conenga group

KWTK
KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLLOQUIUM

Beiträge der CONENGA Group beim Kraftwerkstechnischen Kolloquium

ANLAGENBAU I VERFAHRENS- & REGELUNGSTECHNIK I MANAGEMENT

Das Kraftwerkstechnische Kolloquium

Die Technische Universität Dresden veranstaltet jährlich das Kraftwerkstechnische Kolloquium (KWTK) bereits seit 56 Jahren in Dresden. Der Kongress hat sich zu einer wissenschaftlich-technischen Plattform der Energie- und Kraftwerksbranche entwickelt und ist Veranstaltungsort für über 100 Fachvorträge sowie die Firmenmesse (2024: 101 Aussteller). Das KWTK begrüßt jährlich rund 1.000 Teilnehmerinnen und Teilnehmer, vorrangig aus der Industrie. Wir als CONENGA Group (vormals VOIGT+WIPP Engineers) sind regelmäßig als Besucher aber immer wieder auch als Vortragende dabei. Auf beiden Seiten gibt es spannende Begegnungen, das Format wird von den Veranstaltern in beeindruckender Weise immer weiter entwickelt und bei einem gemeinsamen Abendessen können neue und alte Kontakte gepflegt, vertieft sowie Ideen besprochen werden.

Unsere Beiträge möchten wir Ihnen gerne hier in einer Zusammenfassung zur Verfügung stellen und Ihnen damit, werte Leserinnen und Leser, einen weiteren Einblick in ein Feld unserer Tätigkeiten ermöglichen. Die Umsetzung erfolgte auf Basis unserer bewährten EPOC® Suite welche durch unterschiedliche Module bestens auf jedes individuelle Projekt angepasst werden kann. Durch ein modernes und den aktuellen Richtlininen hinsichtlich Cybersicherheit ausgerichtetes Update- und Servicepaket stellen wir den den gewonnenen Mehrwert dauerhaft sicher!
Das 57. Kraftwerkstechnische Kolloquium findet am 7. und 8. Oktober 2025 im Internationalen Congress Center Dresden statt.

Weiter Informationen finden Sie hier:
https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/evt/kraftwerkstechnisches-kolloquium

Besuchen Sie unsere Website und unseren YouTube-Kanal.
Dort finden Sie auch Aufzeichnungen unserer Beiträge.

Unser Beitrag beim KWTK 2024:

Wirkungsvolle Optimierung von Reststoffverbrennungsanlagen mit Wirbelschichtfeuerung durch übergeordnete MPC-Regelung

2024 2020 2017 2016

KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLLOQUIUM

Wirkungsvolle Optimierung von Reststoff-verbrennungsanlagen mit Wirbelschichtfeuerung durch übergeordnete MPC-Regelung

Sebastian Sturm und Michael Merkel

1. Einleitung und Motivation 2
2 Problemstellung 4
2.1. Brennstoffmanagement 4
2.2. Optimierungskonzept 5
3. Model Predictive Control 6
3.1. Welche Stellgrößen wirken auf welche Regelgrößen? 6
3.2. Folgende Schritte sind für die Inbetriebnahme einer MPC notwendig 7
4. Einsparungs- und Mehrerlöspotenzial 8
4.1. Mehrverstromung Turbine 9
4.2. Gaseinsparung Steamblocks 9
4.3. Gesamteinsparung 9
5. Quellen 10

Durch die Umsetzung eines übergeordneten, modellbasierten Regelkonzepts für die Verbrennungsoptimierung eines Wirbelschicht-Reststoffkessels kann Erdgas eingespart sowie mehr erneuerbarer Strom produziert werden. In dieser Arbeit wird damit eine CO_2-Einsparung von > 1000 t pro Jahr berechnet.

Anhand eines Vorher-Nachher-Vergleichs im Zuge des übergeordneten Optimierungsprojekts in der Papierindustrie wird gezeigt, dass die produzierten Dampfmengenschwankungen um 30 % reduziert werden konnten. Dabei wird

sowohl die Vorgabe an die Brennstoffzusammensetzung automatisiert beeinflusst als auch die Kessel-Leistungsvorgabe dynamisch aus den online berechneten Dampfbilanzen ermittelt.

Dies ermöglicht eine signifikant höhere Dampfproduktion sowie stabilere Prozessbedingungen bei gleichzeitiger Verringerung von notwendigen manuellen Eingriffen durch einen höheren Anlagenautomatisierungsgrad. Das gesamte Projekt wurde in einer Laufzeit von sechs Monaten realisiert.

1. Einleitung und Motivation

Die Dekarbonisierung von Industriestandorten ist erklärtes Ziel von Politik und Wirtschaft und notwendig, um die vorgegebenen Klimaziele zu erreichen. Die Verbrennung von Reststoffen in industriellen Anlagen trägt dabei maßgeblich zur erneuerbaren Energiebereitstellung von Produktionsprozessen und Energieversorgung bei. In Österreich beträgt der Anteil von brennbaren Abfällen an der gesamten Primärenergieerzeugung 5,8 %, im Vergleich zum EU-27 Schnitt von 2,3 % (Abbildung 1).

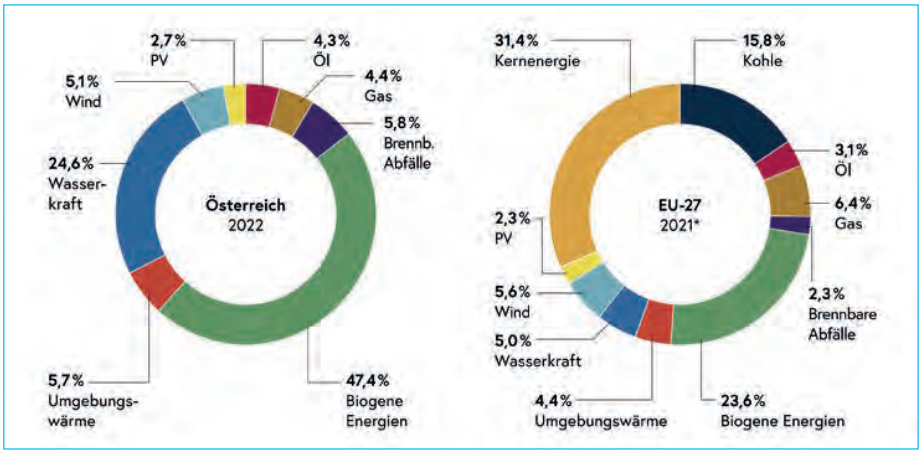

Abb. 1: Primärenergieerzeugung Österreich, EU-Schnitt [1]

Betrachtet man den Bruttoinlandsverbrauch, verbleibt ein Anteil von 2,2 % in Österreich bzw. 1,0 % im EU-27 Schnitt (Abbildung 2).

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

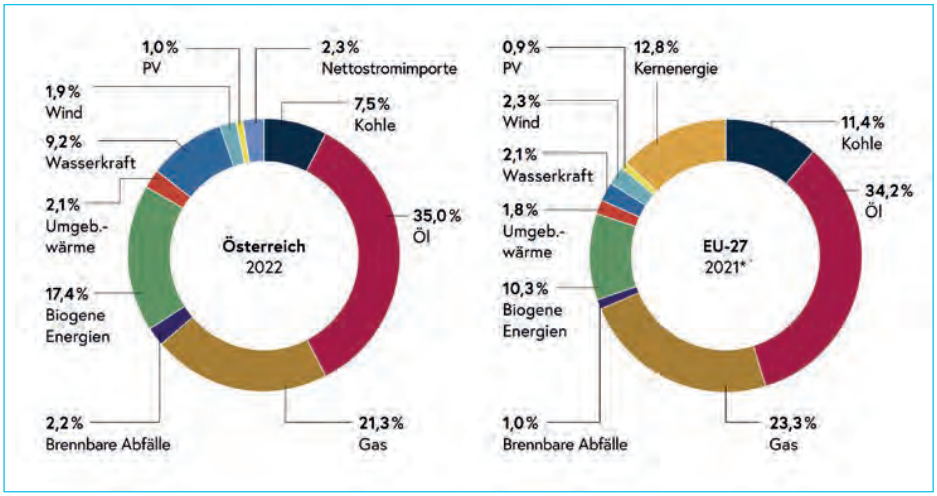

Abb. 2: Bruttoinlandsverbrauch Österreich, EU-Schnitt [1]

In Deutschland liegt die Energiebereitstellung der thermischen Abfallbehandlung (TAB) an Strom, Fernwärme und Prozessdampf bei über 30 Mio. MWh. [2], was bei einem Primärenergieverbrauch von 10,7 Exajoule einem Anteil von 1,0 % (und damit EU-27 Schnitt) entspricht. Bei der Betrachtung der Wachstumsraten der einzelnen Energieträger für Österreich ist eine jährliche Zunahme von brennbaren Abfällen um 3,4 % seit 2005 ersichtlich (Abbildung 3).

Wachstum und Rückgang
der Energieträger

p.a. 2005–2022		2021–2022
+35,7 %	PV	+36,3 %
+10,5 %	Wind	+7,5 %
+7,3 %	Nettostromimporte	+15,4 %
+8,1 %	Umgebungswärme	+6,6 %
+3,4 %	Brennbare Abfälle	+3,5 %
+2,6 %	Biogene Energien	-4,3 %
-0,4 %	Wasserkraft	-10,4 %
-0,9 %	Gas	-10,9 %
-1,4 %	Öl	-4,2 %
-2,9 %	Kohle	-5,2 %

Abb. 3: Wachstum und Rückgang der Energieträger in Österreich [1]

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Sebastian Sturm und Michael Merkel

Die Effizienz der thermischen Verwertungsprozesse ist von entscheidender Bedeutung, um die aufgewendete Energie bestmöglich zu nutzen.

Warum bleiben bestehende Potenziale oft ungenutzt?

Viele etablierte Steuerungs- und Regelungskonzepte in Verbrennungs- und Dampferzeugungsanlagen sind im Schwerpunkt auf eine robuste Prozessführung ausgelegt. Die Prioritäten liegen bei Prozessstabilität und Produktqualität. Damit vernachlässigen diese Konzepte jedoch das mit dynamischerer Fahrweise nutzbare Potenzial der Anlagen. Erhebliche Einsparungen, welche die Durchführung solcher Optimierungsmaßnahmen bieten würden, werden aufgrund von Angst vor Produktionsausfällen vernachlässigt. Ein weiterer Grund für die mangelnde Hebung von Optimierungspotenzialen sind in vielen Fällen die fehlenden internen Ressourcen fachlicher und zeitlicher Natur.

2 Problemstellung

Im Wirbelschichtkessel HKW 2 werden eigene und externe Reststoffe thermisch verwertet. Faserreststoffe, aber auch externe Brennstoffe wie Altholz, erzeugen eine nutzbare Frischdampfmenge von bis zu 68 t/h. Zusätzlich können mit zwei Gegendruck-Turbinen maximal 9 MW Strom erzeugt werden.

Die Leistungsregelung erfolgt über die Vorgabe von Materialeinbringung und Luftmengen. Dabei müssen Emissionsgrenzen nach Vorgabe der 17. BImSchV für CO und NO_x eingehalten sowie Anlagenlimitierungen berücksichtigt werden.

Die Wirbelbett-Temperatur soll für optimale Fluidisierung bei ca. 700 °C liegen.

2.1. Brennstoffmanagement

Die Mengen von zu verbrennendem Faserreststoff können stark schwanken, da dieser so zu verwerten ist, wie er aktuell anfällt. Die Regelung der Brennstoff- und Zwischenbunkerfüllstände muss dabei durch dynamische Einbringung von Altholz und Fremdbrennstoff erfolgen.

Die Qualität von Altholz schwankt zum Teil stark (Feinanteil). Der Feinanteil verbrennt nicht direkt im Wirbelbett, sondern wird von der Primärluft nach oben transportiert.

Über die Beeinflussung der resultierenden Brennstoffmischung muss der Heizwert gezielt manipuliert werden, um Wirbelbettdynamik und -temperaturen in einem optimalen Bereich zu halten. Mithilfe einer NIR-Messung können Brennstoffschwankungen 5 bis 10 min, bevor diese die Brennkammer erreichen, erfasst werden.

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Abbildung 4 zeigt die Zusammenführung der unterschiedlichen Brennstoffarten.

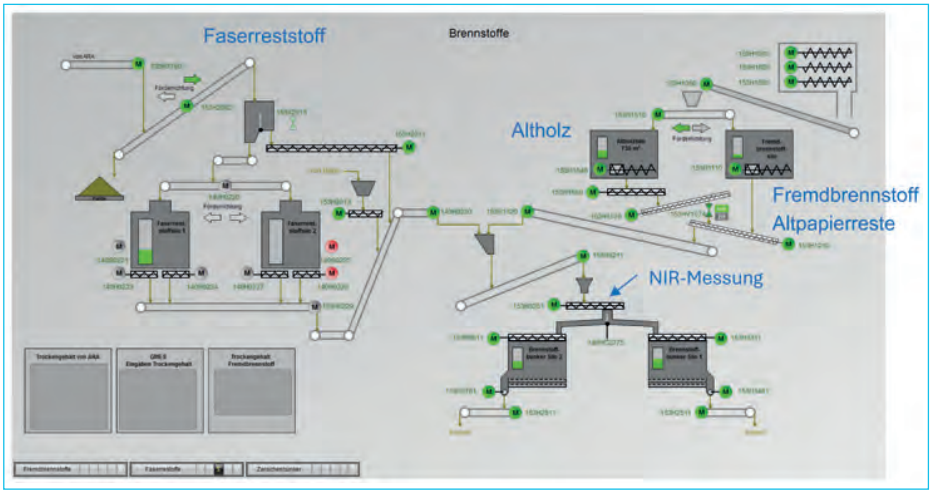

Abb. 4: Brennstoffzusammensetzung (SCADA-System)

Das Projektziel bestand in der Erhöhung der maximal möglichen Dampfproduktion des Reststoffkessels sowie in der verbrennungsseitigen Minimierung der CO- und NO_x- Emissionen. Weitere Zielsetzungen stellten die Erhöhung des Anlagenautomatisierungsgrades sowie die Minimierung von Handeingriffen dar.

2.2. Optimierungskonzept

- Auslastungsregelung: Die Leistung soll möglichst hochgehalten werden, abhängig von den aktuellen Limitierungen und vorausschauend auf die Brennstoffqualität;
- Dampfmengenmaximierung: durch Verringerung der Schwankungsbreite sollen höhere mittlere Dampfmengen gefahren werden können (Abbildung 5 und 6);
- Wirbelbett-Temperatur-Regelung im dafür optimalen Bereich, um gute Fluidisierung und stabilen Betrieb zu erreichen;
- Automatisiertes Brennstoffmanagement: Die schwankende Qualität des Brennstoffs soll vergleichmäßigt werden.

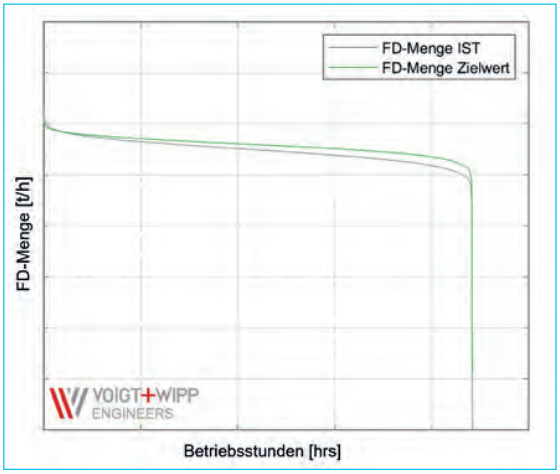

Abb. 5: Geplante Optimierung der Lastverteilung (FD-Mengen sind absteigend sortiert.)

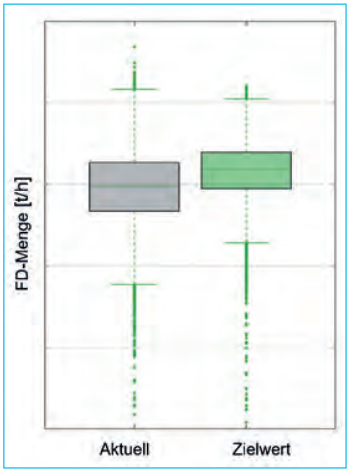

Abb. 6: Geplanter Vergleich der Dampfproduktion vor/ nach Optimierung

3. Model Predictive Control

Eine Herausforderung dabei, Verbrennungsprozesse stabil am Optimierungsziel zu betreiben, ist die Wechselwirkung der verschiedenen Prozessvariablen und die prozessbedingten Totzeiten.

Das gelingt, indem die Regelungslogik das System aus stark verkoppelten Stell- und Regelgrößen sowie messbaren Störeinflüssen modellbasiert, implizit berücksichtigt.

Besonders elegant löst diese Aufgabe ein MPC-basiertes Regelkonzept, natürlich unter Berücksichtigung von unterschiedlichem Zeitverhalten und identifizierten Prozessdynamiken.

So erhält man eine stabile konstante Verbrennung, die sich frühzeitig an Veränderungen anpasst.

3.1. Welche Stellgrößen wirken auf welche Regelgrößen?

Die Abhängigkeit der einzelnen Regel- und Stellgrößen können anhand einer Tabelle visualisiert werden. Abbildung 7 zeigt für einen Auszug an möglichen Regelparametern die zusammengefassten, modellierten Wechselwirkungen des Gesamtsystems.

