

Höhere Effizienz bei der Verbrennung von Klärschlämmen durch Einsatz einer hybriden Feuerungsregelung

Klaus-Peter Schilz, Michael Weis, Matthias Röderer und Klaus Wendelberger

1.	Klärschlammverbrennungsanlage Infraserb Höchst.....	232
2.	Einsatz des hybriden Feuerungsreglers.....	235
3.	Zusammenfassung	239
4.	Literatur.....	240

Das Ziel des Betreibers einer Klärschlammverbrennungsanlage ist es, die Anlage mit möglichst großem Klärschlammthroughput, d.h. mit der größtmöglichen Wirtschaftlichkeit betreiben zu können. Der Anlagenbetrieb muss dabei unter Einhaltung verschiedener Randbedingungen erfolgen:

- Vorgegebene Emissionsgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden.
- Vorgegebene Anlagenparameter wie z.B. Grenzwerte für Massenströme, Temperaturen und Drücke müssen eingehalten werden.
- Der Einsatz von mit teurem Öl oder Gas betriebenen Stützbrennern muss möglichst vermieden werden.

Je stabiler die Leistung des Klärschlammkessels bei ihrem vorgegebenen Sollwert gehalten werden kann, desto näher kann die Anlage an ihrer Auslegungsgrenze betrieben werden. Leistungsschwankungen, d.h. Störungen der Feuerung führen zur Bildung von Emissionen und bergen die Gefahr, dass der Prozess zulässige Grenzen überschreitet und ggf. durch Sondermaßnahmen gestützt werden muss. Der Feuerleistungsregelung kommt bei der Wirtschaftlichkeit von Klärschlammverbrennungsanlagen daher eine besondere Bedeutung zu.

Anders als Abfall, vgl. Austel et al. [1], oder Biomasse stellt Klärschlamm einen Brennstoff dar, der nicht nur hinsichtlich seines Heizwertes sondern auch bezüglich des Wassergehaltes und der Konsistenz, d.h. der Förderfähigkeit, starken Schwankungen unterworfen ist. Durch die Brennstoffvariationen treten große, schnelle Störungen der Dampferzeugerleistung auf. Gleichzeitig ändert sich auch die dynamische Reaktion der Kesselleistung auf eine Änderung des zugeführten Brennstoffmassenstromes. Die Realisierung einer stabilen Feuerungsregelung für einen mit Klärschlamm befeuerten Dampferzeuger stellt somit eine große Herausforderung aus regelungstechnischer Sicht dar.

Konventionelle Regelkonzepte geraten in Klärschlammverbrennungsanlagen schnell an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. In den meisten Fällen wird keine zufriedenstellende Regelgüte erreicht, manchmal tritt sogar ein geradezu fehlerhaftes Regelverhalten auf. Die Ursache für dieses unzulängliche Verhalten liegt darin begründet, dass die Ermittlung korrekter Stelleingriffe bei Klärschlammverbrennungsanlagen nur erfolgen kann, wenn der momentane Zustand, in dem sich der Kessel befindet, durch Verwendung aller vorhandenen Messdaten ganzheitlich beurteilt wird. Aus aktuellen Betriebsdaten muss ermittelt werden, mit welchen korrigierenden Stellaktivitäten optimalerweise ein Festhalten der

Kesselleistung auf dem gewünschten Niveau durchgeführt werden muss, um den zusätzlich zu beachtenden Randbedingungen (z.B. Temperaturgrenzwerte) gleichzeitig genüge zu tun. In konventioneller Logik ist eine Umsetzung derart komplexer Zusammenhänge nur begrenzt bzw. überhaupt nicht möglich.

Eine Alternative zur konventionellen Regelungstechnik stellt die Fuzzy-Technologie dar. Durch die Umsetzung der erforderlichen Regelfunktionalität als linguistische Regeln erhält man die Möglichkeit, alle möglichen Betriebszustände der Anlage zu definieren und je nach Betriebsituation bzw. aktueller Klärschlammqualität jeweils geeignete Regeleingriffe festzulegen. Der Fuzzy-Regler stellt damit einen nichtlinearen Algorithmus dar, der die erforderlichen Stellaktivitäten aus dem aktuellen Betriebszustand der Anlage, der durch die Messgrößen wie z.B. Frischdampfmassenstrom, Temperaturen im Verbrennungsofen usw. bestimmt wird, ableitet. Damit können auch für außergewöhnliche Betriebsituationen, die durch außergewöhnliche Klärschlammqualitäten zustande kommen, die bestmöglichen Stelleingriffe ermittelt werden. Ein fehlerhaftes Regelverhalten wird dadurch vermieden und die Regelgüte insgesamt erhöht.

