rather limited. From this it has to be accepted that heterogeneous waste has largely unknown fuel characteristics at the time of incineration in a grate furnace. As a consequence, it makes sense to develop the thermal process itself into an In-Situ fuel diagnosis. For this purpose, additional information is taken from the processes in the furnace and the boiler, so that - figuratively speaking - an In-Situ laboratory is created that determines the relevant fuel characteristics. This article takes a closer look at the approach of an In-Situ fuel diagnosis and explains it with examples.

Möglichkeiten zur In-Situ Brennstoffdiagnose für heterogene Abfallströme

Autoren:

CheMin GmbH, Augsburg:

Dipl.-Ing. (FH) Marie Kaiser, Dipl.-Ing. (FH) Joos Brell, Dr. Wolfgang Spiegel

ENVERUM Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltverfahrenstechnik mbh, Dresden:

Dr. Martin Pohl, Dr. Tao Wen, Dipl.-Ing. Lars Jentschke

1.	Die großtechnische Anlage als In-Situ-Labor zur Brennstoffdiagnose	3
2.	Methoden zur In-Situ Brennstoffdiagnose	6
2.1.	Betriebsdaten und über Modelle daraus ableitbare Informationen	6
2.2.	Erweiterte Sensorik und Sonden	10
3.	Ausblick	14
4.	Quellen	14

Abfallströme, welche in thermischen Behandlungsanlagen eingesetzt werden, sind meist komplex zusammengesetzte und inhomogene Stoffe mit stark schwankenden Eigenschaften. Im Sinne einer brennstofftechnischen Bewertung unterscheidet man nach chemischen (z.B. Gehalt an Kohlenstoff, Schwefel, Chlor, Schwermetallen), physikalischen (z.B. Schüttdichte), kalorischen (z.B. Heizwert) und reaktionstechnischen (Ab- und Ausbrandverhalten) Eigenschaften.

Nach der Anlieferung der Abfallströme in der thermischen Behandlungsanlage obliegt dem Betreiber der Anlage der weitere Behandlungs- bzw. Entsorgungsweg. Die aus verschiedenen Quellen (wie z.B. Hausmüll, Gewerbeabfälle, in Sortieranlagen aufbereitete Abfälle) angelieferten Abfälle landen typischerweise alle im gleichen Bunker. Lenkungeingriffe sind hier eher als begrenzt zu bewerten, da die angelieferten Abfallströme und die daran geknüpften Brennstoffmerkmale sukzessive in den Bunker entladen werden und meist keine detaillierten Informationen zu den Eigenschaften vorliegen. Im Vorfeld der Verbrennung werden die meisten Abfallströme auch nicht spezifisch vorbehandelt oder aufbereitet.

Eine gewisse Vorbehandlung der Abfälle vor deren thermischer Behandlung beschränkt sich meist auf das Lagern und mechanische Durchmischen im Bunker. Dieser Verfahrensschritt führt nicht zu homogenen Eigenschaften im brennstofftechnischen Sinn. Die meist als Rostfeuerungen ausgeführten Anlagen behandeln damit heterogene Abfallströme, grob gequantelt pro aufgegebenem Greifer.

Alle angelieferten Abfälle, die in den Bunker gelangen, müssen über die Feuerung geschleust werden. Als belastend für Feuerung und/oder Dampferzeuger erkannte Abfälle können nur durch verstärktes Durchmischen im Bunker angepasst werden.

Je nach Brennstoffmanagement an einem Standort (MVA, EBS-Kraftwerk) können auch Brennstoffe mit ausgeprägten energetischen und stofflichen Merkmalen, u.a. sogenannte Monochargen, eingesetzt werden. Hierbei kann es sich u.a. um Klärschlamm, Industrieabfälle oder speziell als Brennstoff aufbereitete Fraktionen aus der mechanischen Behandlung handeln.

Die Charakteristik von Abfällen für Rostfeuerungen, im Sinne deren Heterogenität in Bezug auf fast alle Eigenschaften, erschwert es, den Brennstoff in seinen Auswirkungen auf die Feuerung und den Dampferzeuger so zu diagnostizieren, dass diese Auswirkungen vorhersehbar oder zumindest unmittelbar einschätzbar sind. Testverbrennungen im Technikumsmaßstab haben sich im Markt der MVA/EBS-Anlagen bisher nicht etabliert. Auch eine Brennstoffanalytik, also Zerlegung der Brennstoffkomponenten und chemische Analyse der einzelnen Komponenten ist sehr aufwändig und wird meist nur im Zuge von F+E-Vorhaben realisiert. Im Alltagsgeschäft der MVA/EBS-Anlagen sind solche Maßnahmen wenig zielführend.

Nebenbemerkung: Diese für Abfallströme typischerweise gegebene Heterogenität der Brennstoffeigenschaften ist im Fall von Biomassen meist geringer ausgeprägt. Oftmals ist bei Biomassen eine gewisse Homogenität in den stofflichen Eigenschaften und in deren Stückigkeit gegeben. Daraus ergibt sich die Chance, durch Testverbrennungen die wesentlichen Merkmale der Biomassebrennstoffe zu ermitteln, incl. der stofflichen Eigenschaften der Aschen und des Rauchgases. Die Autoren haben dazu in [8] berichtet und das Verfahren patentiert (Brennstoff-Beipackzettel; Testverbrennung im Batchreaktor).

Die Feuerung in MVA/EBS-Anlagen wird durch Parameter der Feuerungsleistungsregelung gesteuert, die ihre Informationen aus bestimmten integrativen Messgrößen erhält (u.a. Dampfmenge, O₂-Gehalt im Rauchgas, Deckentemperaturen Rauchgas 1.Zug, Kamerainformationen zur Feuerlage) und über Algorithmen den Prozess regelt. Zudem gibt es umfangreiche Fachliteratur zur Modellierung der Feuerungsprozesse, also die Bereitstellung von Informationen über die Auswirkungen regelbarer Merkmale der Feuerung/Feuerführung, wie z.B. Verteilung der Lüfte, Roststabgeschwindigkeiten, Brennstoffdurchsatz, rezirkuliertes Abgas. Auch zu den Transferfaktoren von stofflichen Frachten des Brennstoffs aus dem Gutbett in das Rauchgas gibt es Modellierungen und empirisch basierte Informationen. Zudem gibt es Modellierungen und empirische Tests zu den Auswirkungen von Zusatz- bzw. Hilfsstoffen, die vor, in oder nach der Feuerung in den Prozessablauf eingebracht werden. Diese sog. Additive sollen bestimmte Prozessauswirkungen günstig beeinflussen. Hierbei kann es z.B. um Stickoxide, Verschmutzung oder Korrosion gehen. Hilfsstoffe sind u.a. Harnstoff/Ammoniak, Schwefel, Wasser oder Mineralstoffe.

1. Die großtechnische Anlage als In-Situ-Labor zur Brennstoffdiagnose

Rostfeuerungen sind konzipiert als *Allesschlucker* zu arbeiten, also nahezu jeden Abfall, so wie er *summativ* vorliegt, wenn dieser mittels Greifer aus dem Bunker in den Aufgabeschacht aufgegeben wird, verarbeiten zu können. Die energetischen Grenzen dieser Eigenschaften werden durch das Feuerungsleistungsdiagramm vorgegeben. Grenzen der Stofflichkeit und der Stückigkeit gibt es nicht explizit.