Regelgrößen / Stellgrößen	Frischdampf	Bett-Temperatur	Emi CO/NO_x	...	...
Primärluftmenge					
Wirbelgasmenge					
Sekundärluftmenge					
Rezigasmenge Freiraum					
Rezigasmenge Primärluft					
...					
...					
...					

Abb. 7: Abhängigkeiten der einzelnen Regelgrößen (schematische Darstellung Gesamtsystem)

3.2. Folgende Schritte sind für die Inbetriebnahme einer MPC notwendig

- Streckenidentifikation und -modellierung (Abbildung 8)
- Simulation und Offline-Tuning
- Deployment und Online-Tuning

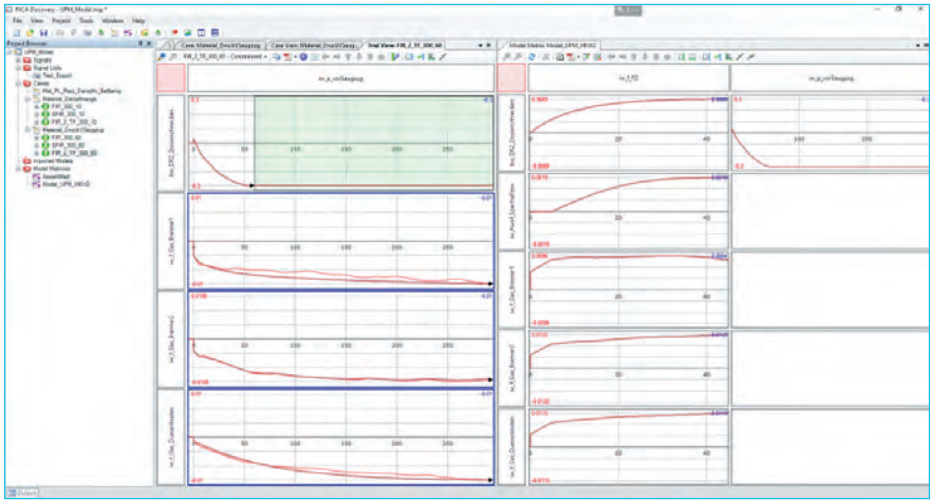

Abb. 8: MPC-Modellierung

Im Online-Betrieb können die kalkulierten Modellprädiktionen in Echtzeit eingesehen werden (Abbildung 9).

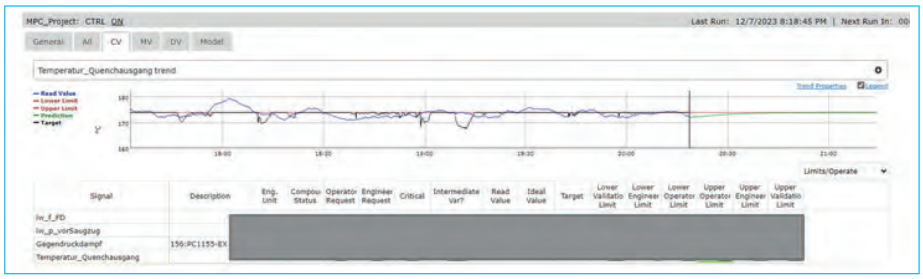

Abb. 9: Online-Prädiktion der Regelgrößen

4. Einsparungs- und Mehrerlöspotenzial

Die produzierten Dampfmengenschwankungen mit der übergeordneten Optimierung EPOC® konnten im Vergleich zur bisherigen Fahrweise um 30 % reduziert werden, wie durch alternierende, tagesweise Fahrweise verifiziert werden konnte (Abbildung 10).

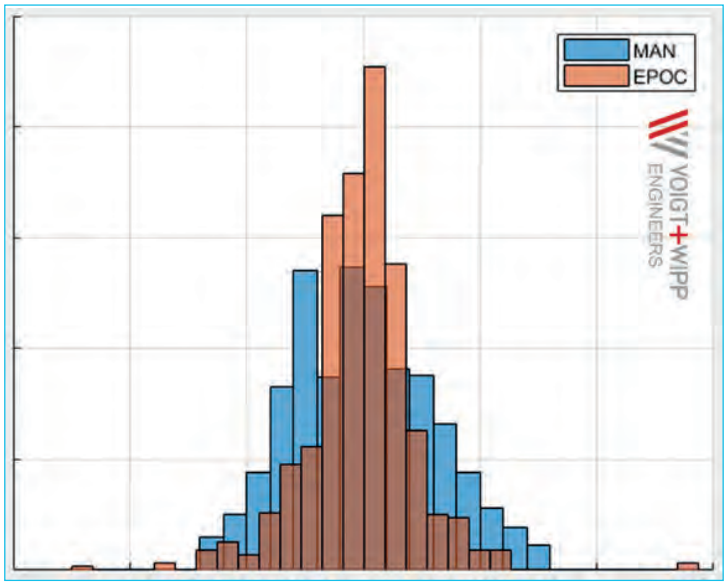

Abb. 10: Vergleich Dampfmengenschwankungen

Die Steigerung der produzierten Dampfmenge des Wirbelschichtkessels führt sowohl zu einer Mehrverstromung an der Dampfturbine DT HKW2 als auch zu geringerem Gasbedarf der Steamblocks. Die Auswirkungen von 1 t/h mehr produziertem Dampf zeigen die nachfolgenden Berechnungen.

4.1. Mehrverstromung Turbine

Abbildung 11 zeigt das TS-Zustandsdiagramm für die Turbinenentspannung. Bei den gegebenen Dampfparametern führt dies zu einer Steigerung der elektrischen Mehrverstromung pro t/h mehr produzierter Dampfmenge.

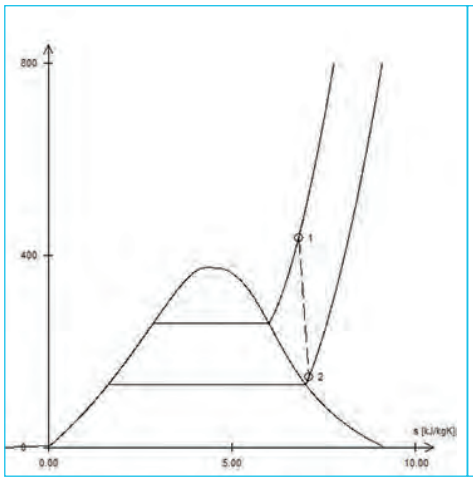

Abb. 11: Zustandsänderung Entspannung in der Turbine

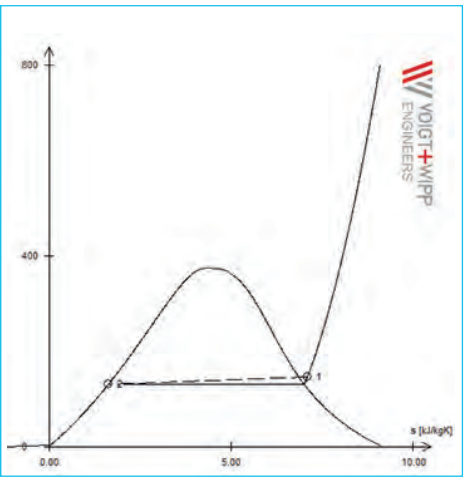

Abb. 12: Zustandsänderung Kondensation

4.2. Gaseinsparung Steamblocks

Der produzierte Dampf wird im Anschluss unter Wärmeabgabe kondensiert, welche den entsprechenden Abnehmern (PMs, Fernwärme) zugeführt wird (Abbildung 12).

4.3. Gesamteinsparung

Eine Mehrerzeugung von 1 t/h Dampf führt zu elektrischer Mehrverstromung sowie zu Leistungseinsparung der Steamblocks. Der Wirkungsgrad < 1 der Steamblocks ist hierbei noch nicht berücksichtigt.

Dadurch ergeben sich die in Tabelle 1 angeführten, kumulierten Einsparungen bzw. Erlöse. Dies entspricht einer CO_2-Einsparung von > 1000 t pro Jahr pro t/h Dampf.

Bei einem Gaspreis von 30 €/MWh sowie Strompreis von 100 €/MWh ergibt dies einen jährlichen Mehrerlös von einem mittleren 6-stelligen Betrag, der durchschnittlich mehr produziert werden kann.

Zusätzlich ergibt sich bei einem aktuellen CO_2-Zertifikatpreis von ca. 70 €/t eine jährliche Einsparung im unteren 6-stelligen Bereich.

5. Quellen

[1] U. E. M. I. u. T. Bundesministerium für Klimaschutz, *Energie aus Österreich 2023*.

[2] M. Faulstich, *Perspektiven der thermischen Abfallbehandlung Roadmap 2040*.

conenga group

2024
2020
2017
2016

Unser Beitrag beim KWTK 2020:

Emissionsoptimierung eines Altholzkraftwerk-sparks mit zwei dual-zirkulierenden Wirbelschicht-kesseln mithilfe der interdisziplinären EPOC®-Optimierungslösung

KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLLOQUIUM

Emissionsoptimierung eines Altholzkraftwerksparks mit zwei dual-zirkulierenden Wirbelschichtkesseln mithilfe der interdisziplinären EPOC®-Optimierungslösung

Bernhard Kronberger, Lukas Haffner und Ralf Ohnmacht

1. Einleitung und Motivation 2
2. EPOC®-Optimierungskonzept 2
3. Beschreibung der EPOC-Optimierungsphasen 3
3.1. Zieldefinition 3
3.2. Systemanalyse 4
3.3. (Tast-)Versuche am Prozess 4
3.4. Betriebserfahrung miteinbeziehen 4
3.5. Regelungskonzepte, Algorithmen und EPOC 4
3.6. Engineering Umbauten, Sensorik, Aktorik 4
3.7. Inbetriebnahme und Tuningphase 4
4. System- und Anlagenbeschreibung 5
5. Systemanalyse 6
5.1. Feuerungstechnische Analyse 6
5.2. Datenanalyse und Auswertungen – Status quo 7
5.3. Analyse Operatoreingriffe 8
5.4. Ergebnisse/Schlussfolgerungen der Systemanalyse 9
6. Konzeptentwicklung, Optimierung und Umsetzung 9
7. Ergebnisse 10
7.1. Verbrennungsschieflage 10
7.2. CO- und NO_x-Emissionen 11

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Bernhard Kronberger, Lukas Haffner, Ralf Ohnmacht

7.3. Stabilität 11

8. Schlussfolgerungen 12

1. Einleitung und Motivation

Die Verschärfung bzw. Reduktion der CO- und NO_x-Emissionsgrenzwerte stellt viele Anlagenbetreiber von Altholzkraftwerken vor große Herausforderungen, weil viele bestehende Altanlagen weder durch regelungstechnische Upgrades noch mit verfahrenstechnischen Detailverbesserungen alleine auf den aktuell erforderlichen Emissionsstandard gebracht werden können. In vielen Fällen scheint nur ein Neubau der gesamten Energieversorgungsanlage und damit eine unzumutbare Investition für den Betreiber sowie ein volkswirtschaftlicher Schaden durch den Abriss der Altanlage die Lösung zu sein. Der vorliegende Beitrag beschreibt einen integrativen Optimierungsansatz sowie die Erkenntnisse und vorläufigen Ergebnisse eines umfassenden Optimierungsprojekts, das aufgrund dieser Verschärfungen initiiert wurde. Das primäre Projektziel ist die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV für CO, NO_x und NH_3. Das sekundäre Projektziel ist es, die erforderliche Emissionsreduktion durch Nutzung multidisziplinärer Optimierungsmöglichkeiten zu erreichen und dadurch den Betrieb der Altholzkesselanlagen zusätzlich zu vereinfachen. VOIGT+WIPP Engineers haben dafür in den letzten 10 Jahren auf Grundlage zahlreicher, erfolgreich durchgeführter Optimierungsprojekte eine interdisziplinäre Herangehensweise zur Prozessoptimierung entwickelt. Dieser Ansatz umfasst Zieldefinition, Analysephase, Zielformulierung der Prozessführung, Ableitung von Umbaumaßnahmen (v. a. Sensorik und Aktorik), Aufbau eines wissensbasierten Regelungssystems durch Miteinbeziehung der Operatorerfahrung als Kern der Umsetzung, Anlagentuning, Integration einer EPOC®-Suite Regelung für Kessel (EPOC® Boiler) und Verbundregelung von Gesamtkraftwerk mit Verbrauchern (EPOC® Decision Management).

2. EPOC®-Optimierungskonzept

Im Gegensatz zu den meist isoliert bzw. domänengebunden betrachteten Optimierungstätigkeiten an komplexen Energieversorgungsanlagen versucht der EPOC-Ansatz (**E**nergy and **P**roduction **O**ptimization **C**ontrol), die individuellen Charakteristika, Möglichkeiten und Grenzen des betrachteten Systems in einem expertengeführten, integrativen und experimentellen Prozess unter Einbeziehung der Betriebserfahrung und des Problemverständnisses aller technischen Stakeholder gleichermaßen wie durch den Einsatz von digitalen Methoden und moderner Regelungstechnik zu identifizieren. Der EPOC®-Optimierungsansatz umfasst folgende Phasen:

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

- eindeutige und strukturierte **Zielformulierung**
- umfassende Systemanalyse zum **Systemverständnis**
- Entwicklung von **Lösungsansätzen** (Bilanzierungen, Verfahrenstechnische Konzepte, Automatisierungsmöglichkeiten, APC (Advanced Process Control) Regelungskonzepte, Bedienvorgaben, Durchführung von Risiko- und Sicherheitsbetrachtungen)
- **Validierung** der Lösungsansätze an der Anlage (Prozessdatenanalyse, Tastversuche, Messkampagnen)
- **Detailengineering** der Ausführung des Lösungsansatzes (Planung der EPOC-Suite – Regelung, Planung von anlagentechnischen Umbauten, Begleitung beim Behördenverfahren)
- **Implementierung** der EPOC®-Suite-Regelung als zur Bestandsregelung übergeordnetes Regelungssystem
- Begleitung von **anlagentechnischen Umbauten**
- **Inbetriebnahme und Tuningphase** der verbesserten Lösungen unter enger Einbindung des Betriebspersonals

Die Grundsätze und allgemeine Ziele des EPOC®-Optimierungsansatzes sind dabei:

- Transparenz und Offenheit der Lösungen (keine Black-Box-Lösung)
  - Anlagenbetreiber sieht, wie die Lösung aufgebaut wurde und kann weitere Optimierungen selbst durchführen
  - Integration und Standardisierung von Betreiber-Know-how in EPOC®-Lösung
- Operator ist Zielgruppe
  - EPOC®-Lösungen haben eine äußerst hohe Nutzerakzeptanz, da sie in der Regel gemeinsam mit dem Operator erarbeitet werden
  - Erhöhung des Automatisierungsgrades durch EPOC®, sodass Operatoren zahlreiche Routinen abgeben können

3. Beschreibung der EPOC-Optimierungsphasen

3.1. Zieldefinition

Bei der Herangehensweise an Optimierungsprojekte von thermischen Energieanlagen im Zusammenhang mit inhomogenen, biogenen Roh- und Reststoffen gibt es unterschiedliche Ansätze, wobei die Erfolgsquote der jeweiligen Maßnahme von Anlage zu Anlage variiert. In diesem Zusammenhang ist es von entscheidender Bedeutung, spezifische, erreichbare und zeitlich realistische Ziele bzw. Zwischenziele zu definieren, schrittweise abzuarbeiten und zu evaluieren.

Bernhard Kronberger, Lukas Haffner, Ralf Ohnmacht

3.2. Systemanalyse

Die Systemanalyse erfolgt vorwiegend durch eine Prozessdatenanalyse basierend auf einem tiefen verfahrenstechnischen Prozessverständnis. Dieses wesentliche Werkzeug des EPOC®-Optimierungsansatzes beinhaltet neben Zeitreihen- und Korrelationsanalysen zur Identifikation und Nachweis von Wechselwirkungen bzw. Ursache-Wirkzusammenhängen auch modellbasierte Simulationen, mithilfe derer fehler- oder mangelhafte Sensoren und Messsysteme identifiziert werden und nichterfasste Prozessparameter mathematisch *konstruiert* werden können.

3.3. (Tast-)Versuche am Prozess

In vielen Fällen kann die auf Messdaten beruhende, datengetriebene Analyse die komplexen Vorgänge in den Prozessen einer Feuerungsanlage nicht ausreichend gut oder richtig abbilden. Weiter liefern historische Prozessdaten oft keine *Good Runs*, weshalb versucht werden muss, diese durch gezielte regelungstechnische Variationen zu erzeugen. In diesen Fällen werden (Tast-)Versuche designet und im regulären Betrieb der Anlage durchgeführt.

3.4. Betriebserfahrung miteinbeziehen

Die Miteinbeziehung der Betreibererfahrung sowie des Operatoren-Know-hows ist eine wesentliche Komponente im EPOC®-Optimierungsansatz. Die spätere Umsetzung folgt einem experten- und wissensbasierten Ansatz, sodass es zur Standardisierung von ansonsten personenbezogenen Handlungsweisen kommt.

3.5. Regelungskonzepte, Algorithmen und EPOC

Bei der Umsetzung der gewählten Maßnahmen sowie der entwickelten Konzepte spielen Informations- und Regelungskonzepte in Kombination mit den passenden HMI-Systemen (**H**uman **M**achine **I**nterface) eine Hauptrolle und stellen somit den Kern des EPOC®-Optimierungsansatzes dar. Auf Grundlage der Betriebserfahrungen wird bei der Entwicklung und Integration von Systemarchitektur und übergreifendem Regelungskonzept speziell auf Robustheit des Systems geachtet.