In einem reinen Fuzzy-Regler sind alle Regelfunktionalitäten in Form der linguistischen Regeln abzulegen. Dies gilt auch für die ebenfalls vorhandenen, einfachen Zusammenhänge, die deterministisch und reproduzierbar sind. Zur Feuerungsregelung eines Klärschlammkessels werden daher im Fuzzy-Regler mehrere hundert Regeln benötigt.

Der Nachteil des Fuzzy-Reglers besteht deshalb darin, dass er eine sehr große Zahl von Parametern hat, die in ihrer Gesamtheit nur bedingt für eine ganz bestimmte Anlage optimiert werden können. Grundsätzlich gilt bei der Dampferzeugerregelung jedoch der Grundsatz, dass die erreichbare Regelgüte nicht nur vom eingesetzten Konzept sondern ganz entscheidend auch von der Optimalität der verwendeten Parameter abhängt. Daher wird oftmals auch mit einem Fuzzy-Regler ein nicht befriedigendes Regelverhalten bei der Feuerungsregelung erreicht. Außerdem kann ein derartig aufwändiger Regler nur äußerst schwierig vom Betriebspersonal an geänderte Randbedingungen angepasst werden.

Aus diesem Grunde wurde bei Siemens Energy ein hybrides Regelkonzept entwickelt, das die Vorteile der konventionellen Regelungstechnik, d.h. vor allem die einfachere Optimierbarkeit aber auch die bessere Projektier-, und Wartbarkeit sowie die Robustheit mit denjenigen der Fuzzy-Regelungstechnik, d.h. der Anpassungsfähigkeit an nichtlineare, komplexe Prozesse, verbindet.

Auf diese Art und Weise kann eine sehr große Stabilität im Betriebsverhalten von Klärschlammverbrennungsanlagen unter Einhaltung der Randbedingungen für Emissionswerte und Verbrennungsofen erreicht werden. Die erhöhte Stabilität kann letztlich dazu genutzt werden, den Kesselleistungssollwert weiter zu erhöhen, d.h. näher an die Auslegungsgrenze heran zu gehen. Dies ist mit einer entsprechenden Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Anlage verbunden.

Das Hybrid-Regelkonzept, das sich bereits in der Abfallverbrennung bewährt hatte [1], wurde in der Klärschlammverbrennungsanlage der Infraseriv im Industriepark Frankfurt/Höchst zur Feuerungsregelung eines Verbrennungsofens mit Wirbelschichtfeuerung eingesetzt. Im folgenden wird dargestellt wie das Regelkonzept für diese Anlage aufgebaut wurde und mit welcher Regelqualität die Anlage nun betrieben werden kann.

1. Klärschlammverbrennungsanlage Infraseriv Höchst

In der 1995 in Betrieb genommenen Klärschlammverbrennungsanlage (KVA) von Infraseriv werden der im Industriepark Höchst anfallende Klärschlamm, kommunaler Klärschlamm

aus Städten und Gemeinden der Region sowie andere heizwertreiche, wirbelschichtgängige Abfälle thermisch behandelt. Die Anlage besteht aus zwei voneinander unabhängigen Verbrennungsstraßen mit jeweils einem Wirbelschichtofen mit Nachreaktionszone, einem Abhitzeessel und einer Abgasreinigungsanlage bestehend aus einem dreifeldrigen Elektrofilter und einer mehrstufigen Nasswäsche (Bild 1).