Sobald die summativen Brennstoffmerkmale eines Greiferinhalts den Beginn des Rostes erreichen, entstehen Auswirkungen dieses Brennstoffpakets, u.a. auf die jeweiligen Orte der Energiefreisetzung, der Energieverteilung innerhalb der Feuerung(en), der stofflichen Merkmale der Schlacke und der stofflichen Merkmale des Rauchgases.

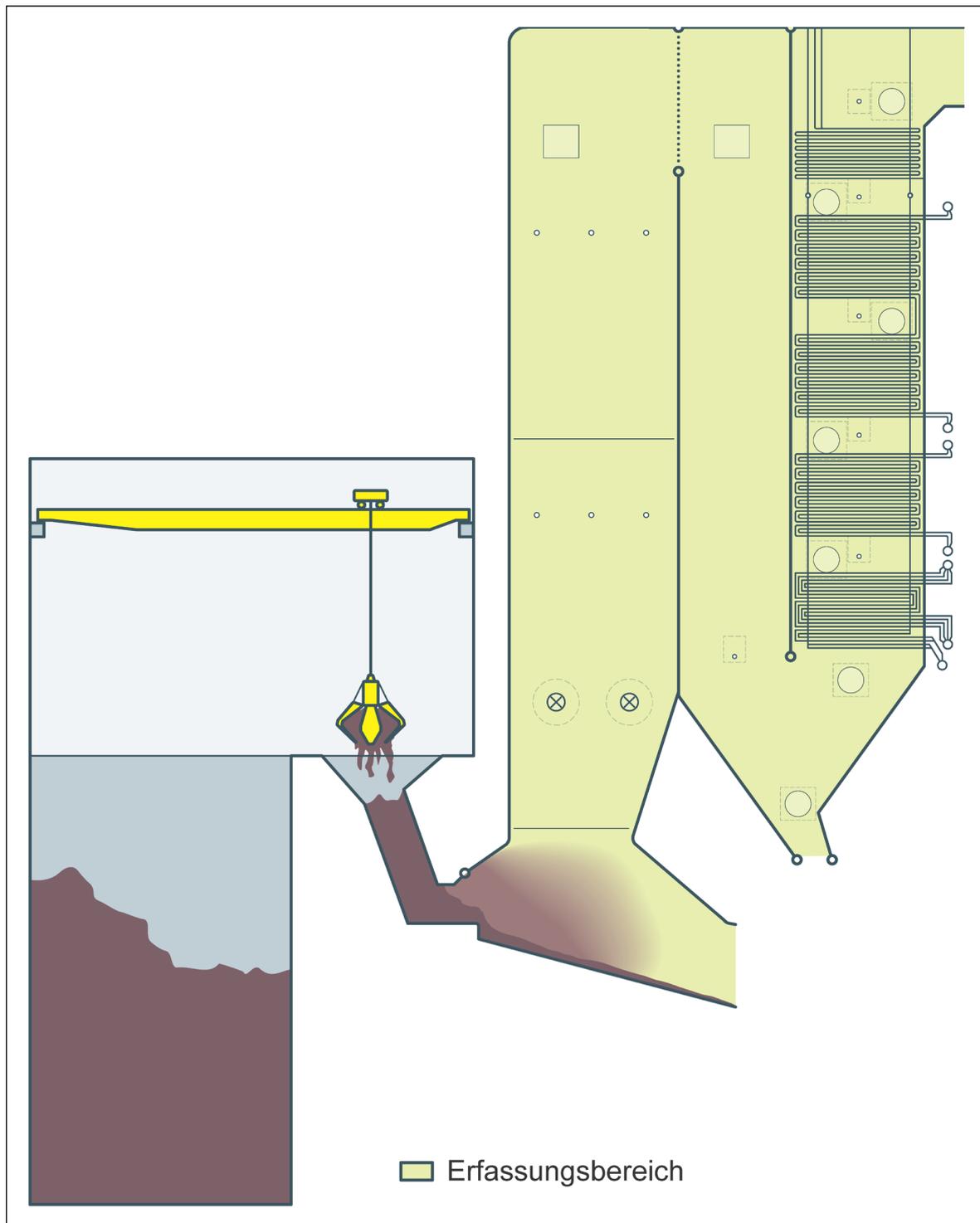


Abbildung 1: In-Situ-Labor, bestehend aus dem Brennstoffvorrat, dem Aufgabesystem, der Feuerung und dem Dampferzeuger

Wenn zu akzeptieren ist, dass heterogene Abfallströme zum Zeitpunkt der Verbrennung in einer Rostfeuerung weitgehend unbekannte Brennstoffmerkmale aufweisen, bietet es sich an, den thermischen Prozess selbst zu einer möglichst aussagekräftigen In-Situ Brennstoffdiagnose zu entwickeln. D.h., den Prozessen in Feuerung und Dampferzeuger werden zusätzliche Informationen entnommen, so dass – bildlich gesprochen – ein In-Situ-Labor entsteht, das die relevanten Brennstoffmerkmale ermittelt. Abbildung 1 zeigt dieses In-Situ-Labor, bestehend aus dem Brennstoffvorrat, dem Aufgabesystem, der Feuerung und dem Dampferzeuger. Bereiche, in denen keine (bzw. nur geringe) Informationen zu den Brennstoffmerkmalen vorliegen oder

ermittelt werden, sind braun gefärbt. Bereiche, in denen Informationen zu den Brennstoffmerkmalen ermittelt werden und damit auch verfügbar sind, sind hellgrün gefärbt. Der gesamte Bereich der Feuerung und des Dampferzeugers eignen sich, Informationen für die In-Situ Brennstoffdiagnose bereitzustellen.

Dieses In-Situ-Labor hat damit die Funktion einer *permanenten Testverbrennung* (analog zu dem oben erwähnten Batchreaktor für die Testverbrennung von Biomassen [8]). Gleichzeitig mit der thermischen Umsetzung und energetischen Nutzung des Brennstoffs werden dessen Eigenschaften ermittelt. Mit anderen Worten, Feuerung und Dampferzeuger erhalten eine zusätzliche Verfahrenskomponente, nämlich die Brennstoffdiagnose. Die Informationen aus der Brennstoffdiagnose verflechten sich dabei unmittelbar mit den verschiedenen Prozessen der thermischen Umsetzung und energetischen Nutzung. Hierzu gehören insbesondere die Feuerungsprozesse, sowie Emissionsminderungsprozesse (z.B. Stickoxidminderung mittels SNCR) und Maßnahmen zur Optimierung der Wärmeübertragung (online-Reinigungsverfahren).

Welche zusätzlichen Informationen können erhoben werden, um den Brennstoff zu charakterisieren? Welche sensorischen Hilfsmittel stehen zur Verfügung? An welchen Orten in der Prozessabfolge von Feuerung, Dampferzeuger und Rauchgasreinigung liegen relevante Informationen an und können abgegriffen werden?

Die Hilfsmittel der In-Situ Brennstoffdiagnose werden nachfolgend in Abschnitt 2 näher beschrieben.