3.6. Engineering Umbauten, Sensorik, Aktorik

Begleitet wird die Umsetzung immer durch die Identifizierung notwendiger Ergänzungen an der Sensorik sowie durch eine Erhöhung des Automatisierungsgrades z. B. durch zusätzliche Antriebe bzw. Aktoren.

3.7. Inbetriebnahme und Tuningphase

Schlussendlich stellt die Inbetriebnahme-/Tuningphase die abschließende und entscheidende Projektphase dar. Mit der Aktivierung der EPOC®-Informations- und Regelungskonzepte werden auch begleitende Maßnahmen aktiviert, getestet und

optimal eingestellt. Durch (Fern-)Analysen werden der Betrieb der Anlage und die Performance der Regelung auch nach Projektabschluss regelmäßig analysiert.

4. System- und Anlagenbeschreibung

Das im Projekt betrachtete Altholzkraftwerk besteht aus zwei zirkulierenden Wirbelschichtkesselanlagen – im Folgenden mit K1 und K2 bezeichnet. Die beiden Kessel mit einer genehmigten Brennstoffwärmenennleistung von insgesamt 150 MW_{th} erzeugen Prozessdampf für Trocknungsanlagen sowie Strom (Abbildung 1). Die maximale Dampfleistung der beiden Naturumlaufkessel beläuft sich auf jeweils ca. 100 t/h bei einem zulässigen Betriebsdruck von 88 bar und einer Temperatur von 470 °C. Es werden mit dem Dampf unterschiedliche Verbraucher wie Turbinen und Trockner versorgt (Abbildung 1). Als Brennstoffe kommen Altholz der Kategorien A1 – A4 und Biomassestäube zum Einsatz.

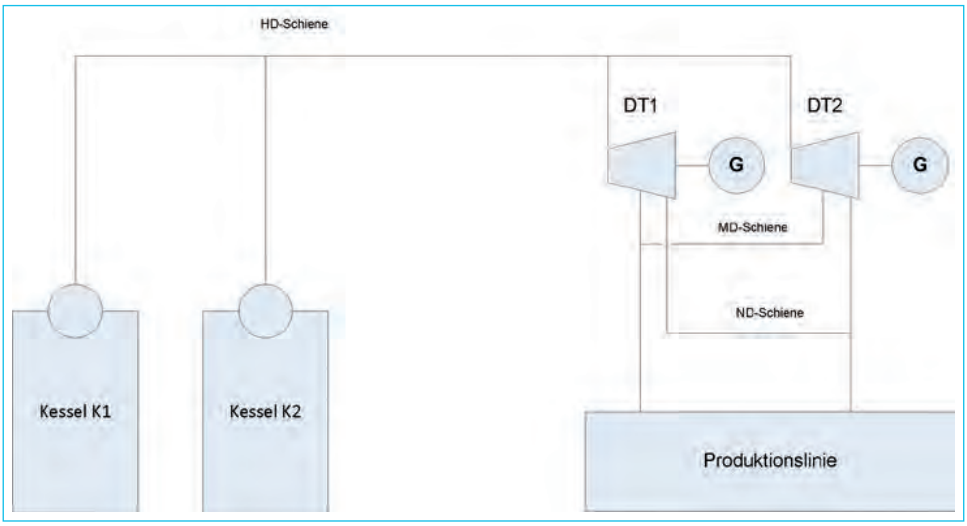

Abb. 1: Energieschema

Beide Kessel sind in rechteckiger Bauweise ausgeführt. Direkt oberhalb des Düsenbodens erweitert sich der Brennkammerquerschnitt durch eine Abschrägung der Kesselrückwand. Durch die Abschrägung vergrößert sich der rechteckige Querschnitt des Feuerraums von ca. 6,75 m x 1,5 m auf 6,75 m x 3,0 m (B x T) auf die doppelte Querschnittsfläche. Die Brennstoffaufgabe erfolgt stirnseitig knapp oberhalb des Düsenbodens über zwei Fallschächte für Holz sowie zwei Einblasfeuerungen für Staub. Die Luftzufuhr erfolgt als Primärluft-Rezirkulationsgasgemisch in mehreren Ebenen direkt über dem Düsenboden sowie als Sekundärluft in zwei weiteren Ebenen.

Das zugrundeliegende, spezielle verfahrenstechnische Design der beiden ZWS-Anlagen kennzeichnet sich durch den Einsatz von Umlenk- bzw. Prallabscheidern mit Fangrinnen nach dem ersten Zug in Kombination mit Multizyklon-Abscheidern am Kesselende (also vor ECO) anstatt der üblichen Heißgaszyklone.

Der Bettmaterialumlauf wird somit einerseits nach dem ersten Zug (Prallabscheider und Fangrinnen) sowie am Kesselende (Multizyklon-Abscheider) sichergestellt, wodurch sich ein dual-zirkulierendes Wirbelschichtsystem ergibt. Auch die Wärmeauskopplung des Kessels unterscheidet sich wesentlich von typischen ZWS-Anlagen mit Heißgaszyklonen: Während bei herkömmlichen Anlagen nicht dem Feuerraum direkt, sondern dem heißen Umlaufmaterial über Fließbettkühler Wärme entzogen wird, sind bei K1 und K2 Membranwände für die Kühlung des Feuerraums vorgesehen. Daraus ergibt sich im Bereich der Abscheider eine im Vergleich zu typischen ZWS-Anlagen um 100 °C bis 150 °C niedrigere Verbrennungsgastemperatur. In Abbildung 2 sind die beschriebenen Unterschiede grafisch dargestellt.

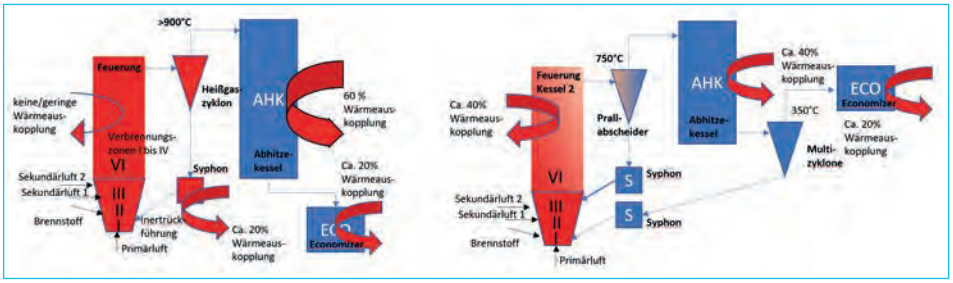

Abb. 2: Vergleich des Umlauf-Konzepts von herkömmlichen ZWS-Anlagen (links) im Vergleich zu K1 und K2

5. Systemanalyse

5.1. Feuerungstechnische Analyse

Die besondere Ausführungsform der beiden Kessel ist die Hauptursache für die vorhandene Emissionsproblematik. Es zeigt sich, dass der ungewöhnlich breite und kurze Brennkammerquerschnitt die Ausbildung von homogenen Temperatur- und Konzentrationsverteilungen erschwert. Die im Zuge des EPOC®-Projektes durchgeführten Temperaturnetzmessungen belegen die inhomogene Verteilung der Verbrennung über den gesamten Querschnitt der Feuerung. Optimale Quervermischungen der Rauchgase können über den Querschnitt nicht stattfinden, Feuerungsschieflagen und Rauchgassträhnen insbesondere in Form von *kaltem* CO werden begünstigt. Die begleitend durchgeführte Kesselsimulation bestätigt, dass einseitige niedrige Temperaturen und niedriger Restsauerstoffgehalt durch hohen Inertmaterialanteil verursacht und ermöglicht werden.

Nachteilig wirkt sich auch die ungewöhnliche Rückführung des abgeschiedenen Inertmaterials in die Kessel K1 und K2 aus. Dadurch entsteht insbesondere am Kessel K2 eine unzureichende Einmischung des Großteils des Inertmaterials in die Wirbelbettzone.

Die Bauform als eine in den Kessel integrierte Feuerung hat den Vorteil des durch die Wirbelschicht sehr hohen Wärmeübergangs und einer kostengünstigen Aus-

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

führung. Der Nachteil allerdings ist, dass der Kessel sehr sensitiv auf Erosionsgefahren reagiert. Vor allem im Bereich der Sekundärluft sind zur Verbrennung hohe Turbulenzen erforderlich, die aber in Kombination mit dem Inertmaterial stark abrasiv wirken und daher die Gefahr von Erosionsschäden am Kessel erhöhen. Durch Analyse der Erosionsbilder an Ausmauerung und Membranwänden im Kessel und durch Auswertung von Wanddickenmessungen konnte ein Gesamtbild entwickelt werden und damit die Feuerung modellhaft abgebildet werden. Es entstand ein durch Messwerte (Abbildung 3) validiertes Simulationsmodell, das sich aus einer Mittelzone sowie einer linken und rechten Randzone zusammensetzt.

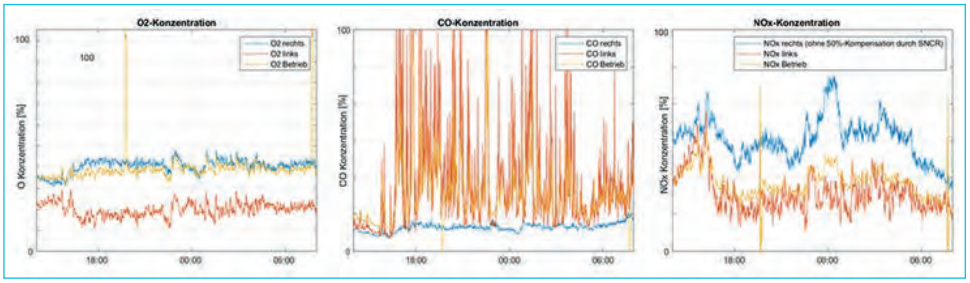

Abb. 3: Ergebnisse der zusätzlichen Gasanalysen links und rechts im Bereich des Feuerraums

5.2. Datenanalyse und Auswertungen – Status quo

In der Analysephase wurden zahlreichen Testreihen durchgeführt, die dazu dienten, sogenannte *Good Runs*, also stabile und erwünschte Verbrennungsphasen zu finden. Dabei konnten die dafür ausschlaggebenden Zusammenhänge identifiziert und mithilfe der zugrundeliegenden Prozessdaten untersucht werden.

Im Zuge der Feuerungsanalyse konnte bereits qualitativ eine massive Schieflage in der Verbrennung festgestellt werden, die anhand der original eingebauten Thermoelemente nicht erkannt werden konnte. Die Ergebnisse der durchgeführten horizontal verteilten Heißgasanalysen zeigen die starken Abweichungen zwischen den einzelnen Verbrennungszonen (Abbildung 3). Es zeigte sich auch, dass die Schwerpunktlage der Verbrennung in Bezug auf die Kesselmittelachse äußerst instabil ist, was durch eine strömungstechnische Betrachtung bestätigt werden konnte.

Die Analyse zeigt, dass eine *Begradigung* bzw. ein Ausgleichen der Schieflage eine Grundlage für niedrigere NO_x- bzw. CO-Emissionen darstellt und damit eine Voraussetzung für die gesamtheitliche Verbesserung ist. Zu Beginn des Analyse-Zeitraums in Abbildung 3 sieht man eine Phase mit homogeneren O_2-, CO- und NO_x-Werten. In diesem Zeitraum führte ein manuell eingeleiteter Ausgleich der Schieflage zu einer Reduktion der Emissionen und bildete damit die Grundlage für die regelungstechnischen Optimierungskonzepte hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Verbrennung (Abbildung 4).

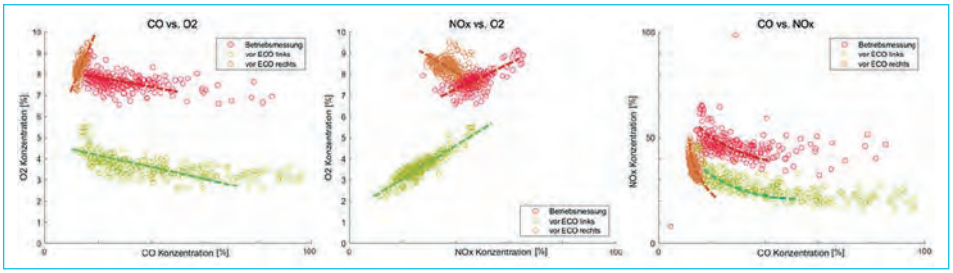

Abb. 4: Zusammenhänge der O_2-, NO_x- und CO-Messwerte an unterschiedlichen Messstellen

Abbildung 5 zeigt am Beispiel eines historischen Prozessdatensatzes von K2 die Analyse der Wirksamkeit des SNCR-Verfahrens. Nach längerer zeitlicher SNCR-Betriebsunterbrechung wurde die Harnstoffdosierung mit üblicher Dosiermenge wieder zugeschaltet, worauf eine deutliche Reduktion der gemessenen NO_x-Konzentration erkennbar wird. Eine rechnerische Überprüfung ergibt eine NO_x-Reduktion von ca. 50 % bis 55 %. Bereits in der Analysephase wurde anhand von Tastversuchen (Düsenposition und -typen, Mengenänderungen) geprüft, ob eine weitere Steigerung möglich sei, was ebenfalls positive Ergebnisse brachte.

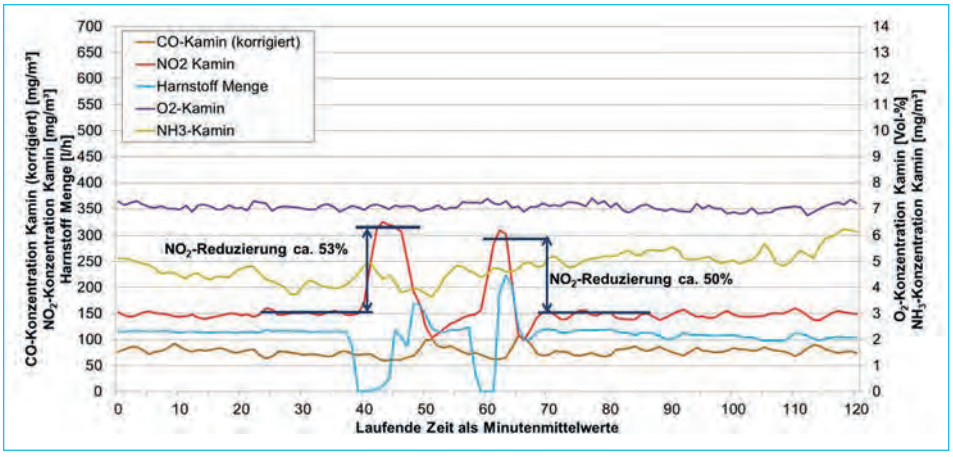

Abb. 5: Zeitlicher NO_x- und CO-Verlauf bei temporärer Unterbrechung der Harnstoffeindüsung

5.3. Analyse Operatoreingriffe

Die Vorgehensweisen der einzelnen Operatoren sind nicht standardisiert, jeder erarbeitet sich sein eigenes Know-how sowie seine individuellen Rezepte. Die Bestandsregelkreise werden oft manuell betrieben bzw. durch Eingriffe behindert, wodurch weder ein regelungstechnisches Verständnis noch ein fachmännisches Justieren der Regler gefördert wird. Zusätzlich sind wesentliche Parameter des Prozesses nicht messbar und daher für den Operator bisher nicht verfügbar.

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

5.4. Ergebnisse/Schlussfolgerungen der Systemanalyse

Im Zuge der Systemanalyse ergeben sich folgende wesentlichen Erkenntnisse:

1. Die Prozessführung, die durch die Bestandsautomatisierung sowie die etablierten Operatoreingriffe geprägt ist, zieht sehr starke Schwankungen nach sich, wodurch es häufig zu unkontrollierten Verbrennungszuständen und hohen Emissionen kommt.
2. Die Kessel werden mit einer sehr starken Temperatur/O_2-Schieflage betrieben, wodurch CO- und NO_x-Emissionen ortsabhängig gegenläufig entstehen und somit die Verbesserung einer Spezies zur Verschlechterung der zweiten Spezies führt.
3. Weitere Erkenntnisse betreffen fehlende Sensorik zur Erkennung und Führung des Verbrennungsprozesses durch die Operatoren.

6. Konzeptentwicklung, Optimierung und Umsetzung

Aus den Analysen wurde ein umfassendes Regelungs- und Automatisierungskonzept entwickelt und in einer zur Bestandsautomatisierung übergeordneten Steuerung umgesetzt, welches die Aktivierung wichtiger Stellgrößen des Kessels übernimmt. Wesentliche Details sind:

- *Ausgeglichene* Feuerungsfahrweise durch Echtzeit-Links/Rechts-Trimmung der Feuerung und Optimierung der Luftmengen je Verbrennungszone
- Adaptive Sollwerte für O_2 und Verbrennungstemperaturen abhängig von den Emissionsverhältnissen. Dazu eine Prädiktion der Emissionen und entwickelte Logiken, die die Einhaltung abhängig von unterschiedlichen Prioritäten und innerhalb von laufend angepassten Grenzen (z. B. Betttemperatur aus Versinterungs-Kennzahl, Umlaufkennzahl, …) sicherstellen.
- Erweiterung der Regelstrategie für Prozessparameter innerhalb definierter Grenzen unter Festlegung einer Priorisierung. Somit ist das Tuning der Parameter sehr komfortabel und einfach.
- Ein im Visualisierungssystem der Leitwarte eingebetteter EPOC®-Performance-Monitor zeigt den Operatoren anschaulich und transparent den aktuellen Auslastungsgrad hinsichtlich Kesselgrenzwerte, den aktuellen Kesselverschmutzungsgrad sowie weitere Kennzahlen auf mehreren themenspezifischen Seiten (Abbildung 6).
- Da die zwei Kessel ein Produktionswerk mit elektrischer und thermischer Energie versorgen, muss die Gesamtkesselleistung permanent dynamisch angepasst werden. EPOC® gewährleistet diese dynamische Fahrweise und nützt die Freiheitsgrade der zwei Kessel derart, dass die Emissionsgrenzwerte auch bei starker Leistungsänderung eingehalten werden. Es zeigte sich, dass es vorteilhaft ist, beide Kessel so zu fahren, dass der sensiblere Kessel die gleichmäßigere Lastvorgabe bekommt.