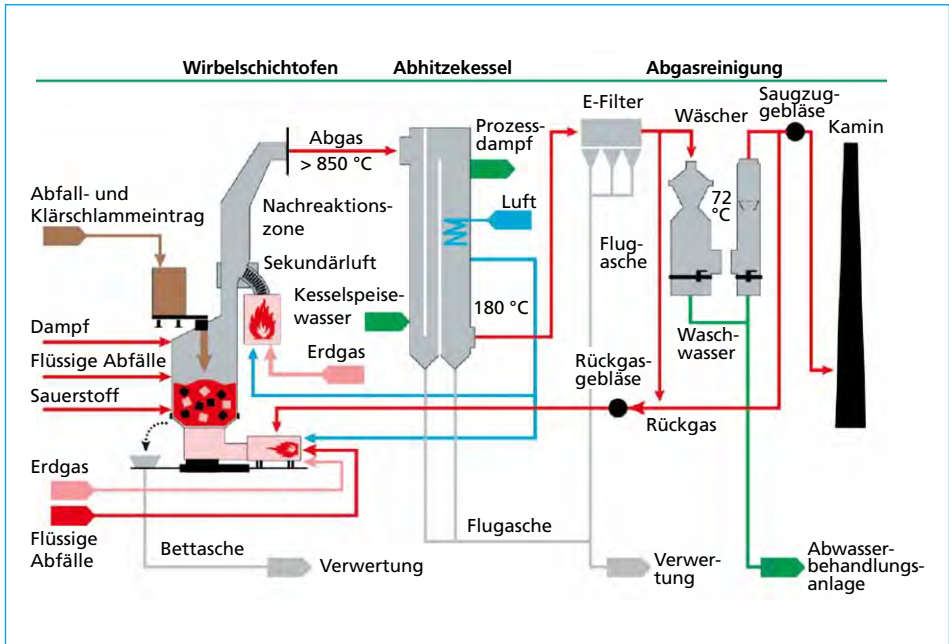


Bild 1: Verbrennungsstraße der KVA InfraserV

Zur Annahme von Klärschlämmen bzw. wirbelschichtgängigen Abfällen und Mischungen stehen in der KVA verschiedene Annahmesilos zur Verfügung. Die Geometrie und die Austragsvorrichtungen der Silos sind den unterschiedlichen schüttgut-mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Klärschlämme und Abfälle angepasst.

Die Disposition der Silos ist abhängig vom Heizwert des jeweiligen Klärschlammes, seinen fördertechnischen Eigenschaften und der für die Anlage zulässigen Schwermetallkonzentration. Mittels Walking floors sowie Trogketten- und Schneckenförderer wird der Brennstoff aus den Silos in Vorlagebehälter und von dort von oben in den Wirbelschichtofen eingebracht.

Die Verbrennungsluft wird zunächst in einer Vorbrennkammer aufgeheizt und strömt dann durch eine Verteilerkammer (Windbox) und den Düsenboden von unten direkt in die Wirbelschicht. Durch den Luftstrom wird die Wirbelschicht, in der sich außer dem Verbrennungsgut auch Quarzsand befindet, in Schwebelage gehalten. Das Verbrennungsgut wird durch den Sand zerkleinert und weiter durchmischelt. Dadurch kann die Verbrennungsluft von allen Seiten angreifen und die organischen Bestandteile des Klärschlammes nahezu vollständig bei Temperaturen zwischen 850 und 950 °C verbrennen. Die anorganischen, nicht brennbaren Bestandteile werden dauerhaft umweltverträglich in eine glasartige Struktur eingebunden. Die Verweilzeit des Verbrennungsguts im Ofen beträgt einschließlich Freeboard etwa sieben Sekunden.

Der dem Wirbelschichtofen nachgeschaltete Abhitzekegel, in dem das Abgas auf etwa 200 °C abkühlt, dient zur Erzeugung von Prozessdampf, der in das Werksnetz im Industriepark eingespeist wird.

Die vom Abgas mitgerissene Flugasche wird anschließend in einem dreifeldrigen Elektrofilter abgeschieden. Dieser qualitativ hochwertige Verbrennungsrückstand wird zur Zeit als Konditionierungsmittel in der Klärschlammmentwässerung eingesetzt und als Versatzmaterial im Untertagebau verwertet. Eine Verwertung der Aschen im Straßenbau ist ebenfalls möglich. Anschließend werden aus dem Abgas in einer mehrstufigen Nasswäsche saure Schadgase wie Schwefeldioxid, Chlorwasserstoff, Bromwasserstoff und Fluorwasserstoff sowie die gas- und partikelförmigen Schwermetalle weitestgehend abgeschieden. Das Abwasser aus den Wäschern wird neutralisiert, gekühlt und einer speziellen Abwasserbehandlungsanlage mit Schwermetallfällung zugeführt.

Die nach der 17. BImSchV geforderten Grenzwerte werden deutlich unterschritten.

In Bild 2 ist der Aufbau des Wirbelschichtofens detaillierter dargestellt. Mit Hilfe zweier Dosierschnecken wird der Verbrennungs-ofen mit dem Verbrennungsgut beschickt, wobei eine der Schnecken konditionierten höher kalorischen, die andere niedrig kalorischen Klärschlamm fördert. Der Heizwert einer der beiden Chargen kann durch Zugabe von heizwertreichen Schüttgutabfällen (HSA) erhöht werden.