Welche Wirkungen bzw. Verbesserungen lassen sich mit dieser Art der Brennstoffdiagnose verfolgen?

Im Kern ermöglicht die In-Situ Brennstoffdiagnose eine höhere Prozesstransparenz. Davon leiten sich mehrere Wirkungsebenen ab:

- Einerseits werden Brennstoffmerkmale *sichtbar*, die dazu genutzt werden können, Einfluss auf die vor- und nachgelagerten Schritte der Abfallverbrennung zu nehmen. Hierzu gehört u.a. Lieferantenkontrolle, Brennstoffeinkauf, Brennstoffmix, Additiveinsatz, Einhaltung der Emissionsgrenzwerte und Kenngrößen für die CO₂- Herkunft im Abgas.
- Andererseits ermöglichen die Informationen der In-Situ Brennstoffdiagnose eine unmittelbare Einflussnahme auf die Prozessabläufe in der Feuerung (u.a. Ausbrand der Schlacke und des Rauchgases) und im Dampferzeuger (u.a. SNCR und online-Reinigung).
- Und auch auf längeren Zeitachsen ergeben sich aus den Informationen der In-Situ Brennstoffdiagnose Möglichkeiten der Prozessoptimierung. Die entscheidende verfahrenstechnische Wirkung ist hierbei eine räumliche und zeitliche Homogenisierung der Rauchgaseigenschaften an den jeweiligen Orten im Dampferzeuger, also insbesondere das Vermeiden von Strähnen und starken Schwankungen der Energieverteilung im Rauchgas. Diese Vergleichmäßigung der Prozessmerkmale wirkt mindernd auf Verschlackung, Verschmutzung und Korrosion.
- Bedeutsame betriebswirtschaftliche Auswirkungen dieser Optimierung ergeben sich auch im Bereich der Energieeffizienz (längere Reisezeit, bessere Verfügbarkeit, höherer Wirkungsgrad), sowie bei den Kosten für Instandhaltung, Hilfsstoffe und den gegebenenfalls zukünftig zu entrichtenden CO₂-Abgaben [10].

Angesichts der aktuellen Anforderung, möglichst alle im Inland generierbare Nutzenergie vollumfänglich und optimal anzuwenden, ist die Option einer Anhebung der Energieeffizienz für MVA/EBS-Kraftwerke von hoher Relevanz. Dies gilt ebenso für die derzeit häufig diskutierte Maßnahmen zur CO₂-Abscheidung, um einerseits wichtige technische Lücken der CCU/CCS-Prozesskette zu schließen, und andererseits die Option zu schaffen, zukünftig CO₂ aus industriellen Quellen dauerhaft und sicher zu nutzen oder zu speichern.

2. Methoden zur In-Situ Brennstoffdiagnose

Die nachfolgend beschriebenen Methoden der In-Situ Brennstoffdiagnose teilen sich in zwei Maßnahmenbereiche auf:

- Ein Maßnahmenbereich ist, alle typischerweise vorhandenen Prozessinformationen (Betriebsdaten) durch Bilanzierung und Modellierung zu Metadaten zu verarbeiten (Abschnitt 2.1).
- Ein zweiter Maßnahmenbereich ist, dem Verbrennungsprozess (incl. Dampferzeuger) zusätzliche Informationen zu entnehmen. Dies erfolgt durch den Einsatz von Sensorik und Sonden (Abschnitt 2.2). Dieser Maßnahmenbereich führt insbesondere zu orts aufgelösten Informationen.

2.1. Betriebsdaten und über Modelle daraus ableitbare Informationen

Mit Hilfe der Bilanzierung können auf Grundlage von in der Anlage gemessenen Betriebsdaten unbekannte Größen berechnet werden bzw. gemessene Größen hinsichtlich der Plausibilität geprüft werden. Auf Grundlage der Erhaltungssätze existieren in der Verfahrenstechnik Bilanzierungs-Ansätze, u.a. für den Verbrennungsprozess, die Wärmeübertragung, für Trocknungs- und Befeuchtungsvorgänge usw., welche insbesondere zur Modellierung von Kraftwerksprozessen Anwendung finden. Die Verknüpfung dieser Bilanzierungsansätze ermöglicht es, Modelle einzelner Apparate oder Verfahrensbausteine bzw. Modelle einer Gesamtanlage zu erstellen und diese gekoppelt mit den Betriebsdaten im Sinne von Assistenz- bzw. Anlagen-Monitoringsystemen [13] zu analysieren. Dies ermöglicht es, Informationen und Wirkungen aus den vorliegenden, in den Anlagen gemessenen Betriebsdaten ableiten zu können.

Quantitative Betrachtungen zur In-Situ Brennstoffdiagnose auf Grundlage von Betriebsdaten

Der Abfallmassenstrom wird in den Anlagen über zwei Möglichkeiten messtechnisch erfasst. Die erste Möglichkeit ist die Wiegung am Eingang der Anlage (Eingangswaage). Diese liefert am Bilanzkreis Anlagenzaun verlässliche Ergebnisse und ist Grundlage für die Abrechnung mit dem jeweiligen Anlieferer. Nach der Wiegung wird der Abfall in den Bunker transportiert. Die Anlieferungen und die Befüllung des Bunkers sind meist auf den Zeitraum Montag bis Freitag mit den jeweiligen Anlieferungszeiten begrenzt. Über die Eingangswaage können kumulierte Werte über einen bestimmten Betrachtungszeitraum (1 Monat/1 Jahr usw.) ermittelt werden und mit den Messungen über die Kranwaage abgeglichen werden.

Die zweite Möglichkeit ist die Kranwaage im Bunker, welche die tatsächlich der Verbrennung zugeführte Abfallmenge ermittelt und in vielen Anlagen als Prozessgröße für die Regelung (z.B. als 4-h-Mittelwert) berücksichtigt wird. Der Vergleich von Kranwaage und Eingangswaage ist nur über einen längeren Zeitraum sinnvoll, zeigt jedoch auch dann häufig Differenzen, welche auf unterschiedliche Messunsicherheiten zurückzuführen sein können, sowie auf im Bunker stattfindende Umwandlung- und Trocknungsprozesse, welche wiederum über den Ansatz der Bilanzierung berücksichtigt werden können.

Wie in der Literatur [1,5,14] beschrieben, ist es auf Grundlage der Bilanzierung möglich, Informationen zur Charakterisierung der zugeführten Brennstoffe (Brennstoffmassenstrom, elementare Zusammensetzung und Heizwert des aktuell verbrennenden Brennstoffes) über eine Rückwärtsrechnung ausgehend von Reingas-Messwerten am Kamin (Volumenstrom und Abgaszusammensetzung) online zu ermitteln. Entsprechend ist dies eine dritte Möglichkeit, um die verbrannte Abfallmenge zu bestimmen.