Bernhard Kronberger, Lukas Haffner, Ralf Ohnmacht

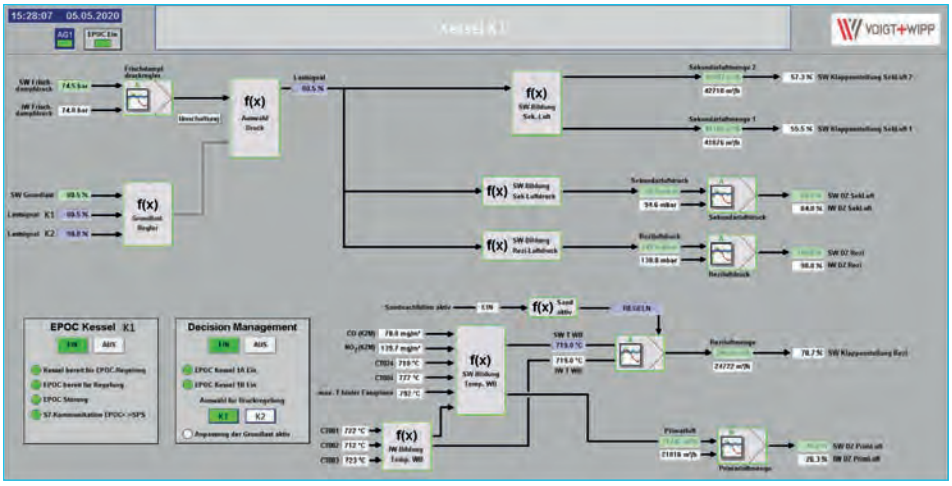

Abb. 6: EPOC®-Teilbild der Visualisierung im Leitsystem

7. Ergebnisse

Das primäre Ziel, die Emissionen dauerhaft auf das Wunschniveau zu senken, wurde zwar bisher nicht in vollem Ausmaß erreicht, dennoch konnten wesentliche Verbesserungen umgesetzt werden. Darüber hinaus wurde das Anlagenverständnis wesentlich erhöht und dadurch eine Grundlage für weiterführende Verbesserungen im Zuge der Optimierungsbegleitung geschaffen.

7.1. Verbrennungsschieflage

Der wohl wesentlichste Erfolgsschritt ist die Erkennung und Ausregelung der Verbrennungsschieflage, womit die Emissionsspitzen und somit auch die mittleren Emissionen erfolgreich gesenkt wurden. In Abbildung 7 sind die Restsauerstoffwerte der beiden nachträglich eingebauten Sauerstoffsonden im 1. Kesselzug dargestellt, die als Indikator für die Verbrennungsschieflage maßgebend sind.

Abb. 7: Verbrennungsschieflage und deren regelungstechnischer Ausgleich nach EPOC®-Inbetriebnahme

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

7.2. CO- und NO_x-Emissionen

Weniger CO bei geringem Rest-Sauerstoffgehalt: Mithilfe der EPOC® Suite konnte die CO-Lambda Charakteristik verbessert werden (Abbildungen 8 und 9), sodass die klassische CO-O_2-Grenzkurve (Optimum) deutlich ersichtlich wird und die Werte häufiger an der Grenzkurve zu liegen kommen.

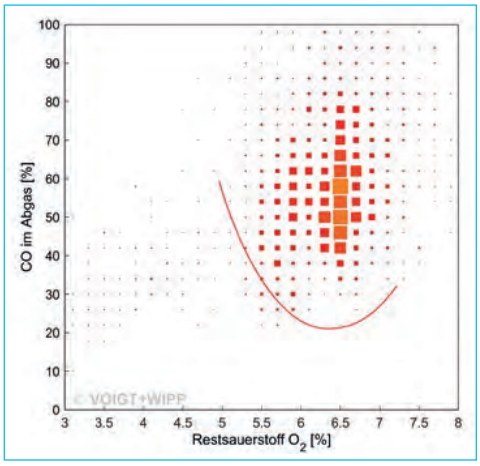

Abb. 8: Restsauerstoff vor Inbetriebnahme

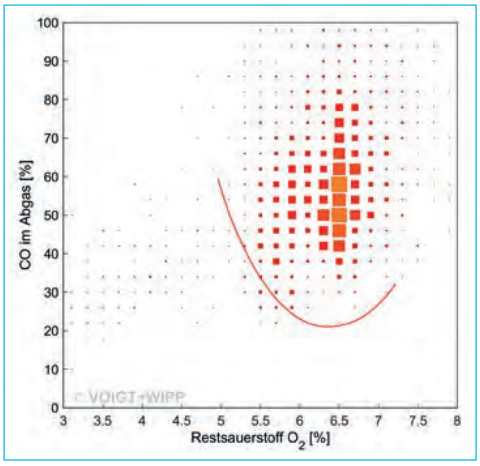

Abb. 9: Restsauerstoff mit EPOC®

7.3. Stabilität

Durch die Erhöhung des Automatisierungsgrads und die Erweiterung der Sensorik und Aktorik normal zur Strömungsrichtung (links – rechts) wurde die Transparenz und Regelbarkeit erhöht. In Kombination mit einer optimierten Regelung konnten damit die Stabilität erhöht und Schwankungen reduziert werden (Abbildung 10).

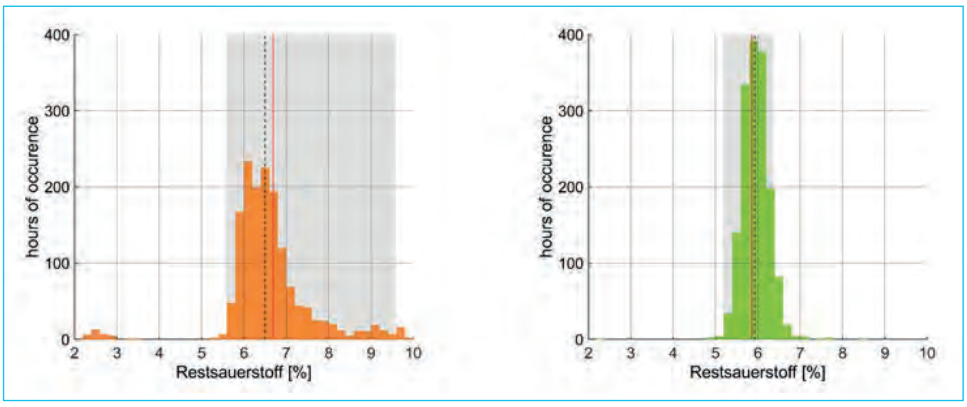

Abb. 10: Statistische Verteilung der Restsauerstoffgehaltes vor (links/orange) und nach (rechts/grün) der EPOC Umsetzung

8. Schlussfolgerungen

Die Verbesserung eines Prozesses ist kein Ereignis, sondern ein Prozess an sich. In dem vorliegenden komplexen EPOC®-Optimierungsprojekt konnten gute Erfolge im Hinblick auf das primäre Ziel der Emissionsreduktion erreicht werden. Es bestätigt sich, dass durch den intertdisziplinären EPOC®-Optimierungsansatz das Anlagen- und Prozessverständnis wesentlich erhöht wurden, das bestehende Erfahrungswissen der Beteiligten standardisiert, zusammengeführt und automatisierungstauglich gemacht wurde, wodurch nicht nur die Anlagensicherheit, sondern auch Verfügbarkeit und Regelbarkeit deutlich erhöht und verbessert wurden. Durch die Erhöhung des Automatisierungsgrads kann das Personal nun effizienter eingesetzt werden und seine Erfahrung und Anlagenkenntnis nun aktiv im weiterführenden Optimierungsprozess einbringen.

Das Projekt zeigt, dass man mit einem ganzheitlichen, interdisziplinären Ansatz neue Möglichkeiten für die Optimierung einer Anlage schafft und durch das starke Einbeziehen der Operatoren ein robustes neues Regelungssystem mit hoher Akzeptanz entsteht.

Unser Beitrag beim KWTK 2017:

Verbrennungsstabilisierung einer KVA durch regelungstechnische Entkopplung, Optimierung der Saugzugregelung und des Brennstoffeintrags

KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLLOQUIUM

Verbrennungsstabilisierung einer KVA durch regelungstechnische Entkopplung, Optimierung der Saugzugregelung und des Brennstoffeintrags

Johannes Unger, Richard Kitzberger, Michael Kupa,
Bernhard Kronberger und Rolf Schumacher

1. Einführung und Problembeschreibung 1
2. Prozessanalyse und Datengenerierung 2
2.1. Verbrennungsanalyse 3
2.2. Druck- und Regelungsanalyse 4
3. Simulationsmodell und Parameteridentifikation der Unterdruckregelung 6
4. Lösungsansatz und Umsetzung 8
5. Ergebnisse und Schlussfolgerungen 10

1. Einführung und Problembeschreibung

In der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) Buchs des Gemeindeverbandes für Kehrichtbeseitigung Region Aarau – Lenzburg in der Schweiz werden zwei beinahe baugleiche Rostfeuerungsanlagen mit einer Leistung von jeweils 36 t/h Frischdampf (40 bar, 400 °C) betrieben und zur Strom- sowie Wärmeproduktion verwendet. Häufige Überdruckspitzen im Feuerraum der Ofenlinie 2 führen dazu, dass Rauchgas in das Kesselhaus austritt und es zu verstärkten Rückbränden aus dem Feuerraum in den Brennstoffschacht kommt. Außerdem kommt es durch die unruhige Verbrennung auch zu starken Leistungsschwankungen sowie Kohlenmonoxid-(CO)-Spitzen, die zum Teil noch in der Reingasmessung feststellbar sind. Diese Gesamtsituation führte dazu, dass GEKAL-KVA Buchs eine Anlagenpotenzialuntersuchung durch VOIGT + WIPP Engineers initiierte. Ziele waren die Identifikation der Mechanismen zur Reduktion der Überdruckspitzen im Feuerraum sowie die Erhebung der entsprechenden Verbesserungspotenziale der Feuerleistungsregelung (FLR) von Linie 2, die auch im Weiteren untersucht wird.

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Beide Ofenlinien wurden vom selben Hersteller errichtet, aber mit unterschiedlichen Feuerungsleistungsregelungen ausgestattet, die für die GEKAL-KVA Buchs als Black-Box fungieren. Die Ofenlinie 1 ist mit einer klassischen Feuerleistungsregelung auf PID-Reglerbasis ausgestattet, während die Ofenlinie 2 eine Fuzzy-Regelung besitzt. Außerdem war bei Ofenlinie 2 im Feuerraum ein Stickstoffoxid-(NO_x)-Reduktionskonzept durch das VLN-Verfahren (Very Low NO_x) installiert, welches zwischenzeitlich von Rauchgasabsaugung aus dem Schlackenabwurfbereich zu Luftabsaugung aus dem Kesselhaus umgebaut wurde. Die Abgasnachbehandlung findet durch E-Filter, HCl- und SO_4-Wäscher sowie durch eine für beide Ofenlinien verwendete SCR-Anlage ($DeNO_x$) statt. Die Unterdruckregelung der beiden Ofenlinien ist deshalb durch den gemeinsamen Saugzugkanal der $DeNO_x$ gekoppelt. Ein separater Saugzugventilator der $DeNO_x$ unterstützt die beiden Saugzugventilatoren der Ofenlinien, bringt aber auch eine eigene Systemdynamik mit sich, die berücksichtigt werden muss. Die Unterdruckregelung ist kein Teil der ausgeführten FLR.

Durch den durch die Rostschlitze fallenden Rostdurchfall kommt es zu Ablagerungen in der Primärverbrennungsluftzuführung, welche mithilfe des sog. *Ausblasens* während des Betriebs gereinigt wird. Dabei wird eine Luftklappe schlagartig geöffnet und durch den Druckstoß werden die Ascheablagerungen pneumatisch ausgetragen. Dadurch kommt es zu einem kurzeitigen Anstieg der Verbrennungsluftmenge und somit zu wechselnden Druckverhältnissen im Feuerraum.

Beide Ofenlinien haben jeweils zwei separat bewegbare Rostbahnen, die jeweils durch hydraulische Einschübe beschickt werden. Ein wesentlicher baulicher Unterschied der Linie 2 gegenüber der Linie 1 ist, dass der Brennstoff über eine erhöhte Abwurfkante auf den Verbrennungsrost befördert wird, wodurch es zu einer stärkeren Überschüttung des Brennbettes kommt. Dadurch ist die durch die zyklische Beschickung induzierte Energiefreisetzung wesentlich höher und führt somit auch zu höheren Druckschwankungen im Feuerraum.

Im Folgenden werden die Identifikation von Ansatzmöglichkeiten, die Datenauswertung, die Analyse und die Modellierung sowie die Simulation des Rauchgasweges im regelungstechnischen Sinn beschrieben. Danach werden das Maßnahmenpaket und die vor-Ort-Umsetzung diskutiert und Endergebnisse präsentiert.

2. Prozessanalyse und Datengenerierung

Die Basis für Potenzialanalysen ist die Auswertung vorhandener Prozessdaten. In diesem Zusammenhang ist die Datenbasis entscheidend. Um die Problematik der Unterdruckschwankungen richtig analysieren zu können, wurden eine Verbrennungsanalyse, eine Druckanalyse sowie eine regelungstechnische Bestandsaufnahme der einzelnen Regelkreise simultan durchgeführt. Als erster Anhaltspunkt dienten die Trenddarstellungen aus der Prozessvisualisierung, um die größten Hebel für einen Lösungsansatz identifizieren zu können. Um die Auswirkungen von händischen Eingriffen auf die Verbrennung zu sehen, wurden Versuche vor Ort gefahren und unmittelbare Auswertungen an der Anlage

durchgeführt. Die für die Verbrennung relevanten Messwerte aus dem Prozessleitsystem wurden mittels eines mobilen Emissionsmessgerätes evaluiert.

2.1. Verbrennungsanalyse

Bei einem Verbrennungsprozess gibt es mehrere Anhaltspunkte, die für eine detaillierte Analyse interessant sind. Zunächst sind dies die Feuerraumtemperaturen in den einzelnen Verbrennungszonen sowie die Temperaturverteilung über das Brennbett. Die Aufgabe der installierten Infrarotkamera (IR-Kamera) ist dabei die Korrektur der Primärluft(PL)menge und -verteilung, abhängig von der Brennbetttemperatur. In der FLR kann zwischen einer händischen Vorgabe (flach, mittel oder steil) oder einer automatischen Vorgabe durch die IR-Kamera gewählt werden. Eine flache Luftverteilung verschiebt die PL-Menge in Richtung der Abwurfkante, während die steile Luftverteilung die Primärluft in Richtung der Trocknungszone verschiebt. Der Einfluss der IR-Kamera bringt jedoch eine deutliche Unruhe zusätzlich zur Beschickung und Rostbewegung in den Feuerraum, weshalb die Kamera für sämtliche Analysen ausgeschwenkt wurde.