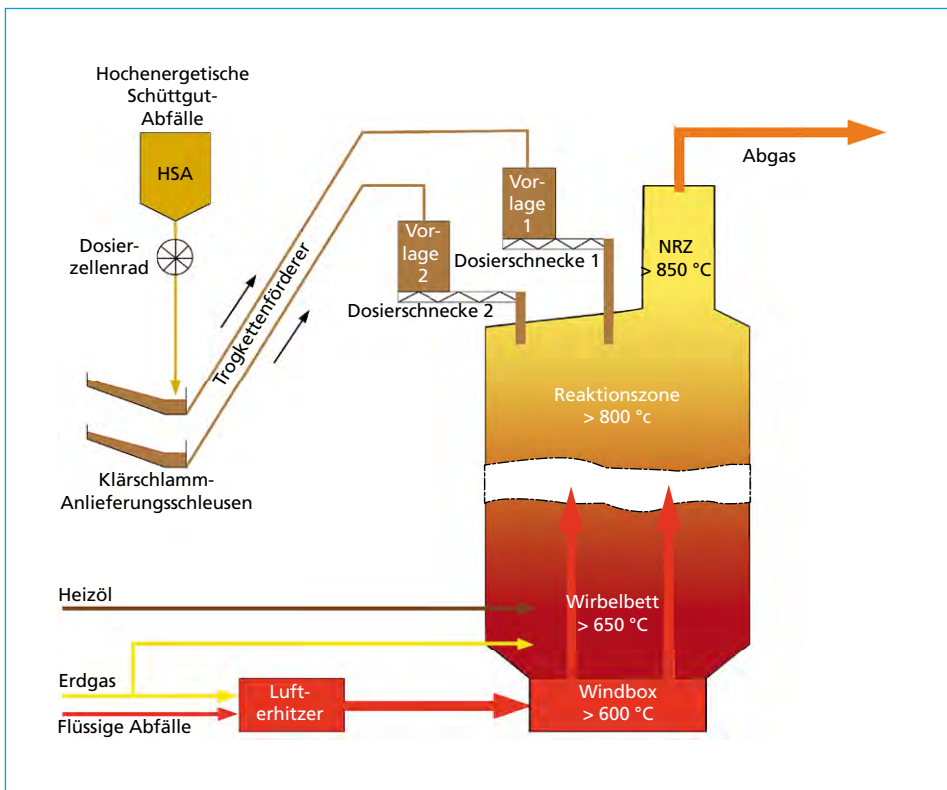


Bild 2: Verfahrensansicht des Verbrennungs-ofens

Als prozesstechnische Grenzen, die beim Betrieb der Anlage eingehalten werden müssen, sind insbesondere die Temperatur in der Nachreaktionszone (NRZ), die zwischen 850 und 1.050 °C liegen muss, und die Betttemperatur, die > 650 °C sein muss, zu nennen.

Zur Regelung der Feuerung stehen folgende Stellgrößen zur Verfügung:

- Drehzahlverstellung der zwei Klärschlamm-Dosierschnecken,
- Drehzahlverstellung der Schüttgut-(HSA)-Dosierzellschleuse,
- Sollwert Temperatur der Primärluft in der Windbox, die mit Hilfe des Erdgasmassenstromes zum Lufterhitzer eingestellt wird.

Zusätzlich kann die Temperatur im Wirbelbett mit Hilfe von Gas und Heizölanzen erhöht werden um vorgegebene Mindestwerte zu halten. Flüssige Abfälle werden als Zusatzbrennstoff im Primärlufterhitzer verwendet um Erdgas als Energieträger zu ersetzen.

2. Einsatz des hybriden Feuerungsreglers

Das hybride Regelkonzept, das sich beim Einsatz in Abfallverbrennungsanlagen bewährt hat und in Austel et al. [1] beschrieben wurde, wurde für den Einsatz in der Anlage KVA InfraserV modifiziert und adaptiert.

Der konventionelle Anteil des Reglers wird zur Regelung des Frischdampfmassestromes eingesetzt. Auch wenn sich die Brennstoffeigenschaften und damit auch die dynamische Reaktion des Kessels laufend ändern, gibt es doch einen deterministischen Zusammenhang zwischen Brennstoffmassenstrom und Kesselleistung. Mit der konventionellen Technik ist daher eine Stabilisierung des Anlagenverhaltens in einem bestimmten Arbeitspunkt möglich.