Berücksichtigt wird dabei u.a., abhängig vom gewählten Bilanzrahmen, die über die Ansaugung aus dem Bunker meist erhöhte Luftfeuchtigkeit der Verbrennungsluft. Der bereits im Bunker stattfindende Verdunstungsprozess führt zu einer Massenabnahme und Heizwerterhöhung der Abfälle im Vergleich zur Anlieferung, wobei das Wasser als Wasserdampf über die Verbrennungsluft der Feuerung zugeführt wird. Entsprechend wird keine Energie zur Verdampfung dieses Wasseranteils bei der Abfallumsetzung auf dem Rost benötigt. Bei einer hier beispielhaften Steigerung der relativen Luftfeuchte von 50 % (Außenluft) auf 80 % (Ansaugung Bunkerluft) und einer Temperaturerhöhung von 22 °C auf 28 °C verringert sich die auf dem Rost zu behandelnde Abfallmenge um etwa 4,5 Ma.-% und der Heizwert steigt um etwa 5,5 % im Vergleich zur Anlieferung an.

Der über die Bilanzierung ermittelte Abfallmassenstrom kann entsprechend über einen längeren Zeitraum sowohl dem Messwert über die Kranwaage (z.B. 4-h-Mittelwert) als auch dem Eingangsmesswert (unter Berücksichtigung der Bunker-Füllstandes) gegenübergestellt werden. Im Vergleich zu den Messwerten kann über die Bilanzierung der Abfallmassenstrom kontinuierlich erfasst werden (Online-Bilanzierung) und ermöglicht damit auch schnellere Einflussnahmen auf die stattfindenden Prozesse.

Entsprechend kann die Bilanzierung der Anlage auf Grundlage von Betriebsdaten zum einen dazu beitragen, Plausibilitätsfragen zur Erfassung des Abfallinputs in die Anlage zu beantworten. Darüber hinaus können zusätzliche Informationen abgeleitet werden, auf welche im Weiteren eingegangen wird.

Qualitative Betrachtungen zur In-Situ Brennstoffdiagnose auf Grundlage von Betriebsdaten

Im Sinne der hier diskutierten In-Situ Brennstoffdiagnose für heterogene Abfallströme erscheint es sinnvoll, die Informationslage insbesondere hinsichtlich der Abfallqualitäten zu erweitern. Berücksichtigt wird dabei, dass insbesondere Verschmutzungs- und Korrosionsphänomene, aber auch Maßnahmen zur Emissionsminderung, nicht alleindurch die Fracht, sondern ebenfalls von der im Brennstoff vorliegenden Spezies (Zersetzungs- und Bildungsprozesse in Verbindung mit der chemischen Bindungsform) und den jeweiligen Partikel-Korngrößen (Ab- und Ausbrandverhalten, Freisetzungsverhalten, spezifische Oberflächen) gekoppelt mit der Prozessführung (Anlagenlast, Reinigungsintervalle, Feuerungseinstellungen) und der Anlagenkonstruktion (Strömungsführung, Wärmetransport, Heizflächenlage und -beschaffenheit) beeinflusst werden. Die Betrachtungen sind strenggenommen entsprechend anlagenspezifisch durchzuführen, erlauben jedoch anlagenübergreifende Erkenntnisse.

Neben der Abfallmenge spielt auch die Abfallqualität im Sinne der Abfallzusammensetzung und des Abfallheizwertes für den optimierten Betrieb der jeweiligen Anlage eine große Rolle. An der Eingangswaage stehen neben der Brennstoffmenge auch Informationen zur Abfallherkunft (Anlieferer, Abfallschlüsselnummer-ASN) zur Verfügung, die für einen Großteil der angelieferten Abfälle bislang allerdings nur wenig verlässliche Informationen zur Abfallqualität liefern. Ausnahmen sind dabei z.B. Klärschlämme (ASN 19 08 05) und sogenannte Shredderleichtfraktionen (ASN 19 10 04) für welche häufig beim Einsatz entweder maximale Zumischungen vorgegeben werden und/oder vom Anlieferer garantierte Werte einzuhalten sind (z.B. maximaler Feuchtegehalt und Schwefelgehalt bei Klärschlämmen). Diese Vorgaben beruhen auf bislang gesammelten Erfahrungen insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden spezifischen Feuerungs- und Wärmübertragungsprobleme u.a. aufgrund veränderter Ascheschmelztemperaturen, Heizwertänderungen und eines veränderten Emissionsverhaltens (Abgas und Reststoffe).

Wie weiter oben beschrieben, ist es auf Grundlage der Bilanzierung möglich, neben dem Abfallmassenstrom auch Informationen zur Charakterisierung der zugeführten Brennstoffe, wie die elementare Zusammensetzung und den Heizwert des aktuell verbrennenden Abfalls zu ermit-

teln. Darüber hinaus gibt es darauf aufbauende Ansätze, um z.B. aus der rückwärts bilanzierten Elementar-Analyse Rückschlüsse auf die eingesetzten Abfallfraktionen zu ziehen und daraus den biogenen Kohlenstoffgehalt zu ermitteln [12]. Die Methoden zielen darauf ab, die heterogenen Abfallströme im weiteren Sinne zu klassieren. Insbesondere der Ansatz zur Einteilung nach Abfall-Fraktionen erlaubt es ein Abfallgemisch in unterschiedliche Qualitäten einzuordnen. In einem weiteren Schritt kann der Einfluss dieser klassierten Abfall-Fraktionen hinsichtlich der Einhaltung der Prozess-Regelungsgüte, sowohl hinsichtlich der Verbrennungsbedingungen als auch zur Schadstoffabscheidung untersucht werden, um daraus Zusammenhänge abzuleiten. Darüber hinaus können brennstoffspezifische Einflüsse auf die Verschmutzungsneigung untersucht werden, da auch hier Modelle zur Wärmeübertragung und Ableitung von Verschmutzungsfaktoren vorhanden sind [9].

Auf Grundlage der vorhandenen Betriebsdaten und den existierenden verfahrenstechnischen Modellen (Bilanzierungsmodelle) können, wie beschrieben, insbesondere einzelne Apparate (Überhitzer) oder Verfahrensbausteine (thermisches Hauptverfahren) bzw. die Gesamtanlage näher betrachtet und prozesstechnisch bewertet werden, um Rückschlüsse auf mögliche Optimierungspotentiale abzuleiten.