Der Druck im Feuerraum stellt die messtechnisch am schnellsten zu erfassende Prozessgröße der Verbrennung dar. Eine Absenkung des Unterdrucksollwerts konnte keine merklichen Veränderungen bewirken, was ein Indiz für eine ausreichende Dichtheit des Feuerraums ist. Eine lokale Undichtheit im Bereich der Beschicker (Abdeckdeckel der Beschickermechanik) kann jedoch einen signifikanten Einfluss haben und darf nicht vernachlässigt werden. Das Flammenbild zeigt lange Flammen, die phasenweise bis in den Strahlungszug durchschlagen. Die verlängerte Verbrennungszone ist eine Folge des durch das VLN-Verfahren reduzierten Sauerstoffüberschusses. Hier erkennt man einen wesentlichen Unterschied zur Ofenlinie 1, bei der die Verbrennung mit der letzten Sekundärluftebene klar erkennbar abgeschlossen ist. Bei Veränderungen der VLN-Gasmengen konnte kein signifikanter Einfluss auf die Druckschwankungen festgestellt werden, obwohl die Flammen visuell kürzer erschienen und die Flammenfront stabiler und schärfer wirkte. Eine markante Beruhigung der Feuerung konnte aber definitiv nicht identifiziert werden.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Unterdruck konnte man bei der Verkürzung des Beschickerhubs von 75 cm auf 50 cm erkennen, wobei eine gewisse Unterdruckunruhe weiterhin bestehen blieb. Beim Versuch, die Beschickung komplett auszusetzen und ausschließlich die Rostbewegung zuzulassen, wurde festgestellt, dass bei jeder Rostbewegung ein Unterdruckanstieg im Feuerraum provoziert wird. Die FLR reagiert dann sehr schnell auf die in der Folge ansteigenden Temperaturen und den parallel ansteigenden Restsauerstoffgehalt im Abgas. Da die Beschicker innerhalb von 25 % der Beschickerzykluszeit 75 % des Beschickerhubs zurücklegen, kommt es damit zur überproportionalen Anregung, die den Druck, den Restsauerstoffgehalt und die CO-Emissionen sowie die thermische Leistung gleichzeitig erhöht (Abbildung 1). Eine eindeutige Erklärung kann dafür aber nicht gegeben werden, da mehrere parallel ablaufende Mechanismen zu den beobachteten Ereignissen führen:

1. Feuerraumunterdruck bricht durch Beschickungshub ein
2. Gleichzeitig kommt es zu erhöhtem PL-Durchsatz durch den Rost, der durch die Rostbewegung ausgelöst ist
3. Anstieg des Restsauerstoffgehalts (lokal und global)
4. Überschüttung von Material beim Einschub
5. Lokaler Verbrennungsluftmangel und damit Anstieg von CO-Emissionen
6. Lokal erhöhte Energiefreisetzung

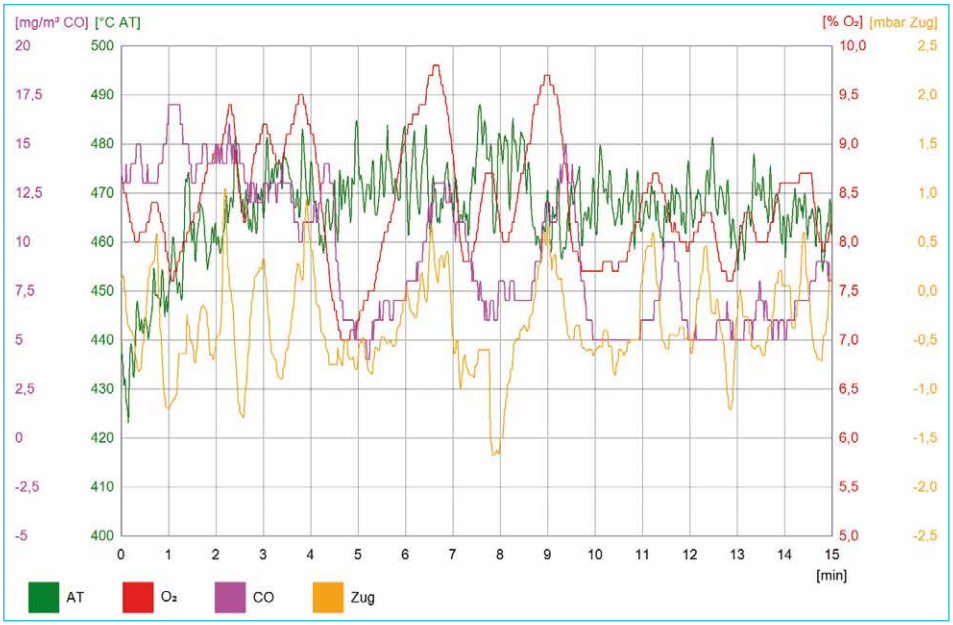

Abb. 1: Emissionsmessung: Gleichzeitiger Anstieg von O_2, CO und Unterdruck im Feuerraum, Beispielbild (AT: Abgastemperatur)

Die Unruhe im Feuerraum wird dadurch gesteigert, dass die Beschickung und die Rostbewegung zum selben Zeitpunkt gestartet werden. Eine kontrollierte Regelung des Feuerraumunterdruckes sowie der Brennbetttemperatur ist dadurch schwierig, da die Unterdruckregelung wesentlich träger ist als die hier beschriebenen Mechanismen. Eine negative Auswirkung auf den Ausbrand durch die Schwankungen der Prozessgrößen konnte nicht festgestellt werden.

2.2. Druck- und Regelungsanalyse

Die Brennbetthöhe kann neben der Beschickung und Rostbewegung als eine signifikante Einflussgröße für Unterdruckspitzen identifiziert werden. Konstruktiv ist eine ca. 60 cm hohe Abwurfkante am Ende des Beschickungshubes umgesetzt, die bei einem niedrigeren Brennbett ebenfalls Einfluss auf den Unterdruck hat. Je niedriger das Brennbett ist, desto kleiner ist der Druckwider-

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

stand über dem Brennbett und desto größer ist der Einfluss der Abwurfkante. Die Brennbetthöhe hat aber gleichzeitig auch Einfluss auf den Ausbrand, wodurch kehrichtabhängig die Brennbetthöhe angepasst werden muss und nicht beliebig eingestellt werden kann. Im Unterdrucksignal ist jeder Hub der Beschicker sowie des Rostes ersichtlich. Durch die starke Schürwirkung des Rostes und der gleichzeitigen Überschüttung des Brennbettes durch die Beschickung kommt es zu einer überproportionalen Energiefreisetzung und somit zu Druck- und CO-Spitzen. Die Verbrennungsreaktion verläuft dabei so schnell, dass eine Kompensation durch die Unterdruckregelung nicht möglich ist.

Zusätzlich zu diesem Ablauf wird beim Ausblasen der Asche aus den Primärluftzuführungskanälen eine spezielle Unruhe in das System gebracht. Der Druckanstieg in der Primärluft verursacht eine höhere Primärluftmenge, die durch den Saugzugventilator abgesaugt werden muss. Ein Versuch, die erhöhte Luftmenge während des Ausblasens durch Reduzieren der Primärluftklappenstellung in der Zone 4 zu neutralisieren, zeigte aufgrund der langsamen Stellgeschwindigkeit der Primärluftklappe nur zum Teil Wirkung.

Das Ausblasen des Rostdurchfalls muss durch die Kopplung zur Linie 1 gesamtheitlich betrachtet werden. Bei Linie 1 ist eine Kompensation durch eine konstante Aufschaltung von 300 U/min auf die Saugzugventilatordrehzahl implementiert, die zu einer Überdruckspitze vor dem $DeNO_x$-Saugzugventilator führt. Aufgrund der nicht kompensierten Kopplung pflanzt sich die Überdruckspitze bis in den Feuerraum von Ofenlinie 2 fort, da ein zeitgerechtes Reagieren der Saugzugregelung von Linie 2 aufgrund der trägen Systemdynamiken nicht schnell genug möglich ist. Bei Linie 2 fällt das Ausblasen aufgrund der starken Unterdruckschwankungen weniger ins Gewicht und ist daher nicht kompensiert. In Abbildung 2 sind die Unterdrücke vor und jeweils nach dem Saugzugventilator sowie die Sollwerte und die Drehzahlen der Ventilatoren dargestellt.

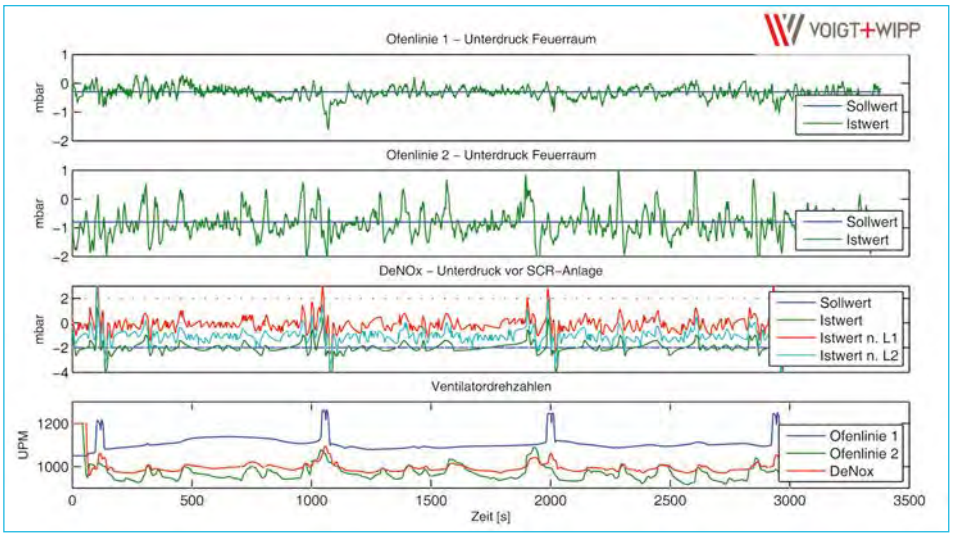

Abb. 2: Unterdrücke der Saugzugregelung

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Ersichtlich ist die konstante Aufschaltung der Drehzahl bei Linie 1 und der wesentlich ruhigere Betrieb im Vergleich zu Linie 2 (Ventilatordrehzahlen der Saugzuggebläse). Linie 1 benötigt nach Abschluss des Ausblasens mehrere Minuten, um auf den Ausgangszustand zurückzukehren und den Sollunterdruck wieder einzustellen. An den Drucksignalen nach den Saugzugventilatoren sieht man die Kopplung des Systems besonders gut, wobei zwischen Linie 2 und DeNO$_x$ eine stärkere Kopplung vorhanden ist als zu Linie 1. Interessant ist, dass trotz der annähernd gleichen Bauweise der Ofenlinien der ruhige Saugzugbetrieb von Linie 1 auch gleichzeitig eine ruhige Unterdruckcharakteristik aufweist, während hingegen dies bei Linie 2 nicht beobachtet werden konnte. Hier ist eindeutig erkennbar, dass die gesamte Feuerung (Feuerraumgestaltung + FLR) von Linie 2 wesentlich unruhiger als von Linie 1 ist.

3. Simulationsmodell und Parameteridentifikation der Unterdruckregelung

Die Unterdruckregelung stellte die Liefergrenze zu den Ofenlinien dar (d. h. der Saugzugventilator war nicht Teil des Lieferumfangs des Feuerungslieferanten) und wurde somit nicht gesamtheitlich mit den Zusammenhängen der FLR betrachtet. Naheliegend bietet sich an, die Saugzugregelung entsprechend der FLR-Erfordernisse zu optimieren und zu entkoppeln. Dazu wurde ein vereinfachtes Simulationsmodell aufgebaut, das die Abhängigkeiten zwischen den Drücken hinreichend gut abbildet. Unterschiedliche Szenarien zur Entkopplung konnten so vorab untersucht werden und eine bessere Einsicht in das System geben.

Als Simulationssoftware wurde MATLAB/Simulink verwendet, wobei für die Simulation Prozessdaten in einem äquidistanten Format benötigt werden. Da die Prozessdaten im Prozessleitsystem nur bei einer eingestellten Signalwertänderung gespeichert werden, mussten die Daten durch Filter interpoliert und zu äquidistanten Messreihen aufbereitet werden. Dadurch wird eine exakte Parameteridentifikation – trotz ausreichend hoher Auflösung – schwierig, da die Filterparameter in den Prozessparametern stets mitrepräsentiert sind.

Basierend auf den bearbeiteten Daten konnten die Zeitkonstanten im System abgeschätzt werden. Eine direkte Parameteridentifikation war aber in diesem Fall nicht zweckmäßig, da ausschließlich Daten aus dem geregelten Betrieb vorhanden waren. Damit hätte eine *geschlossene Regelkreisidentifikation (closed loop identification)* zur Kompensation der Reglereinflüsse mit allen Vor- und Nachteilen durchgeführt werden müssen. Eine wesentliche Schwierigkeit bei der closed loop identification ist die Schätzung des *Rauschmodells*, das im Wesentlichen dem Regler des Regelkreises samt Prozessstörungen entsprechen sollte. Die abgeschätzten Zeitkonstanten wurden dann durch einen Validierungsdatensatz überprüft. In Abbildung 3 ist eine schematische Übersicht des Simulationsmodells dargestellt.

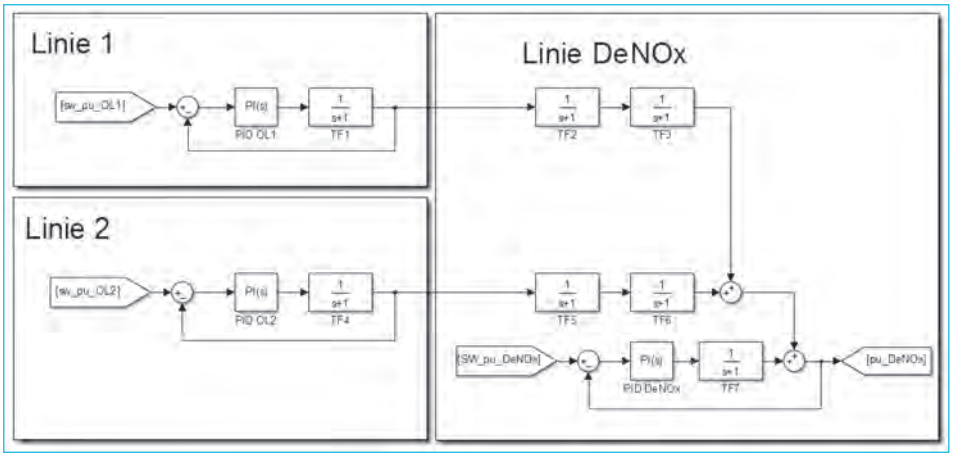

Abb. 3: Schematische Übersicht des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wurde mit drei Modulen (Linie 1, Linie 2 und $DeNO_x$) aufgebaut, die jeweils den Unterdruck der Feuerräume sowie den vor der SCR-Anlage simulieren. Die Module von Linie 1 und Linie 2 wirken auf das Modul $DeNO_x$ und bestehen jeweils aus einem Regelkreis zur Regelung des Unterdrucks. Als Stellgrößen werden die Saugzugventilatordrehzahlen vorgegeben und als Reglerstruktur werden PI-Regler verwendet, die mit den implementierten Anlagenparametern eingestellt sind.

Im Zuge der Identifikation der Modellparameter hat sich herausgestellt, dass der Einfluss auf den Unterdruck der jeweils anderen Ofenlinie in den verfügbaren Prozessdaten kaum quantifizierbar und nur der $DeNO_x$-Druck relevant ist. Außerdem haben im normalen Regelbetrieb die Druckspitzen beim $DeNO_x$ nur einen geringfügigen Einfluss auf den Feuerraumdruck. Bei Aufschaltungen auf den Saugzugventilator (Linie 1) oder starken Störungen des DeNOx wirken sich die Druckspitzen aber auf den Feuerraumdruck aus. Deshalb wurde in der Simulation auf die direkten Rückkopplungen zwischen Linie 1 und 2 verzichtet und die identifizierten Dynamiken auf den $DeNO_x$-Unterdruck nur in den Übertragungsfunktionen TF2/TF3 bzw. TF5/TF6 (Abbildung 3) berücksichtigt.

Reale Messdaten wurden als Störgrößen aufgeschaltet, um das reale Verhalten abzubilden. In Abbildung 4 sind die Simulationsergebnisse dargestellt, in denen eine optimierte Reglerparameterkonfiguration mit der bestehenden Konfiguration verglichen wird. Erkennbar ist, dass die Spitzen der Störungen nur geringfügig durch reine Regelung kompensiert werden können. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die Parametrierung der Regler bereits sehr gut ist und erst durch Strukturänderungen (z. B. Vorsteuerungen etc.) merkbare Verbesserungen erzielt werden können. Die regelmäßigen großen Störungsspitzen werden durch das Ausblasen und die entsprechenden Aufschaltungen der Drehzahl verursacht.

Johannes Unger, Richard Kitzberger, Michael Kupa, Bernhard Kronberger, Rolf Schumacher

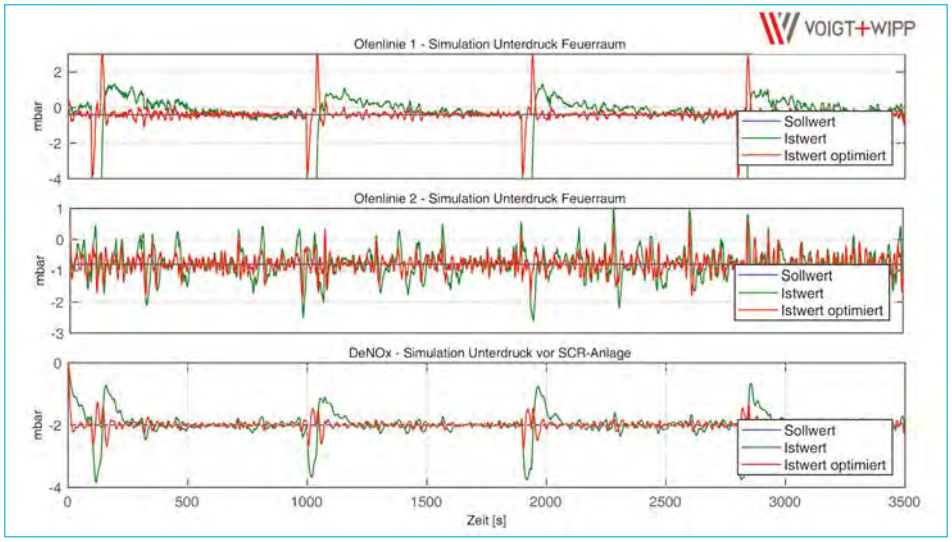

Abb. 4: Simulationsergebnisse: Vergleich der Regelgüte zwischen den bestehenden und den optimierten Reglerparametern

Mit den Erkenntnissen der Simulation wurde in der finalen Reglerstruktur eine Vorsteuerung des Reglerausgangs der Unterdruckregelung von Linie 2 auf den $DeNO_x$-Saugzugventilator vorgesehen. Die normalbetrieblichen Schwankungen können so besser kompensiert werden, ohne durch die Dynamik der Ventilatoren beschränkt zu sein. Da Linie 1 praktisch kaum Regelaktivität zeigt, wurde ausschließlich beim Ausblasen von Linie 1 eine Aufschaltung auf den $DeNO_x$-Saugzugventilator implementiert.