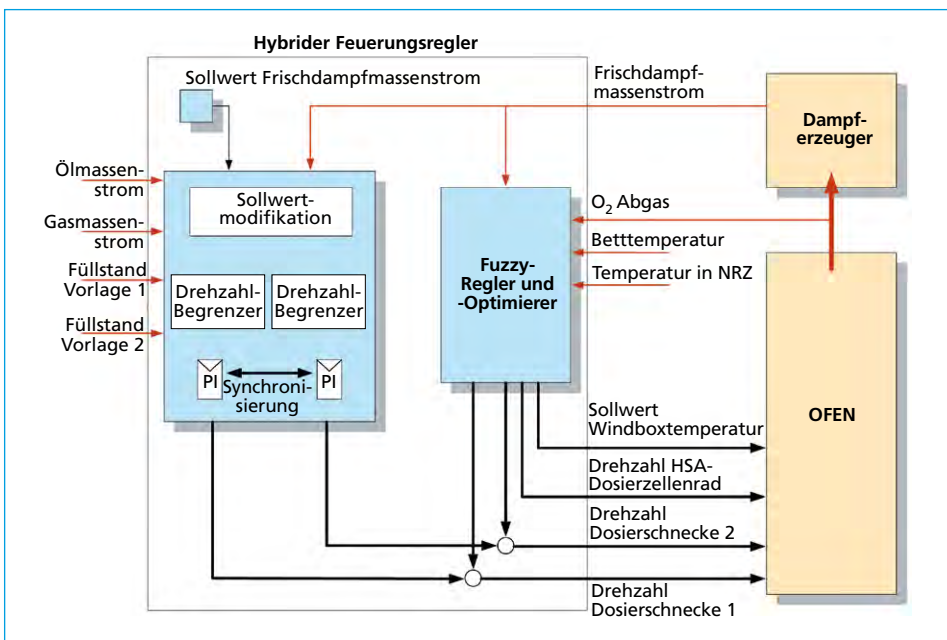


Bild 3: Aufbau des hybriden Feuerungsreglers

Der Fuzzy-Anteil des Hybridreglers verschiebt den Arbeitspunkt des konventionellen Reglerteils und stellt somit sicher, dass die Anlagenstabilität auch bei veränderlichen Randbedingungen gewährleistet ist. Insbesondere sorgt der Fuzzy-Regler dafür, dass die Temperaturen in Wirbelbett und Nachreaktionszone innerhalb ihrer zulässigen Grenzen gehalten werden.

Das primäre Ziel des Projektes war es, durch den Einsatz des hybriden Reglers eine Vergleichmäßigung der Dampfproduktion zu erreichen. Dadurch sollte die Möglichkeit geschaffen werden, die Anlage näher an ihrer Auslegungsgrenze zu betreiben, was einer Erhöhung des mittleren Klärschlammthroughsatzes und somit einer Steigerung der Anlagenrentabilität gleichkommt.

Die unterschiedliche Konsistenz der Klärschlämme kann zu Unterbrechungen der Brennstoffversorgung aus einem Vorlagebehälter führen. Trotz hoher Drehzahl der entsprechenden Dosierschnecke wird dann nur wenig oder kein Klärschlamm zum Verbrennungs-ofen gefördert. Aus diesem Grunde wurde im konventionellen Anteil des Reglers eine Sollwertmodifikation sowie ein Drehzahlbegrenzer aufgebaut. Diese Funktionen stellen sicher, dass in den Fällen, in denen eine Störung in der Förderung erkannt wird, der Regler nicht unnötigerweise an den oberen Anschlag läuft, eine unsymmetrische Belastung des Verbrennungs-ofens verhindert wird und beim Wiedereinsetzen der Brennstoffförderung keine zu große Dampfproduktion entsteht.

In den folgenden Bildern ist dargestellt, welche Verbesserungen im Anlagenverhalten durch Einsatz des hybriden Feuerleistungsreglers erreicht wurden.

Bild 4 zeigt das Betriebsverhalten des Verbrennungs-ofens vor der Installation der Hybrid-Feuerungsregelung.