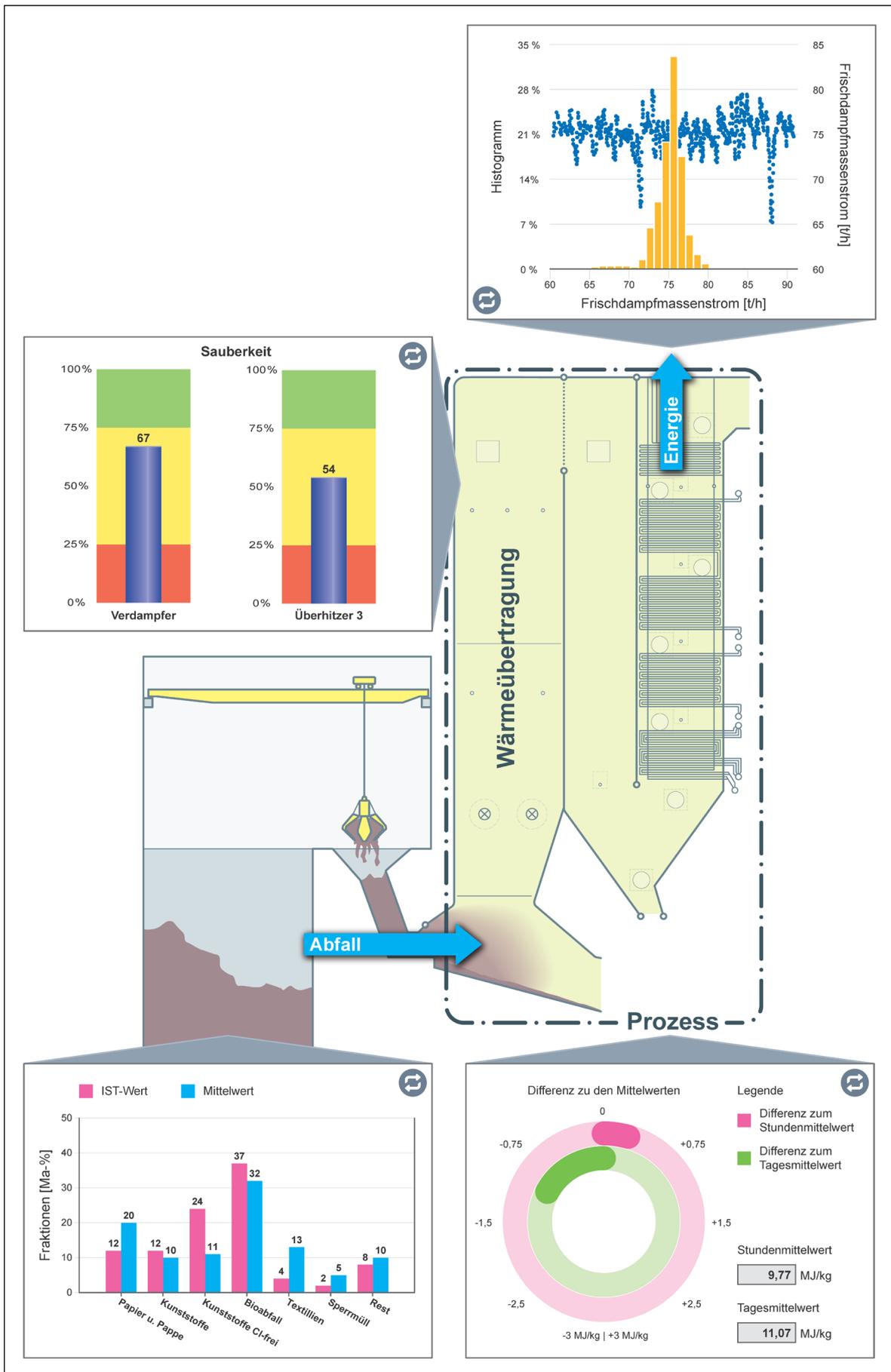


Abbildung 2: Betriebsdaten und über Modelle ableitbare Informationen

Die heute in den Anlagen eingesetzten Prozessleitsysteme erlauben es in Verbindung mit Datenbanksystemen (Schnittstelle) und softwaregestützten spezifischen Anlagenmodellen (verfahrenstechnische Modellierung) die unterschiedlichen Prozesszustände online, d.h. kontinuierlich zu ermitteln und entsprechende Bewertungen durchzuführen sowie entsprechend informativ und nutzbringend zu visualisieren (Abbildung 2 bzw. [9, 13]).

Im Sinne der In-situ Brennstoffdiagnose können diese Bewertungen entsprechend um den Einfluss der Abfallqualität ergänzt werden. Insbesondere in Anlagen, in welchen die Brennstoffqualitäten nur begrenzt bei der Anlieferung betrachtet werden können, erscheint dieser Ansatz zielführend, gerade vor dem Hintergrund der sich zukünftig weiter verändernden Abfallqualitäten.

In den meisten Fällen erlauben die Betrachtungen auf Grundlage der vorhandenen Betriebsdaten allerdings nur unzureichende bzw. keine ortsaufgelösten Aussagen, die allerdings eine wesentliche Ergänzung darstellen. Auf diese soll im Weiteren näher eingegangen werden.

2.2. Erweiterte Sensorik und Sonden

Die sensorischen Hilfsmittel der In-Situ Brennstoffdiagnose werden vor allem im Bereich der Feuerung und der Nachverbrennung dauerhaft installiert. Zudem werden die gleichen sensorischen Hilfsmittel auch entlang des Rauchgasweges eingesetzt, unterstützt durch den temporären Einsatz von Sonden. Damit lässt sich der Brennstoff in seinen energetischen und stofflichen Eigenschaften charakterisieren. Dies kann z.B. sehr schnelle Prozesse einbeziehen (Feuerung) oder auch sehr langachsige Prozesse (Verteilung von Stofffrachten des Brennstoffs auf bestimmte Stoffströme und Spezies im Verlauf einer Reisezeit).

Die Sensoren und Sonden der In-Situ Brennstoffdiagnose nutzen gezielt Wärme- und Stoffinformationen, die in der Feuerung und entlang des Rauchgasweges verfügbar sind.

Die im Bereich der Feuerung und Nachverbrennung ermittelten Wärmeinformationen charakterisieren die Energiefreisetzung unmittelbar, also ohne Zeitverzug, und ortsaufgelöst, also entlang des Rostes und über die Höhe der gestuften Feuerung. Die eingesetzte Sensortechnik erlaubt die Erfassung der eingetragenen Wärmemenge in Bezug auf nahezu beliebig kleine Wärmeübertragerabschnitte. Daraus ergibt sich eine hochaufgelöste Information über den Feuerungsprozess. Dies ist insbesondere im Bereich der einzelnen Verbrennungszonen von Interesse, da es damit möglich ist, die Teilprozesse der Feuerung (Zünden, Haupt- und Nachverbrennung sowie Ausbrand) separat zu bewerten.

Zudem werden Wärme- bzw. Temperaturinformationen auch in den verschiedenen Bereichen des Dampferzeugers erfasst. Es wird im Grundsatz die gleiche Sensorentechnik eingesetzt, wie oben bei der Feuerung beschrieben, unterstützt durch den Einsatz von Sonden. Die Sonden sammeln stoffliche Informationen (u.a. Belageigenschaften, Aerosole, SO₃-Fracht, Korrosionsprozesse) oder liefern optische Informationen (Hochtemperatur-Kamerasonde).

Sensoren und Sonden wurden bereits in früheren Tagungsbeiträgen und Veröffentlichungen ausführlich vorgestellt ([2-4,6-7]) und über die letzten Jahre kontinuierlich weiterentwickelt.

Eine beispielhafte Anordnung der Sensorik und der Sonden in der Feuerung und im Dampferzeuger zeigt Abbildung 3. Die Lage und Anzahl der Sensoren und Sonden ist abhängig vom Informationsbedarf und dem gewünschten Grad an Prozesstransparenz.