Erkennbar ist, dass durch die gewählte Struktur keine wesentlichen Änderungen in den Reglerparametern erforderlich waren, die Regelgenauigkeit, Robustheit und Dynamik der Regelung aber verstärkt wurden. Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Reglerparametrierung bereits sehr gut eingestellt war, die Regeldynamik durch die zusätzlichen Aufschaltungen aber noch verbessert werden konnte.

4. Lösungsansatz und Umsetzung

Die Erkenntnisse aus der Analysephase wurden mit dem Feuerungshersteller erörtert und ein entsprechendes Maßnahmenpaket wurde aufgesetzt. Da die Einsicht und direkte Umsetzung in die bestehende FLR für VOIGT + WIPP nicht möglich war, musste der Weg über den Feuerungshersteller gegangen werden.

Als erste Maßnahme wurde die IR-Kamera programmtechnisch deaktiviert, sodass sie eine reine Informationsquelle für die Operatoren darstellt. Durch den Wegfall der IR-Kamera wurde auch die automatisierte Umstellung der Luftverteilung deaktiviert und diese Funktion den Operatoren übergeben. Eine flachere Einstellung der Luftverteilung hatte in den Versuchen eine positive

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Verbrennungsstabilisierung einer KVA

Auswirkung auf die Brennbetthöhe bei der Beschickung, womit der Einfluss der Abwurfkantenhöhe reduziert wurde.

Die Beschickung wurde programmtechnisch so entkoppelt, dass der Beschicker und die Rostbewegung unabhängig voneinander angesteuert werden können. Die Rostbewegung wurde vom zyklischen Betrieb gemeinsam mit dem Beschicker zu einem Dauerbetrieb mit Geschwindigkeitsänderung umgestellt, wobei die Rostbewegung durch die Vorgabe einer Versatzzeit vor der eigentlichen Beschickung erhöht wird. Damit wird eine gestaffelte Energiefreisetzung erzielt, die die Unterdruckschwankungen reduziert. Als weiteres Detail wurde die Rostbewegungsgeschwindigkeit variabel durch eine Rampe mit einstellbarer Steigung (Softanlauf) programmiert, sodass die Schürwirkung über den gesamten Hub gleichmäßig ausfällt.

Die Hauptverbesserung für die Unterbindung der Überdruckspitzen wurde durch eine zusätzliche Fuzzy-Regel erreicht, welche den Einschubvorgang bei Erreichen eines Unterdruckanstiegs bis zu einem Wert von -0.3 mbar unterbricht. Somit reagiert die FLR wesentlich schneller auf wechselnde Verbrennungsverhältnisse im Feuerraum als in der Vergangenheit, als nur die Feuerraumtemperatur einen Einfluss auf die Beschickung hatte. Ein weiterer positiver Effekt ist, dass der Gesamthub in mehrere kleine Hübe aufgeteilt und somit eine signifikante Beruhigung des Unterdrucks erreicht wird.

Das umgesetzte Maßnahmenpaket ergibt sich zusammengefasst wie folgt:

1. Deaktivierung des Einflusses der IR-Kamera
2. Entkopplung von Rostbewegung und Beschicker
3. Versatzzeit zwischen Rostbewegung und Beschicker
4. Softanlauf für Rostbewegung
5. Beschickerunterbrechung bei Überschreitung eines Unterdruckgrenzwertes
6. Anpassung der Luftverteilung in der Primärverbrennungszone (flachere Einstellung)
7. Entkopplung der Unterdruckregelung

a) Aufschaltung DeNO$_x$ beim Ausblasen von Linie 1

b) Vorsteuerung DeNO$_x$ mit Stellsignal des Saugzugventilators von Linie 2

c) Kompensation des Ausblasens von Linie 2 durch Öffnen von PL-Klappen

d) Reglertuning

Das Maßnahmenpaket wurde innerhalb einer Woche vor Ort gemeinsam mit dem Feuerungshersteller sowie den Operatoren der GEKAL-KVA Buchs durchgeführt.

Die Herausforderung bei Implementierungen in bestehende Systeme ist die Auswirkung auf das restliche System. Da die Beschickersteuerung in der Bestandsautomatisierung programmiert wurde, die Sollwertvorgabe aber aus der FLR kam, war unklar, ob Eingriffe in die Sequenz zu Störungen in der FLR führen würden.

Während der Umsetzungsphase wurden alle Regelkreise kontrolliert, die Parametrierung auf Plausibilität geprüft und gegebenenfalls an die neuen Gegebenheiten angepasst. Die Umsetzung der Unterdruckregelung erfolgte wie im vorigen Kapitel beschrieben. Ein Reglertuning wurde simultan zu den restlichen Maßnahmen durchgeführt. Das Simulationsmodell wurde dabei zur Überprüfung jeder Einstellung herangezogen.

5. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im direkten Vergleich der Zustände vor und nach der Optimierung erkennt man die Verbesserung durch die umgesetzten Maßnahmen sehr klar: In Abbildung 5 sieht man beim eingezeichneten Zeitpunkt die Fortsetzung der Beschickung, obwohl der Unterdruck bereits in den positiven Bereich geht.

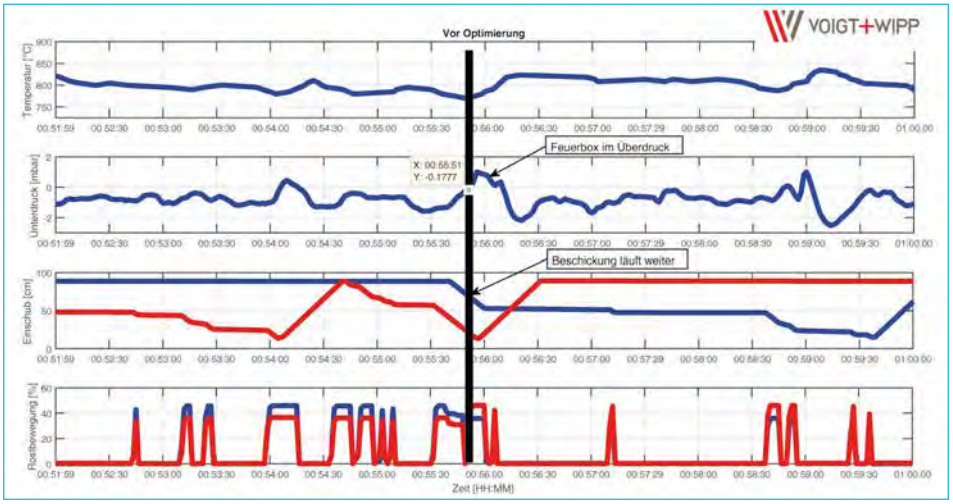

Abb. 5: Temperatur Strahlungszug und Unterdruck bei der Beschickung vor der Optimierung
Legende: Rot/Blau Rostbahn 1/2

Die Abbildung 6 zeigt die Beschickerhübe, Rostbewegungen und den Unterdruck. Eingezeichnet sind die Datenpunkte, an denen die Beschickung durch das Maßnahmenpaket unterbrochen und dadurch der maximale Unterdruck bei ca. -0.3 mbar begrenzt wird. Obwohl es weiterhin zu Unterdruckschwankungen kommt, wurde der wesentliche Erfolg bei der Umsetzung der Maßnahmen durch die Unterbrechung der Beschickung beim Erreichen einer Unterdruckgrenze erzielt. Ein Überschreiten der 0 mbar-Grenze wird systematisch verhindert.

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Verbrennungsstabilisierung einer KVA

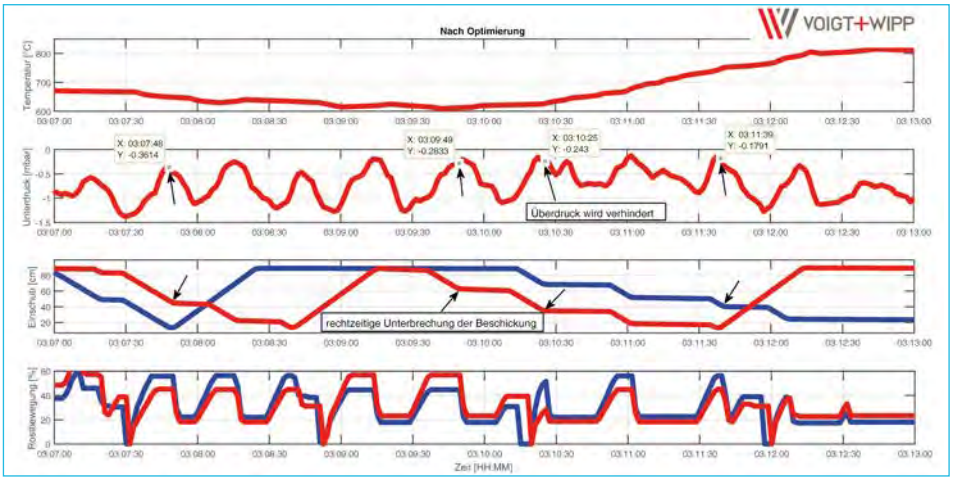

Abb. 6: Temperatur und Unterdruck bei der Beschickung vor der Optimierung Legende: Rot/Blau Rostbahn 1/2

Die Auswirkung der frühzeitigeren Beschickerunterbrechung auf die Kesselleistung bei einem sehr niedrigen Heizwert des Kehrichts konnten zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme nicht überprüft werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Unterdruckschwankungen bei einem sehr niedrigen Heizwert des Kehrichts ebenfalls geringer ausfallen und es durch die Änderungen in der FLR zu keinen Einschränkungen kommt.

Zusammengefasst ist das Hauptergebnis eine signifikante Reduktion des Rauchgasaustritts in das Kesselhaus und eine dadurch wiederhergestellte Kundenzufriedenheit. Anhand der Auswertung der Prozessdaten ist eine signifikante Reduktion der Überdruckspitzen sowie der Feuerraumtemperatur auch sichtbar darstellbar (Abbildung 7). Die Anzahl der Überdruckspitzen in einer 15-minütigen Periode konnte im Vergleich der Zustände vor und nach der Optimierung um ca. 75 % gesenkt werden, während sich die Standardabweichung im selben Zeitabschnitt um über 20 % reduzierte. Die Standardabweichung der Feuerraumtemperatur konnte ebenfalls um ca. 4 % gesenkt werden.

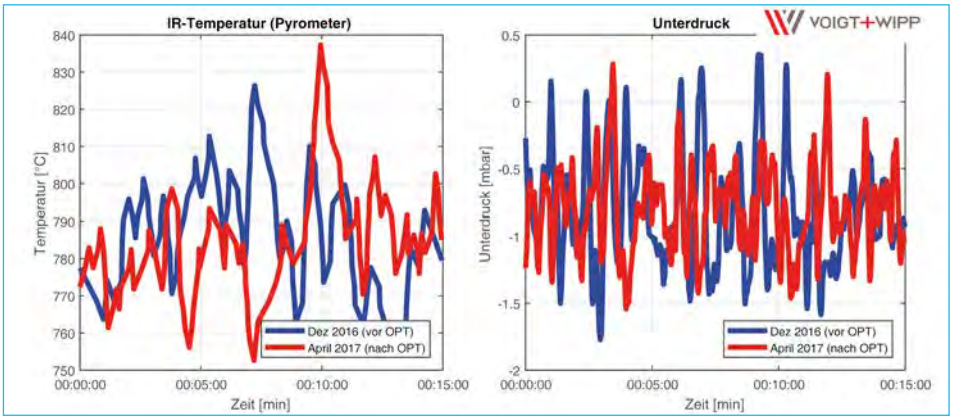

Abb. 7: Darstellung direkter Vergleich der Temperaturen des Strahlungszugs und des Unterdrucks

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Johannes Unger, Richard Kitzberger, Michael Kupa, Bernhard Kronberger, Rolf Schumacher

Einen wesentlichen positiven Effekt hat die Beruhigung der Beschickung auch auf die CO-Spitzen, die über weite Strecken ebenfalls reduziert wurden. Weiteres Optimierungspotenzial liegt noch in der fortführenden Vergleichmäßigung der Feuerleistungsregelung, wobei grundsätzlich der Aufwand für zusätzliche Erfolge durch jedes Optimierungsprojekt größer wird, die sichtbaren Erfolge allerdings immer kleiner werden.

conenga group

Unser Beitrag beim KWTK 2016:

Sichere Einhaltung der NO_x-Emissionen eines sekundärbrennstoffbefeuerten 48,4 MW_{BWL} ZWS-Kessels durch regelungstechnische Primärmaß-nahmen in einer übergeordneten Advanced Process Control (APC) Lösung.

2024
2020
2017
2016

KWTK
KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLLOQUIUM

Sichere Einhaltung der NO_X-Emissionen eines sekundärbrennstoffbefeuerten 48,4 MW_{BWL} ZWS-Kessels durch regelungstechnische Primärmaßnahmen in einer übergeordneten Advanced Process Control (APC) Lösung.

Johannes Unger, Bernhard Kronberger und Thomas Strauss

1. Einleitung und Motivation 37
2. Systembeschreibung 38
3. Systemanalyse 39
4. Datenanalyse und Datenauswertung 40
5. Konzeptentwicklung, Optimierung und Umsetzung 43
6. Ergebnisse 46
7. Schlussfolgerungen 48

1. Einleitung und Motivation

Eine sichere Einhaltung der gesetzlichen Emissionsgrenzwerte für Stickstoffoxid (NO_x) ist speziell bei einer behördlichen Grenzwertsenkung oftmals schwierig und erfordert größere Investitionen, da Anlagen nicht für die neuen Grenzwerte ausgelegt bzw. parametriert wurden. SNCR-(selektive nicht-katalytische Reduktion) Systeme ermöglichen die Reduktion von NO_x-Emissionen, sind jedoch mit hohen Investitionen und laufenden Betriebskosten für Harnstoff verbunden.

Die Optimierung einer Anlage unter verfahrenstechnischen als auch regelungstechnischen Blickpunkten bietet einen Ansatz, auch ältere Anlagen auf dem neuesten Stand der Technik zu halten. Außerdem kann die Auslastung maximiert werden, während gesetzliche Grenzwerte weiterhin erfüllt werden können. Ein stabiler Betrieb und die Vermeidung von Schwankungen können zusätzliche Ziele für Optimierungsprojekte darstellen, da Schwankungen meistens auch Ursache für erhöhte Emissionswerte bei Verbrennungsenergieanlagen sind. Dies gilt speziell, wenn die systemtechnischen Kopplungen im Regelkonzept nicht richtig berücksichtigt bzw. parametriert sind. Dies sind Bereiche in denen die VOIGT + WIPP Engineers GmbH tätig ist und sich Fachwissen angeeignet hat.

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Johannes Unger, Bernhard Kronberger, Thomas Strauss

Die EEVG (Entsorgungs- und Energieverwertungsgesellschaft m.b.H.) am Standort der Papierfabrik/Sägewerk UPM Kymmene Austria GmbH betreibt einen sekundärbrennstoffbefeuerten, zirkulierenden Wirbelschichtkessel (ZWSK), für den die behördlichen NO_x-Grenzwerte kürzlich um mehr als 10 % von 200 auf 179 mg/Nm³ gesenkt wurden. Im Zuge dieser Reduktion der gesetzlichen NO_x-Emissionsgrenzwerte wurde ein Optimierungsprojekt mit der VOIGT + WIPP Engineers GmbH initiiert, um durch ausschließliche Anwendung von Advanced Process Control (APC) in Kombination mit konsequenter Umsetzung von anlagentechnisch möglichen Primärmaßnahmen (d. h. Maßnahmen, die ausschließlich an vorhandenen Freiheitsgraden ohne bauliche oder systemtechnische Änderungen orientiert sind) die Emissionsgrenzwerte einhalten zu können.

In diesem Praxisbeitrag sollen Analyse, Konzeptionierung, Umsetzung und Ergebnisse genauer diskutiert und präsentiert werden. Im Folgenden wird zuerst das System beschrieben, bevor auf System- und Datenanalyse eingegangen wird. Anschließend werden die umgesetzten Maßnahmen beschrieben und die Ergebnisse präsentiert. Am Ende schließt der Beitrag mit einer Schlussfolgerung zur Umsetzbarkeit des Konzeptes bei anderen Anlagen.