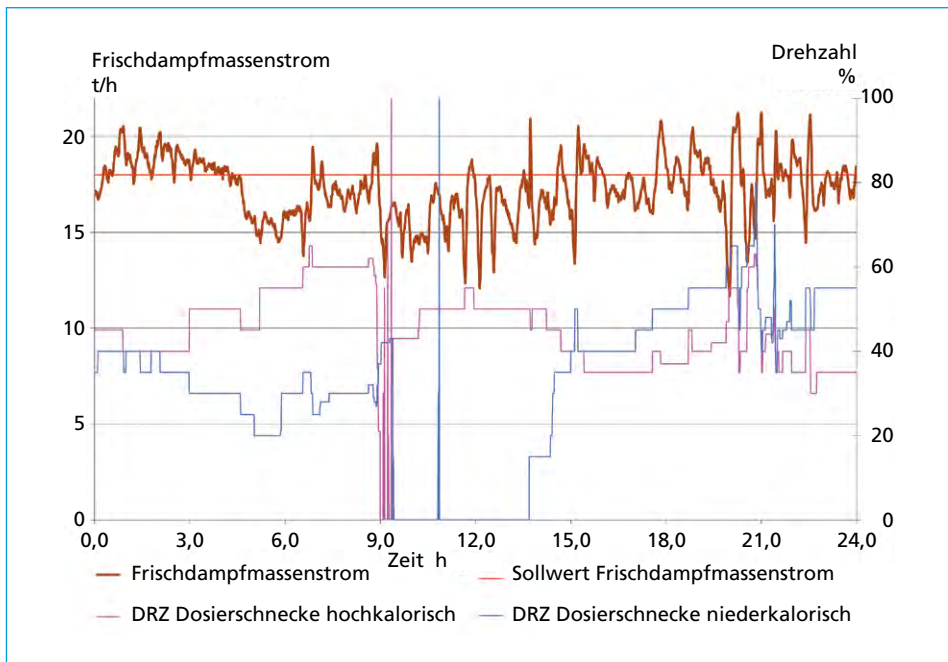


Bild 4: Betrieb vor der Installation des Hybrid-Feuerungsreglers

Die maximalen Sollwertabweichungen betragen in diesem Fall +3 t/h/-5,5 t/h.

In den Bildern 5 und 6 ist das Betriebsverhalten des Verbrennungsofens bei aktivierter Hybrid-Feuerungsregelung und beim Einschalten der Regelung dargestellt.

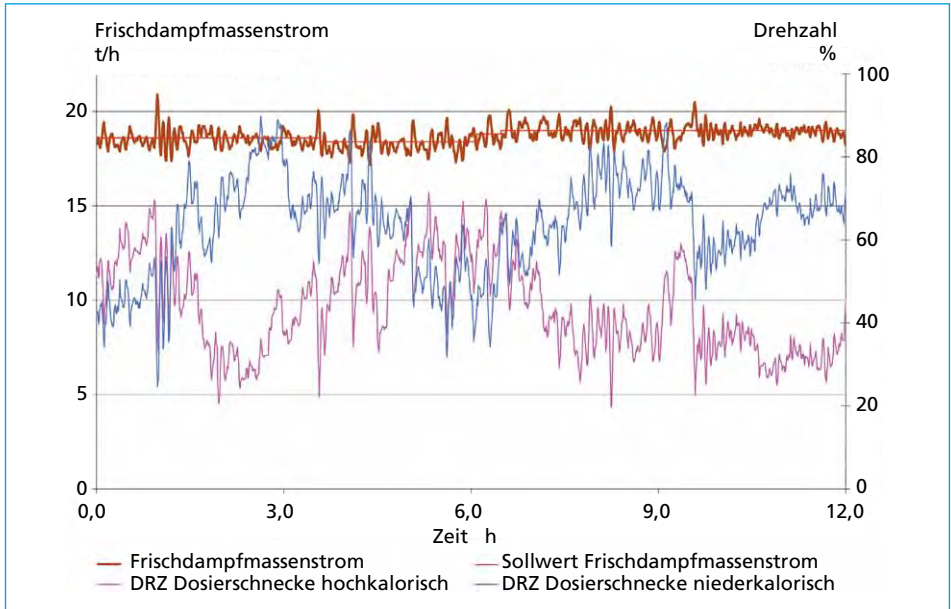


Bild 5: Betrieb mit aktivem Hybrid-Feuerungsregler (Dampfmassestromregelung)