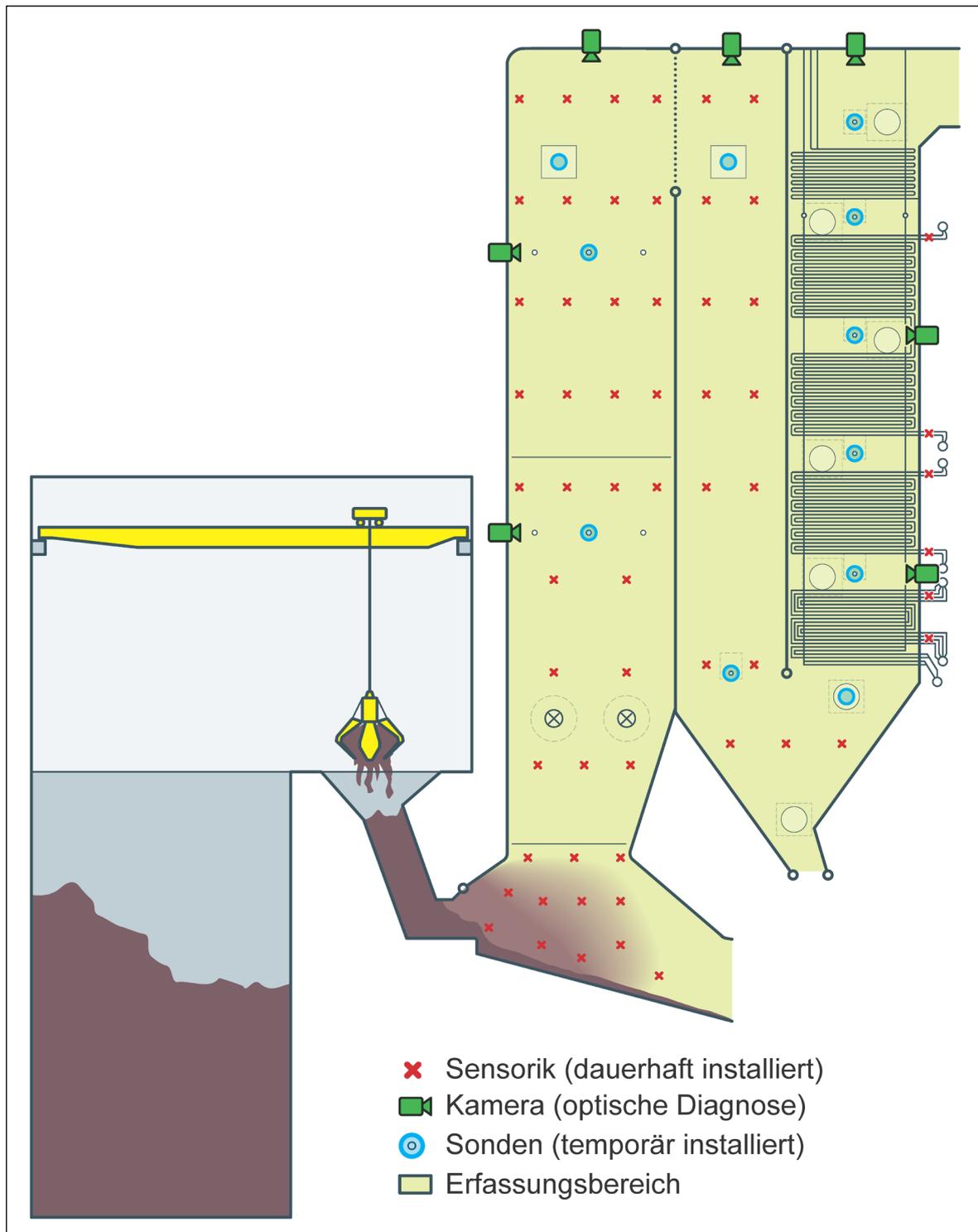


Abbildung 3: Beispielhafte Anordnung der Sensorik und der Sonden in der Feuerung und im Dampferzeuger

Es ist leicht nachvollziehbar, dass die Informationen der In-Situ Brennstoffdiagnose auch für spezifische Verfahrensschritte genutzt werden können, um diese zu optimieren, u.a. die SNCR Technik, online-Reinigungsverfahren und den Einsatz von Additiven. Hierzu nachfolgend noch einige Anmerkungen und Beispiele.

Die Frachten an NO_x im Rauchgas und das Verschmutzungsverhalten des Dampferzeugers sind ein Abbild von stofflichen Brennstoffmerkmalen, die im Zuge der Feuerung in thermische und stoffliche Merkmale des Rauchgases übertragen werden. Für die Verschmutzung relevant sind hier vor allem die Anteile und Proportionen bestimmter Spezies im Brennstoff, wie z.B.

Chlorverbindungen, Schwefelverbindungen, Alkaliverbindungen, Erdalkaliverbindungen und Schwermetallverbindungen, sowie das Verhältnis von inerten Stoffen und Salzen. Eng gekoppelt mit dem Verschmutzungsverhalten ist auch das Korrosionsverhalten der Wärmeübertragereflächen.

Bezüglich der Wirkung der SNCR-Technik ist die im Bereich der Nachverbrennung installierte Sensorik relevant. Bezüglich online-Reinigung ist die Sensorik dort positioniert, wo diese Technik angewendet wird, also sowohl im Strahlungsteil als auch im Berührungsteil.

Die Wirksamkeit der durch die Sensorik verfügbaren Informationen zur Wärmeverteilung und Wärmeauskopplung in Bezug auf die optimale Betriebsweise der SNCR- und der online-Reinigungstechnik beruht darauf, dass sowohl diese Technik der Entstickung als auch die Belagsbildung durch die Temperaturniveaus und die Temperaturverteilung im Rauchgas stark beeinflusst werden. Inhomogene Wärmeverteilungen im Rauchgas (z.B. Schieflagen) bzw. starke zeitliche Schwankungen der Rauchgastemperaturen sind grundsätzlich nachteilig.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen am Beispiel einer MVA, wie die installierte Sensorik zu Informationen der Prozessführung der Feuerung (Abbildung 4) und der (Spreng)Reinigung von Verdampferheizflächen (Abbildung 5) genutzt werden kann.