2. Systembeschreibung

Der zirkulierende Wirbelschichtkessel der EEVG hat eine Gesamtbrennstoffwärmeleistung von 48,4 MW_{BWL} und besteht aus sechs ECO-Bündeln, zwei Überhitzern und zwei Verdampfern, die für die Produktion und Überhitzung des Frischdampfes (84 bar, 480 °C) zuständig sind. Vier Wärmetauscher heizen Primär- und Sekundärluft vor. Als Brennstoffe werden unterschiedliche Schlämme aus dem Deinking-Prozess und der Wasseraufbereitung (Kläranlage) sowie Altholz und Rinde als Stützbrennstoff verbrannt. Die Einbringung des Brennstoffes erfolgt durch Zuführschnecken und Schleusenräder von einem Vorlagebehälter, der auch die Aufgabe der Brennstoffvormischung übernimmt. Die Totzeit des Beschickungssystems bei signifikanten Brennstoffänderungen beträgt bis zu 25 Minuten. Gas kann zum Anfahren oder bei Anlagenausfällen zusätzlich verfeuert werden. Die Rauchgasreinigung wird durch einen Schlauchfilter mit Additiveindüsung bewerkstelligt, der die feinen Staubpartikel abscheidet und als limitierender Faktor für die maximale Betriebstemperatur am Kesselaustritt wirkt. Rußbläser säubern die Rohrbündel im Inneren des Kessels mit Dampf. Sekundärluft wird auf drei Ebenen eingeblasen, wobei Rauchgas durch Rezirkulation (Rezi) zur Sekundärluft als auch Primärluft aufgeteilt werden kann. Die Dampfturbine verstromt den überschüssigen Dampf, der von den Papiermaschinen als Prozessdampf nicht benötigt wird. Das System ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

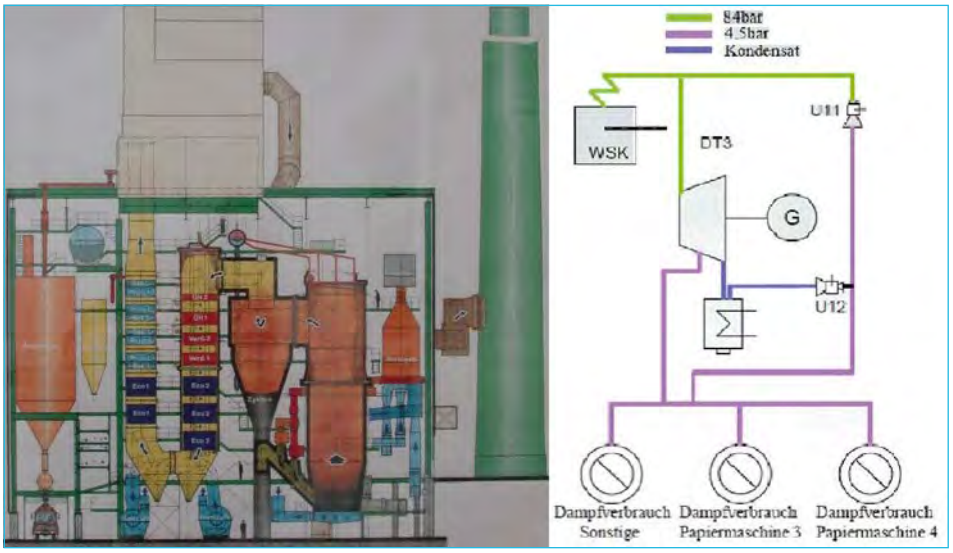

Abb. 1: Schema des zirkulierenden Wirbelschichtkessels (links) mit vereinfachter Übersicht des Dampfnetzes (rechts)

Die Basisautomatisierung ist mit einer Valmet Damatic XD umgesetzt, wobei als Auslastungsregelung ein modellprädiktiver Regler (MPC) von AutomationX (EposC) als übergeordnetes System die Sollwerte für die Bestandsautomatisierung übergibt. Die Anbindung wurde über eine OPC Schnittstelle zwischen den beiden Systemen umgesetzt. Das Regelungskonzept sieht vor, dass die Frischdampfmenge geregelt wird, wobei Temperatur- und Druckgrenzen die mögliche Auslastung beschränken. Der MPC übernimmt in dieser Konfiguration die Vorgabe der Solldampfmenge, die durch die Bestandsautomatisierung umgesetzt wird. Die Wirbelbetttemperaturregelung des ZWSK wird durch die Rezirkulationsgasmenge geregelt, die ebenfalls vom MPC übergeben wird. Anlagengrenzwerte (mit Ausnahme der Rauchgastemperatur vor dem Schlauchfilter) werden bei Erreichung durch eine stufenförmige Reduktion der Frischdampfsollvorgabe berücksichtigt. Die Messung des Restsauerstoffgehalts erfolgt mittels Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsonden im ersten Zug zwischen Verdampfer und ECO. Durch die brennstoffbedingte, feine und große Menge an Flugasche des ZWSK ist der Verschmutzungsgrad im Kessel sehr hoch und erfordert die häufig wiederkehrende Abreinigung der Sauerstoffsonden und die permanente Aktivierung von Rußbläsern zur Sauberhaltung der Heizflächen. Aufbauend auf der beschriebenen Anlage wird im Folgenden die Systemanalyse behandelt.

3. Systemanalyse

Das Betriebsziel ist die Maximierung der Schlammverbrennung, wobei die Dampfmenge mit minimalem Stützbrennstoffaufwand möglichst hoch gehalten werden soll. Anhand der energetischen Betrachtung ist die Anlage bereits sehr

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

gut betrieben, wobei das Gesamtsystem durch den nassen Schlamm und dessen weitreichende Folgen stark beeinflusst ist. Das Ziel der Systemanalyse bezieht sich deshalb auf die Identifikation der möglichen Ansatzpunkte, die eine Förderung der Gleichmäßigkeit des Betriebs und die Reduktion der NO_x-Emissionen ermöglichen, den Gesamtwirkungsgrad aber nicht verringern.

Als Erstes wurden die Temperaturmessungen und Restsauerstoffsonden untersucht, die sehr schnell anbacken und verschmutzen. Gerade letztere müssen regelmäßig bereits nach mehreren Stunden gereinigt werden, da sie andernfalls verfälschte Werte liefern. Zusätzlich begünstigen Temperaturspitzen im Feuerraum das *Zuwachsen* des Wirbelbettes an der Brennraumwand (Bettagglomeration). Die Heizwerte des Brennstoffes sind sehr variabel und Brennstofflöcher in der Brennstoffförderung verursachen starke Schwankungen im Kesselbetrieb und Restsauerstoffgehalt. Eine akkurate Messung des Restsauerstoffgehaltes und der Wirbelbetttemperatur ist daher für eine saubere Regelung zwingend erforderlich.

Die Verteilung der Energieübertragung zwischen Strahlungsteil und Konvektionsteil des Kessels stand ebenfalls im Fokus der Systemanalyse. Durch die Verschiebung der Energieabgabe in den Strahlungsteil kann der Kessel mit niedrigeren Wirbelbetttemperaturen betrieben werden, ohne dabei die Gesamtleistung oder die Temperaturgrenzwerte am Kesselausgang zu gefährden.

In der Programmierung der Bestandsautomatisierung wurde festgestellt, dass der Komplexitätsgrad durch gewachsene Ergänzungen erhöht und dadurch eine sehr unübersichtliche Struktur vorhanden ist. Fast alle relevanten Regelkreise sind mit Vorsteuerungen anderer Regelkreise verbunden, werden aber nur teilweise aktiv verwendet. Das Tuning solcher Regelkreise ist gerade bei sich verändernden Anlagenparametern (z. B. Verschmutzung) nur sehr schwierig mit vertretbarem Zeitaufwand zu bewerkstelligen. Im speziellen Fall werden Vorsteuerungen für die Feuerleistungsregelung, Primär- und Sekundärluftregelung veranlasst. Jedoch wird keine Vorsteuerung auf die Wirbelbetttemperaturregelung und Restsauerstoffregelung verwendet. Sicherheitsrelevante Systemteile sind ausschließlich in der Bestandsautomatisierung Damatic XD implementiert und überwachen den Betrieb autark. Jegliche Eingriffe in die Regelung müssen sorgfältig geprüft und abgestimmt werden, um Systemausfälle zu vermeiden.

Die gegenseitige Beeinflussung der Regelkreise stellt einen Hauptgrund für den unruhigen Anlagenbetrieb dar, wobei sehr schwer identifizierbar ist, welches Signal Auslöser für die Schwingungsanregung ist. Die unruhige Einbringung des Brennstoffes konnte als Hauptursache für die NO_x-Bildung mitverantwortlich gemacht werden, eine direkte Zuordnung der Ursache war durch die Systemanalyse aber nicht eindeutig möglich.

4. Datenanalyse und Datenauswertung

Der verfügbare Datenlogger ermöglichte die Analyse und Auswertung von historischen Daten. Der Hauptfokus liegt hierbei auf der Förderung der Gleichmäßigkeit des Kesselbetriebs. Die Systemanalyse konnte zwar die programmtechnischen Zusammenhänge, jedoch nicht zwingend die prozesstechnischen

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

Zusammenhänge deutlich machen. Erst die Kombination beider Analysen kann die Wurzeln für Emissionen und die Anregungen des Systems aufzeigen. Auf diesen Analysen wurden Versuche und die Demonstration der weiteren Umsetzungskonzepte bzw. -ansätze aufgebaut.

In Bezug auf die NO_x-Emissionen wurden aufbauend auf theoretisches, verfahrenstechnisches Wissen, dass bei VOIGT + WIPP durch Branchenexperten vorhanden ist und durch Forschungsprojekte weiter untermauert wird, gezielte einzelne Versuche gefahren, um ausschlaggebende Aspekte der NO_x-Bildung am Wirbelschichtkessel erkennen zu können. Im Handbetrieb einzelner Regler wurde die Systemantwort aufgezeichnet und diente als erste Grundlage für die Datenanalyse. Abbildung 2 zeigt den Einfluss der Brennstoffmenge und der Rußblasdampfmenge auf die Frischdampfmenge. Das Verhalten der Frischdampfmenge ändert sich signifikant bei konstanter Brennstoffmenge, wobei die Grundschwingung gleich bleibt. Ausgehend von dieser Information konnte die Zeitkonstante der Schwingung auf den Rußblaszyklus zurückgeführt werden, der direkt auf die gemessene Frischdampfmenge wirkt. Da die Frischdampfmessung ungefiltert auf den Frischdampfmengenregler wirkt, resultiert im ursprünglichen Zustand des ZWSK eine Standardabweichung von 4,2 % der eingebrachten Brennstoffmenge.

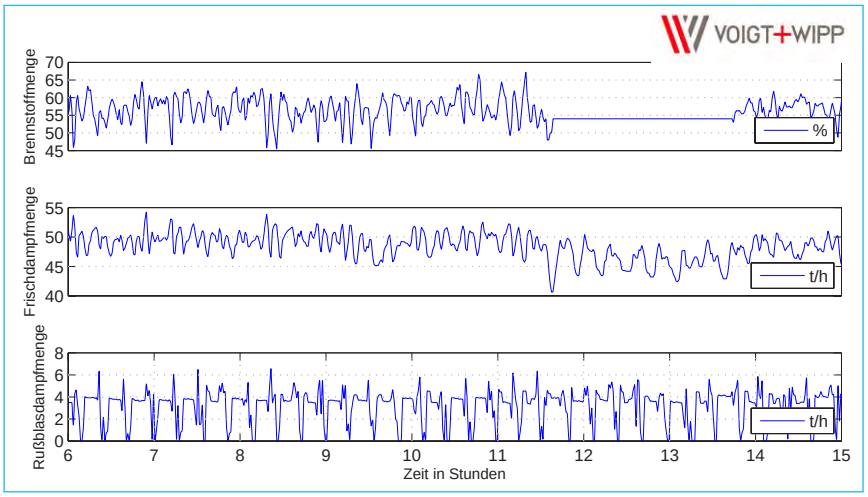

Abb. 2: Versuch Brennstofflinien im Handbetrieb

In Abbildung 3 ist der Einfluss der Brennstoffeinbringung auf die Unterdruckregelung vor dem Saugzuggebläse dargestellt. Erkenntlich ist, dass durch die konstante Einbringung des Brennstoffes die Schwingungen massiv reduziert werden. Dies kann auf die konstantere Wassermenge zurückgeführt werden, die durch den nassen Schlamm in die Brennkammer eingeführt wird. Dieser Effekt des schlagartigen Verdampfens des Wassers im Schlamm bei Brennstoffspitzen wird durch eine ruhigere Brennstoffeinbringung in die Brennkammer minimiert.

Ein wesentlicher Einfluss auf die Emissionen wird auch durch die Wirbelbetttemperaturen verursacht. In den Daten war ersichtlich, dass die Betttemperatur

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

sehr stark variiert und eine Beruhigung wesentlich zum Einhalten der Emissionen beitragen kann. Die Wirbelbetttemperaturregelung ist jedoch von den Temperaturmessungen abhängig und reagiert aufgrund der großen Masse des Wirbelbettes nur sehr träge. Eine vitale Messung ist aus diesem Grund wichtig, wobei immer eine Mittelung mehrerer Messungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Gesamtmessung verwendet wird. Die Mittelung im konkreten Beispiel ist unabhängig von der Vitalität der Messungen umgesetzt und wird aus den drei mittleren von insgesamt fünf Temperaturen gebildet. Da gegen Ende der Reisezeit eines Kessels die Temperaturmessungen anbacken und dadurch kühlere und weniger dynamische Messwerte liefern, verfälscht dieser Ansatz die reale Temperatur im Wirbelbett. Zusätzlich kommt es zu einem vermehrten Auseinanderdriften der Messwerte. Zu kühle Messwerte erwirken ein Anheben der realen Wirbelbetttemperatur, die schon bei einem Unterschied von 10 °C zu deutlich höheren NO_x-Emissionen führt. In Abbildung 4 (oben) sind die vorhandenen Wirbelbetttemperaturmessungen dargestellt. Ersichtlich ist, dass die blaue und die nachfolgende grüne Messung, die jeweils lebendigsten und am wenigsten angebackenen Messungen zu sein scheinen. Die Standardabweichungen der einzelnen Temperaturmessungen konnten zu 11 °C (blau), 8,6 °C (grün) und 5 bis 6 °C (alle anderen Messungen) errechnet werden. Die Vermutung von Anbackungen wurde beim nächsten Revisionstermin bestätigt.

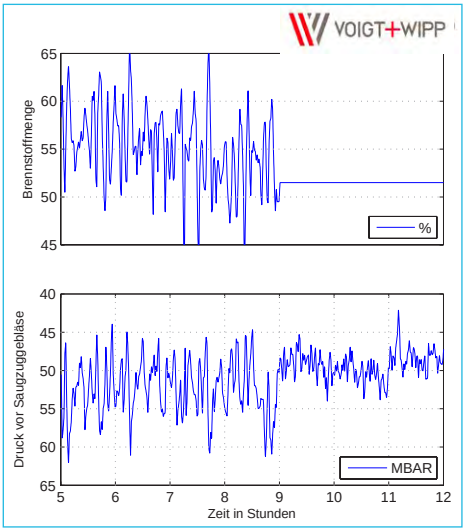

Abb. 3:
Auswirkungen Handbetrieb der Brennstoffmenge auf Druck vor Saugzuggebläse

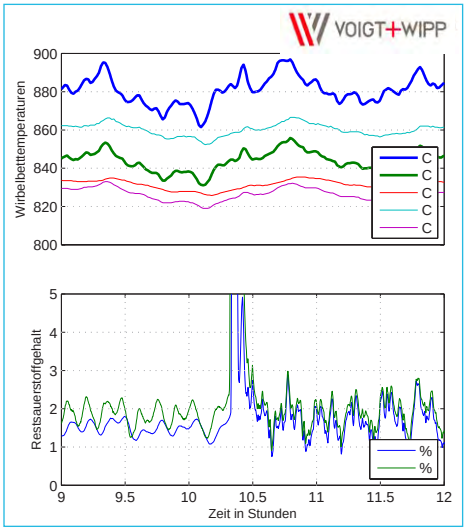

Abb. 4:
Oben: Wirbelbetttemperaturen
Unten: Restsauerstoffgehalt (feucht)

In Abbildung 4 (unten) sind die Restsauerstoffgehaltmessungen vor und nach Reinigung dargestellt. Die Dynamik der Messungen ist im schmutzigen Zustand signifikant langsamer und ungenauer als im gesäuberten Zustand. Da der Restsauerstoff aber auch relevant für die Kesselsicherheit ist und der Kessel bereits

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

bei einem Restsauerstoffgehalt von 1,8 vol-% (feucht) betrieben wird, ist einfach nachvollziehbar, dass die Regelqualität der Sekundärluft ein kritischer Punkt bei einer Optimierung ist und Abweichungen im verschmutzten Zustand nur sehr schwer zeitgerecht ausgeregelt werden können.

Gegen Ende der Reisezeit des ZWSK kommt es zusätzlich zu dem Effekt, dass die Unterdruckgrenze vor dem Saugzuggebläse erreicht wird. Im übergeordneten MPC ist implementiert, dass die Erreichung eines Grenzwertes, der nicht durch das MPC-Modell abgebildet ist, durch eine stufenförmige Reduktion des Sollwertes für die Frischdampfmenge berücksichtigt wird. Diese stufenförmige Sollwertreduktion initiiert einen Restsauerstoffüberschuss im Wirbelbett, der in weiterer Folge die Bildung von NO_x auslöst.

Außerdem wurden Versuche gefahren, die an dieser Stelle erwähnt, aber nicht weiter diskutiert werden sollen:

- Verschiebung der Sekundärluft auf unterschiedliche Einblasebenen
- Variation des Verhältnisses der Rezirkulationsgasmenge zwischen Primär- und Sekundärluft

Grundsätzlich sind Datenauswertungen mit stark schwingenden Prozessen nicht trivial, da im stark angeregten System die verfahrenstechnischen Zusammenhänge nicht gleich erkennbar sind und erst in einer detaillierten Betrachtung identifiziert werden müssen. Schwierigkeiten sind dabei auch oft die Qualität der Daten, deren Aufbereitung oft einen Großteil der Zeit und fachliches Wissen benötigt.

5. Konzeptentwicklung, Optimierung und Umsetzung

Im vorgestellten Projekt wurden im Vorfeld Garantiewerte basierend auf Vorversuchen ermittelt und abgegeben, die unter anderem die Einhaltung der NO_x-Emissionen beinhalteten. Die Konzeptentwicklung war auf der Minimierung der Einflüsse auf NO_x-Emissionen fokussiert und sollte sicherstellen, dass behördliche Grenzwerte nicht überschritten und die Garantiewerte sicher eingehalten werden.