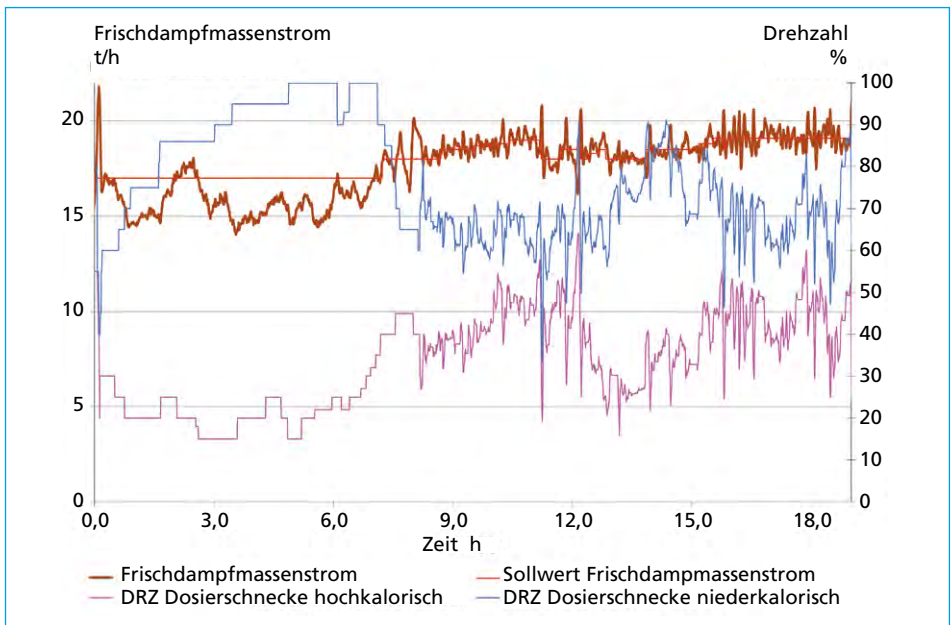


Bild 6: Übergang von manuellem Betrieb auf geregelten Betrieb mit anschließenden Sollwertänderungen

Die maximale Sollwertabweichung bei Betrieb mit aktiviertem Hybrid-Feuerungsregler beträgt +/-1,9 t/h. Der Betriebssollwert der Anlage konnte bei ungestörtem Betrieb von 18 auf 19 t/h erhöht werden.

Für den in Bild 5 dargestellten Zeitraum zeigt Bild 7 den Verlauf der Temperaturen in Nachreaktionszone und Wirbelbett. Im Sinne eines optimierten Anlagenbetriebs wird die Förderschnecke mit dem niederkalorischen Klärschlamm recht hoch gefahren, solange dies mit den sich einstellenden Verbrennungstemperaturen möglich ist. Im dargestellten Fall wird die Temperaturgrenze von 850 °C für die Nachreaktionszone immer noch deutlich überschritten und die Wirbelbetttemperatur befindet sich im Bereich von > 720 °C.

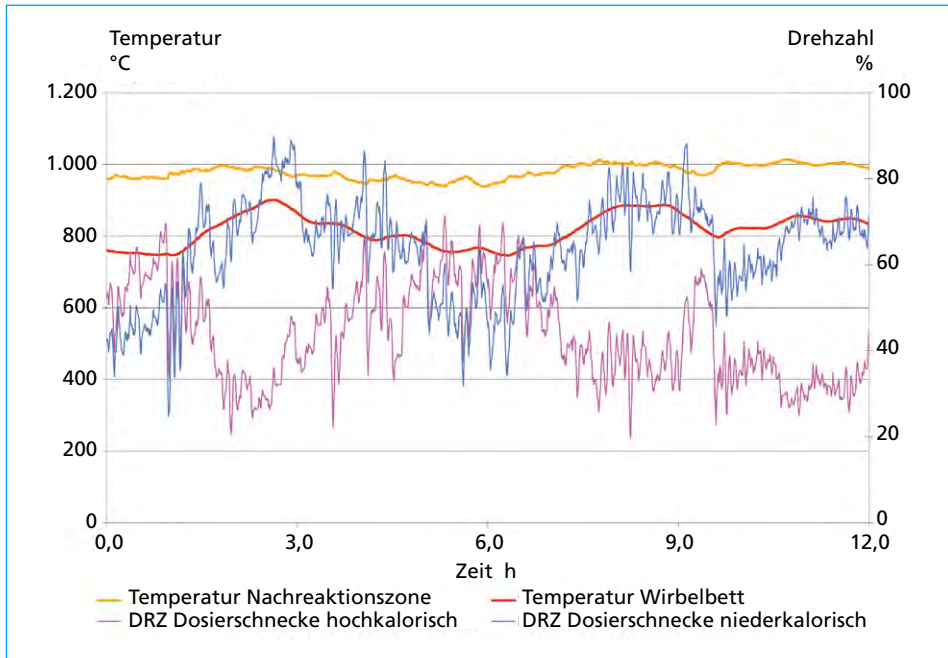


Bild 7: Betrieb mit aktivem Hybrid-Feuerungsregler (Temperaturregelung)

Bild 8 zeigt die Verstellung der Drehzahl der Schüttgutdosierschleuse (HSA) und die Veränderung des Sollwertes für die Temperaturregelung der Windbox.