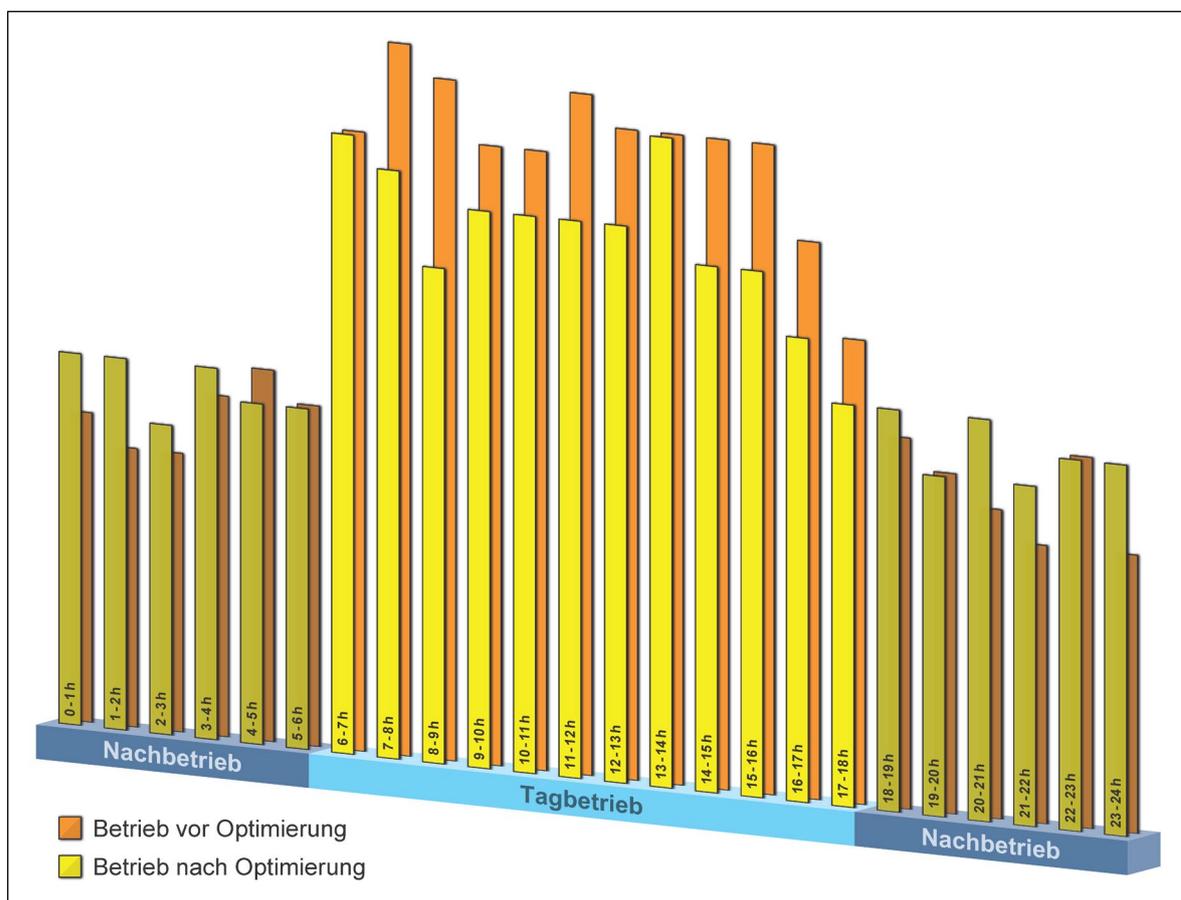


Abbildung 4: Dargestellt ist die Schwankung der Wärmeauskopplung, es ist deutlich ein Unterschied zwischen Tag- und Nachtbetrieb zu erkennen; die beiden Datenreihen stellen einmal den Betrieb vor einem ersten Optimierungsschritt (orange) und einmal danach (gelb) dar; es ist deutlich weiteres Optimierungspotential zu erkennen (Ziel: Angleichung Tagbetrieb an den Nachtbetrieb)

Die Sensorik im Bereich der Feuerung (Abbildung 4) kann u.a. dazu genutzt werden, Tendenzen der Stetigkeit bzw. Unstetigkeit in der Feuerführung aufzuzeigen. Dargestellt ist ein Maß für die Schwankung der Wärmeauskopplung (Standardabweichung der Schwankungen der

ausgekoppelten Wärmemenge je Tagesstunde, gemittelt über jeweils einen Monat). Es zeigt sich, dass die Feuerung in Nachtstunden, also zwischen 18 Uhr und 6 Uhr, deutlich homogener verläuft, als in Tagstunden. Die hier verwendete Standardabweichung eignet sich, die Unterschiede in der Homogenität der Feuerführung zu quantifizieren und bietet damit klare Ansatzpunkte zur Optimierung. Dahingehend zeigen die beiden Datenreihen (orange Balken für Betrieb vor Optimierung der Feuerung und gelbe Balken für Betrieb nach ersten Optimierungsschritten der Feuerführung), wie durch Feuerungsoptimierung, im Zeitraum zwischen den beiden Datenreihen, ein belegbarer Effekt der Homogenisierung erzielt werden konnte. Es ist aber auch deutlich zu erkennen, dass noch ein erhebliches Optimierungspotential vorliegt. Ziel sollte es sein, den Tagbetrieb ähnlich homogen zu gestalten wie aktuell bereits den Nachtbetrieb.

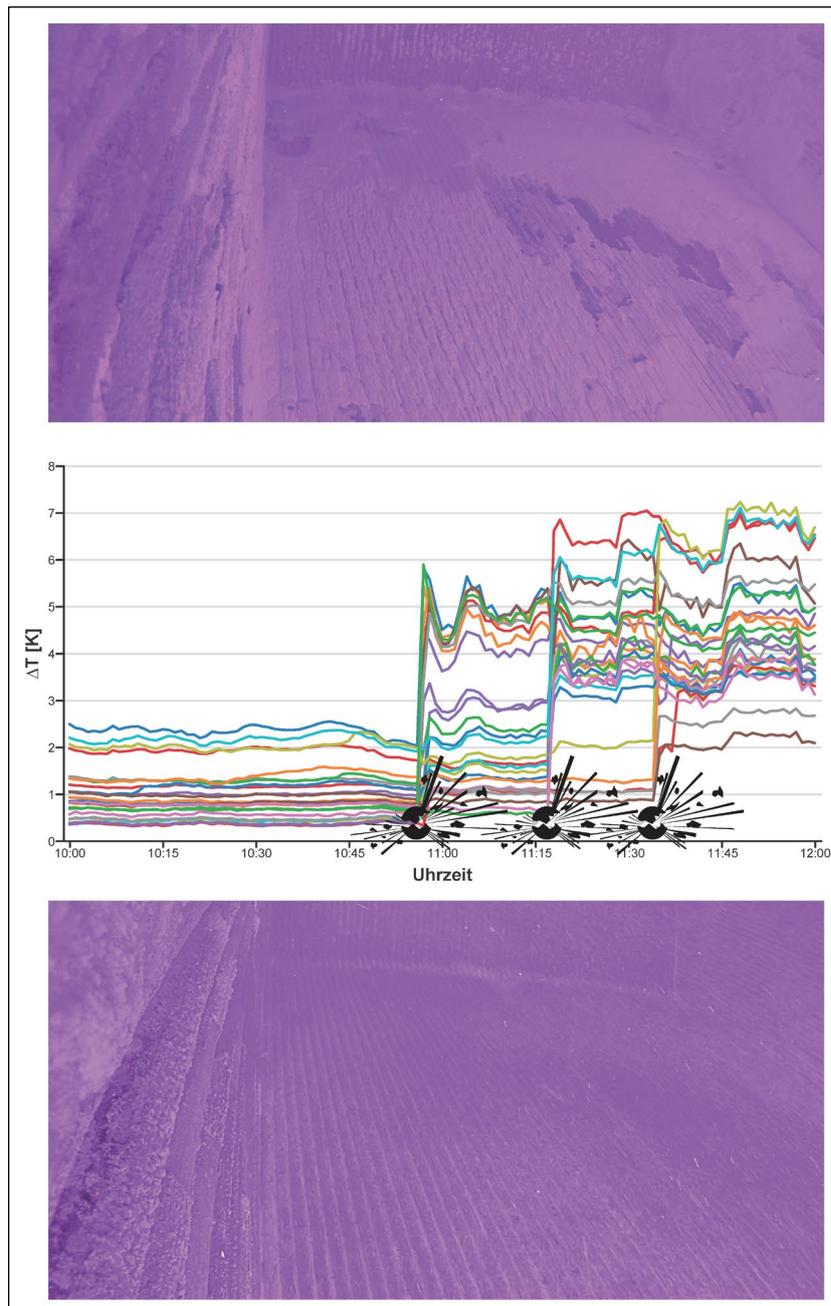


Abbildung 5: Anhand der Sensorikdaten sind deutlich die 3 durchgeführten Sprengreinigungen zur Belagsabreinigung zu erkennen (Sprungantwort); an allen Sensorpositionen konnte eine Reinigungswirkung erzielt werden; die Wärmeauskopplung der gereinigten Flächen wurde dadurch deutlich verbessert