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, ist der Einfluss auf die Emissionen auf viele kleinere Gründe zurückzuführen. Eine Optimierung stellt ein sowohl verfahrenstechnisch als auch regelungstechnisch aufeinander abgestimmtes Maßnahmenpaket dar. Ein wesentlicher Punkt der dabei berücksichtigt werden muss, ist der Einfluss der Operatoren. Operatoreingriffe auf Sollwerte erzeugen oftmals Reaktionen und Schwingungen, die nicht direkt erkennbar, zuordenbar oder sogar bewusst sind. Als Beispiel ist die Wirbelbetttemperatur zu nennen. Durch eine Sollwertänderung kann die Temperatur des Wirbelbetts unmittelbar verändert werden, die nachfolgenden Reaktionen auf Emissionen und Luftregelungen sind für den Operator aber nur sehr schwer abschätzbar, da diese stark zeitverzögert auftreten. Ziel ist es also, auch im Maßnahmenpaket die Eingriffe der Operatoren mit zu berücksichtigen und durch Vorgaben für die Fahrweise die Einflüsse zu beschränken, ohne dabei die Eingriffsmöglichkeiten selbst zu limitieren.

Der erste Ansatz fokussierte sich darauf, die Prozessschwankungen gleichmäßiger werden zu lassen. Rußblasen wurde in diesem Zusammenhang als Ursache ermittelt (vgl. letztes Kapitel), kann aber aufgrund des Verschmutzungsgrades des Kessels sowie des Rußblasprozesses selbst nicht grundlegend verändert werden. Die Kompensation am Entstehungsort ist somit nicht möglich, einen Anhaltspunkt bietet aber die Abfolge der Rußbläser. Die Zeitdauer für die Entwässerung und Schließung bzw. Öffnung des Dampfventils benötigt im Schnitt ca. acht Minuten. Aufgrund des bereits aufgewärmten Systems kann diese Dauer übergangen und das Durchfahren der einzelnen Zyklen ermöglicht werden. Der Dauerbetrieb steigert zwar den Gesamtdampfbedarf, erhöht aber auch die Dampfproduktion durch den saubereren Kessel. Dadurch resultiert eine Wirkungsgradsteigerung und der Gesamtprozess läuft ruhiger ab. Der Einfluss der Rußbläser auf die Dampfmenge bleibt weiterhin schlagend, doch ist die Verbrauchsdynamik wesentlich gleichmäßiger und kann durch den Kessel selbst einfacher kompensiert bzw. ausgeglichen werden.

Davon ausgehend, dass die Brennstoffzufuhreinheit Hauptinitiator transient dynamischer Effekte ist, wurde die Frischdampfmengenmessung durch eine intelligente Filterung modifiziert, sodass der Einfluss auf den Frischdampfregler beschränkt wird. Historische Daten und erweiterte Methoden der Datenverarbeitungstheorie wurden angewendet, um eine optimale Parametrierung der Filterparameter zu erhalten. Der intelligente Filter reduziert die Amplitude der Messung, verzögert die Dynamik dieser jedoch nicht signifikant. Es kommt dadurch zu keiner merklichen Phasenverschiebung der Messung und der Regler hat die Möglichkeit, auf aktuelle Vorkommnisse zeitgerecht zu reagieren. Den durch das Rußblasen ausgelösten Störungen wird somit nicht mit starken Stellgrößenänderungen begegnet. Am Ende war nur eine vergleichsweise kurze Phase zur Nachoptimierung und Überwachung notwendig.

Um den Sollwert für den Restsauerstoffgehalt senken zu können, müssen Änderungen schnellstmöglich erkannt werden. Eine zusätzliche Restsauerstoffmessung im sauberen Rauchgaskanal nach dem Schlauchfilter wurde dazu installiert und in die Regelung eingebunden. Die Zeitverzögerung der neu installierten Messung ist merklich größer als die O_2-Messungen der sauberen Kessel. Der Messwert ist jedoch bei höherem Verschmutzungsgrad des Kessels signifikant schneller und akkurater. Die inkludierte Leckageluft wurde durch eine passende Transformation kompensiert und kann zusätzlich als Falschluftdetektion dienen. Zur Zuverlässigkeit wird immer der Mittelwert aus der neuen und mindestens einer Kesselsauerstoffmessung für die Regelung verwendet. Ohne zusätzliches Ändern der Reglerparameter wurde so die Sauerstoffregelung verbessert und speziell im verschmutzten Zustand signifikant die Regelgeschwindigkeit verbessert.

Der ruhigere Betrieb des Kessels machte es im Weiteren möglich, eine geeignete Wahl an Wirbelbetttemperaturmessungen bzw. deren Mittelung zu identifizieren. Eine intelligente und vertrauenswürdige Messwertmittelung kann als Anhaltspunkt die Vitalität einzelner Messungen verwenden. Varianz oder Standardabweichung der Messwerte können dazu als Kriterium herangezogen werden. Am Ende wurde nur die Möglichkeit implementiert, einzelne Temperaturmessungen durch die Visualisierung wegschalten zu können. Eine gewichtete Mittelung,

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

abhängig von der Messwertvarianz, wurde auf einen späteren Zeitpunkt verschoben. Dies ist hauptsächlich in der besseren Transparenz der Bestandsautomatisierung begründet und bietet den Operatoren die Möglichkeit, Eingriffe bei Fehlfunktionen vorzunehmen.

Die sprungförmige Reduktion der Sollwertvorgaben für die Frischdampfmenge bei Grenzwerterreichung wird über das aufgesetzte MPC-System initiiert und musste deshalb auch in diesem System optimiert werden. Speziell am Ende der Reisezeit ist der Unterdruck vor dem Saugzuggebläse die leistungslimitierende Größe und verursacht laufend die Verletzung des MPC-Unterdruckgrenzwertes. Das System wird dadurch periodisch angeregt. Als Verbesserungsansatz wurde der vom Operator festgelegte MPC-Grenzwert für die maximale Frischdampfmenge mit einem Auslastungsregler überlagert und abhängig vom Unterdruck vor dem Saugzuggebläse adaptiert. Um einen uneingeschränkten Betrieb des MPC bei inaktiver Begrenzung gewährleisten zu können, wird der Auslastungsregler abhängig von der Abweichung zum absoluten Grenzwert aktiviert und deaktiviert. Dies wurde mit einer Hysterese bewerkstelligt, die außerdem sicherstellt, dass der Regler schnell genug auf Störungen am Saugzuggebläse reagieren kann. In Abbildung 5 sieht man die Aktivierung des Auslastungsreglers, der aufgrund eines Übertritts der Unterdruckgrenze aktiviert wurde, und dessen Regelqualität. Reale Messwerte sind blau dargestellt, die grüne und rote Linie im mittleren Trend zeigen die Hysteresewerte an und im unteren Trend ist der Grenzwert der MPC-Regelung rot dargestellt. Eine Beeinflussung der Auslastungsregelung mit anderen Reglern wurde durch die saubere Einstellung der Regelparameter unterbunden.

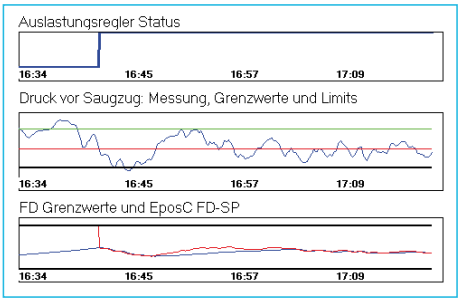

Abb. 5:
Auslastungsreglers als Begrenzungsregler für den MPC

Die Wirbelbetttemperatur und der Restsauerstoffgehalt im Rauchgas sind wesentliche Einflussfaktoren für NO_x-Emissionen, die durch die Sollwertvorgabe der Operatoren maßgeblich bestimmt sind. Außerdem sind Wirbelbetttemperatur als auch Restsauerstoffgehalt grundlegend von Brennstoffqualität und Brennstoffzusammensetzung (Mischung Schlamm und Stützbrennstoff) abhängig und schwer vorherzusagen bzw. zu bestimmen. Um die NO_x-Emissionen durch Operatoreingriffe trotzdem optimieren zu können, wurden Vorgaben für die Fahrweise gemacht, die gleichzeitig Anhaltspunkte für das richtige Verhalten in unterschiedlichen Situationen im Kesselbetrieb (z. B. Brennstofflöcher, …) beinhalten.

Zum einen wurde vorgegeben, den Restsauerstoffgehalt möglichst niedrig auf 1,7 vol-% oder 1,6 vol-% einzustellen. Zum anderen wurde vorgegeben, den Mittelwert aus der blauen und grünen Wirbelbetttemperaturmessung (Abbildung 4, oben)

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

zu verwenden und den Sollwert der Wirbelbetttemperatur zwischen 850 °C und 860 °C zu halten. Dadurch sind im Mittel ein Senken sowie eine bessere Regelung der Wirbelbetttemperatur möglich. Die saubere Wirbelbetttemperaturregelung ist erforderlich, um keine Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen durch zu große Temperaturschwankungen bzw. zu kleinen Wirbelbetttemperaturen zu verursachen und deshalb ein Optimum zwischen NO_x- und CO-Emissionen einstellen zu können.

Fasst man alle Maßnahmen und die Vorgaben zur Fahrweise zusammen, so erhält man eine übergeordnete erweiterte Prozessregelung des Gesamtprozesses (APC), die aufgrund der gegebenen Konfiguration in der Bestandsautomatisierung implementiert wurde.

6. Ergebnisse

Der Ausgangszustand vor Projektstart soll im Folgenden mit den erzielten Erfolgen verglichen und diskutiert werden. Die Förderung der Gleichmäßigkeit kann sehr gut an der reduzierten Standardabweichung der Brennstoffmengen gemessen werden. Während die Standardabweichung der Brennstoffmenge vor der Optimierung 4,2 % betrug, war diese nach der Optimierung nur mehr 2,6 % – das entspricht einer Reduktion von knapp 40 %. Die NO_x-Werte lagen in einem Bereich von 180 bis 200 mg/Nm³ bei einem Restsauerstoffgehalt von 1,8 vol-% im Rauchgas. Die CO-Emissionen waren in einem Bereich von 20 bis 30 mg/Nm3. Nach der Inbetriebnahme der Optimierungsmaßnahmen konnten NO_x-Werte von 140 bis 160 mg/Nm³ bei einem Restsauerstoffgehalt von 1,6 bis 1,7 vol-% erzielt werden und die CO-Werte lagen zwischen 10 und 20 mg/Nm³. Es wurde also eine gleichzeitige Reduktion der NO_x- sowie der CO-Emissionen erreicht. Die Dampfproduktion wurde durch die Auslastungsregelung speziell gegen Ende der Reisezeit noch ausgereizt und konnte um ca. ein Prozent gesteigert werden. Ein direkter Vergleich der Dampfproduktion ist aufgrund der Brennstoffunterschiede jedoch schwer möglich. In Tabelle 1 sind die Werte noch einmal zusammengefasst und gegenübergestellt.

	NO_x		CO		$O_{2,trocken}$
	MMW	TMW_{max}	MMW	TMW_{max}	MMW
	mg/Nm³		mg/Nm³		vol-%
Vor Optimierung					
Grenzwert	198		50		-
April 2015	185	199	14	28	4,5
Mai 2015	186	197	22	34	4,6
Juni 2015	186	203	27	40	4,5
Juli 2015	186	197	31	43	4,3
Mittelwert	**185,8**	**199,0**	**23,5**	**36,3**	**4,5**
Nach Optimierung					
Grenzwert	179		50		-
Jänner 2016	149	161	11	24	4,7
Februar 2016	164	178	18	25	4,6
März 2016	165	178	22	33	4,3
Mittelwert	**159,3**	**172,3**	**17,0**	**27,3**	**4,5**

Tab. 1: Prozesswerte nach und vor der Optimierung. (Die O_2-Werte sind trocken gemessen und die Emissionen mit einem Bezugssauerstoff von 11 vol-% umgerechnet).

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

An dieser Stelle sei angemerkt, dass alle Optimierungen im Zuge der neuen behördlichen Emissionsgrenzwerte Ende 2015 implementiert und im Januar 2016 im Probebetrieb überwacht wurden. In dieser Zeit befand sich die Kesselanlage bereits gegen Ende der Reisezeit. Im Januar 2015 war eine wiederkehrende Revision geplant, die durch die Optimierungsmaßnahmen bis April 2016 verschoben wurde. Dadurch konnte die Reisezeit deutlich verlängert werden. Dieser Umstand ist an den Emissionswerten des bereits stark verschmutzten Kessels ersichtlich. Hauptindiz dafür ist das signifikante Ansteigen der

CO-Emissionen in den Monaten Februar und März 2016. Nach der Revision im April 2016 konnte die Optimierung ebenfalls verwendet werden, ohne dass Adaptierungen notwendig waren.

Die dynamische Analyse der Ergebnisse zeigt klar, dass die Halbstundenmittelwerte der Emissionen vor der Optimierung die neuen Grenzwerte erreicht und überschritten hätten, mit der Optimierung aber eine ausreichende Reserve zu den Grenzwerten erreicht wurde. Der dynamische Einfluss der Filterung auf die Frischdampfmenge und das Gesamtsystem soll anhand von Abbildung 6 dargestellt werden.

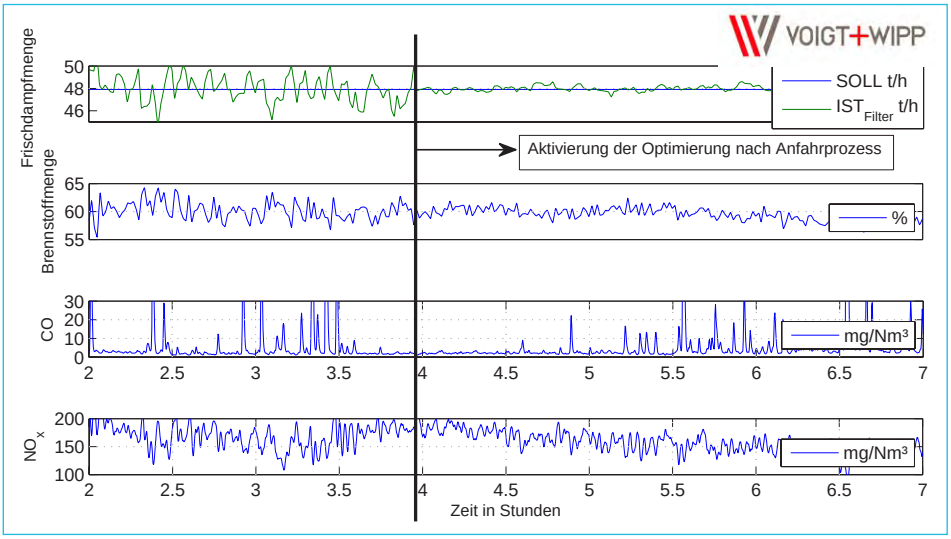

Abb. 6: Anfahren des Kessels nach Stillstand: Aktivierung der Optimierung ca. in Stunde vier

Diese O_2 -Werte sind trocken gemessen und die Emissionen mit einem Bezugssauerstoff von 11v-% umgerechnet.

Erkennbar ist, dass ca. in Stunde vier die erweiterte APC-Lösung eingeschalten wird und der Kesselbetrieb sich danach signifikant beruhigt. Der oberste Trend zeigt den gravierenden Einfluss der Filterung. Des Weiteren sieht man in den beiden unteren Trends, dass die Emissionen kontinuierlich kleiner werden und die Varianz schlagartig niedriger ist. Gleichzeitig beruhigt sich auch die Standardabweichung der Brennstoffmenge, die im mittleren Trend dargestellt ist. Herauszustreichen ist, dass die CO-Emissionen im Mittelsignifikant reduziert

Auszug aus dem Buch zum KWTK Dresden

wurden, obwohl die CO-Emissionen nicht direkt im Fokus der Optimierung standen (Tabelle 1).

7. Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wurde die Optimierung eines zirkulierenden Wirbelschichtkessels anhand von regelungstechnischen Primärmaßnahmen vorgestellt, die durch eine Verschärfung der behördlichen Emissionsgrenzwerte notwendig wurde. Durch eine gründliche verfahrenstechnische System- und Datenanalyse, kombiniert mit einer gründlichen Analyse der regelungstechnischen Umsetzung der Bestandsautomatisierung, konnte eine teure Investition einer SNCR-Anlage vermieden werden. Am Ende kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse nur durch das Zusammenspiel von Expertisen aus dem verfahrens- und regelungstechnischen Gebiet möglich waren und weil die Operatoren von Anfang an in die Optimierung eingebunden wurden. Für eine langfristige Verbesserung von APC-Lösungen ist eine kontinuierliche Wartung der Systeme notwendig, um eine dauerhafte optimale Ausnutzung der Anlage sicherstellen zu können. Der Ansatz, die vorhandenen Freiheitsgrade in einer Anlage durch regelungs- als auch verfahrenstechnische Primärmaßnahmen zu nutzen und Optimierungsmaßnahmen in der vorhandenen Struktur einzubinden, ermöglicht die Anwendung der Optimierungspotenziale auch auf andere Anlagen bzw. Branchen.

conenga group

Ihr Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Richard Wipp
CEO / Geschäftsführer
CONENGA Group
r.wipp@conengagroup.com

CONENGA Group

Auhofstraße 1/10, 1130 Wien
+43 123 500 32
office@conengagroup.com
www.conengagroup.com

Medienrechte & Text: CONENGA Group
Cover: Adobe Stock
Grafik: Daniela Böck

DE/25-1

ANLAGENBAU I VERFAHRENS- & REGELUNGSTECHNIK I MANAGEMENT