3. Ausblick

Die derzeit politisch geführten Diskussionen zur Einführung der CO₂-Bepreisung von Abfallverbrennungsanlagen (nationale und europäische Bestrebungen) fokussieren darauf, die fossilen CO₂-Emissionen zu reduzieren. Dazu sind Informationen zum Abfallinput notwendig, da diese eine gezielte Bepreisung insbesondere der Abfallfraktionen mit hohem fossilen Kohlenstoffgehalt erst ermöglichen. Eine Beprobung des Abfallinputs ist mit sehr hohem Aufwand und mit hohen Unsicherheiten verbunden. Die Beprobung im Abgas hinsichtlich des fossilen CO₂-Gehaltes erscheint hinsichtlich des Aufwandes und der geringeren Unsicherheiten vorteilhafter.

Allerdings muss bei dieser Methodik ein weiterer Schritt betrachtet werden, der genau darin besteht, einen Rückschluss auf den Abfall-Input zu ermöglichen. Im Bereich der Optimierung in Abfallverbrennungsanlagen beschäftigen sich die Autoren mit dem Zusammenhang zwischen Brennstoffeigenschaften, Anlagentechnik und Prozessführung und haben unterschiedliche sensorische und mathematische Methoden entwickelt, mit welchem diese Zusammenhänge anlagenspezifisch analysiert werden können. Die in Kombination eingesetzten Methoden erlauben Rückschlüsse auf den Abfallinput, bislang weniger in Richtung der politisch forcierten fossilen Kohlenstoffanteile, sondern vielmehr in der Richtung der verfahrenstechnischen Optimierung des Prozesses auf Grundlage der Informationen zum Brennstoff-Input.

Der vorliegende Beitrag soll weiterführend zum Beitrag des letzten Jahres, (Calcium)-Carbonate im Brennstoff und deren Wirkung in thermischen Prozessen [11], anhand von Beispielen zeigen, welche Rückschlüsse aus den Anlagendaten in Verknüpfung mit mathematischen Modellen und zusätzlicher Sensorik und Sonden auf den Abfall-Input möglich sind und welches Potential in den unterschiedlichen Methoden und deren Verknüpfung liegt.

4. Quellen

- [1] Beckmann, M.; Horeni, M.; Metschke, J.; Krüger, J.; Papa, G.; Englmaier, L.; Busch, M.: Optimierung von Müllheizkraftwerken durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 219-240.
- [2] Brell, J.; Kaiser, M.; Schneider, D.; Taubner, S.: Prozessdiagnose und Optimierung mit Sonden und Sensoren. VGB-Fachtagung *Thermische Abfallverwertung und Wirbelschichtfeuerungen* 2016, 15. – 16. November 2016, Berlin
- [3] Brell, J.; Kaiser, M.; Schneider, D.; Hohmuth, S.; Taubner, S.: Temperatursensorik an realen und temporär eingebauten Bauteilen in Dampferzeugern mit schwierigen Brennstoffen. In: VGB PowerTech, Ausgabe 6/2017, S. 33–36.
- [4] Brell, J.; Taubner, S.: Temperatursensorik: Neue Wege zur Prozessoptimierung. In: Pohl, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2015. Wechselwirkungen – Diagnosemethoden – Minderungsstrategien – Erfahrungen, Freiberg: Saxonia Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, 2015, S. 41–50
- [5] Horeni, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen - Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Papierflieger, 2007. – Dissertation an der Bauhaus Universität Weimar, ISBN 3-89720-889-X.
- [6] Kaiser, M.; Spiegel, W.: Corrosion/Fouling Environment Evaluation in MVA und Biomasseanlagen. In: Beckmann, M. und Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2021 Power Plant Technology, Freiberg: Saxonia Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, 2021, S. 119–129

- [7] Kaiser, M.; Schneider, D.; Brell, J.; Molitor, D.; Kuttner, T.: Effizienzsteigerung – Anwendung der Temperature-Range-Probe zur Optimierung der Werkstoffwahl in MVA. VGB PowerTech, Ausgabe 10/2015, S. 53–58
- [8] Müller, W.; Schneider, D.; Kaiser, M.; Brell, J.; Spiegel, W.; Pohl, M.: Fuel leaflets for the prevention of negative impact on the boiler from minor fuel constituents. In: VGB PowerTech, Ausgabe 7/2014, S. 76-81
- [9] [9] Pohl, M.; Wen, T.; Jentschke, L.; Kaiser, M.; Brell, J.; Spiegel, W.; Bernhardt, D.; Graube-Kühne, F.; Kehr, T.; Beckmann, M.; Geese, B.; Durwen, M. und Sauer, S.: Assistenz- und Monitoringsystem zur intelligenten Kesselreinigung im Kraftwerk Schkopau. 52. Kraftwerktechnisches Kolloquium, 06.-07. Oktober, Dresden, In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2020, Power Plant Technology, Freiberg: Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, S. 623-632
- [10] Pohl, M.; Becker, G.; Heller, N.; Birnstengel, B.; Zotz, F.: Auswirkungen des nationalen Brennstoffemissionshandels auf die Abfallwirtschaft. Studie im Auftrag des BMWK, März 2022
- [11] Pohl, M.; Kaiser, M.: (Calcium)Carbonate im Brennstoff und deren Wirkung in Thermischen Prozessen. Präsentation abrufbar unter: www.chemin.de/wp-content/uploads/2021/09/Carbonate-im-Brennstoff_prae.pdf
- [12] Pohl, M.; Wen, T.; Jentschke, L.; Bernhardt, D.; Beckmann, M.: CO₂-Sensor - Vom Abgas zum Brennstoff. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2021 - Power Plant Technology, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2021, S. 231-246, ISBN 978-3-949169-01-4, E-Book: ISBN 978-3-949169-02-1.
- [13] Pohl, M.; Wen, T.: Modellbasierte Betriebsdatenanalyse zur Effizienzsteigerung – Verknüpfung von verfahrenstechnischem Modell und Sensor-Daten eines Kraftwerks. In: Beckmann M., Hurtado A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2018. Power Plant Technology. Freiberg: Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2018, S. 87-97.
- [14] Zeltner, S.: Senkung stickstoffbasierter Emissionen in Wirbelschichtanlagen durch den Einsatz von Onlinebilanzierungsmethoden. Schriftenreihe: des Fachgebietes Abfalltechnik Dissertationen, Band 23, 2020. ISBN: 978-3-7376-0868-8