Deutlich ist zu erkennen, dass die Sollwertvorgabe für die Windbox-Temperatur nur in extremen Situationen die Temperatur in der Windbox anhebt, um einen möglichst geringen Verbrauch von Erdgas zur Luftvorwärmung zu erreichen. Der Einsatz der hochenergetischen Schüttgutabfälle (HSA) steigt während des Beobachtungszeitraumes teilweise um den sinkenden Heizwert des Klärschlammes auszugleichen.

Durch Auswertung der Betriebsdaten und Bilanzen über einen mehrmonatigen Zeitraum konnte der folgende Nutzen ermittelt werden, der sich durch den Einsatz des hybriden Feuerungsreglers im Anlagenbetrieb ergibt:

- Steigerung der Dampfproduktion um 0,5 bis 1 t/h entsprechend 2,5 bis 5 % bezogen auf den maximalen Dampfmassenstrom,
- Steigerung des Klärschlammdurchsatzes um > 10 %.

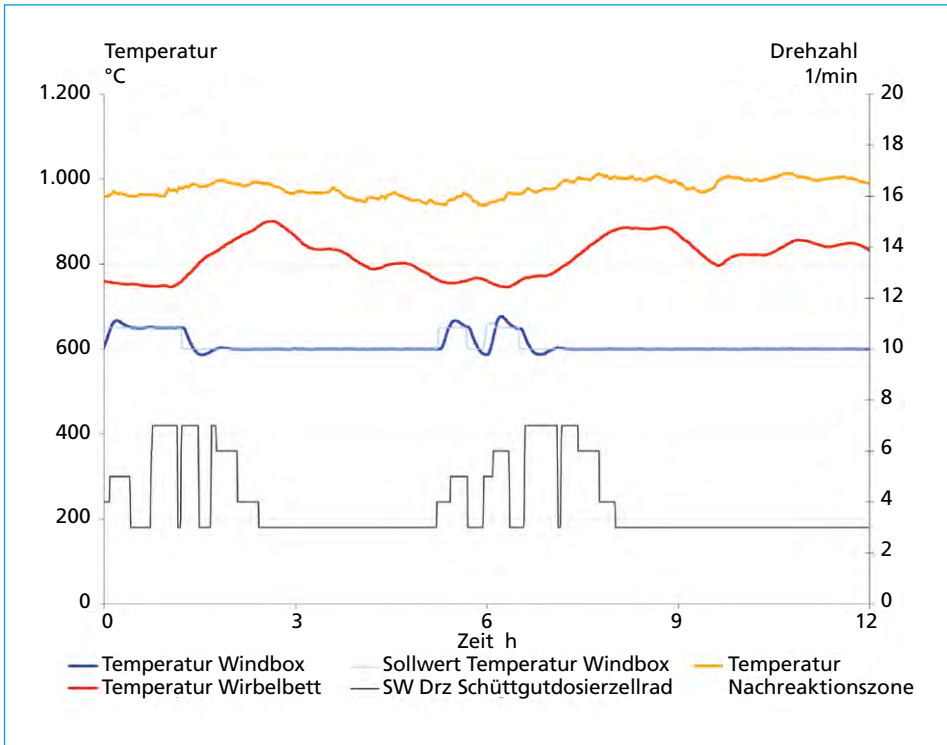


Bild 8: Sollwertverstellung der Dosierschleuse HSA und Windbox-Temperatur

3. Zusammenfassung

Aufgrund der starken Inhomogenität des Brennstoffes ist es äußerst schwierig, die Feuerung einer Klärschlammverbrennungsanlage stabil zu regeln. Gleichzeitig ist ein stabiler Anlagenbetrieb, bei dem auch allen vorgegebenen Randbedingungen (Emissionenwerte, Grenzwerte von Prozessgrößen) eingehalten werden, für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb von entscheidender Bedeutung. Die Stabilisierung der Feuerung erlaubt es nämlich, dass die Anlage näher an ihrer Auslegungsgrenze betrieben und der Klärschlammdurchsatz erhöht werden kann.

Mit der Installation in der Klärschlammverbrennungsanlage Infraserw wurde die von Siemens Energy entwickelte Hybrid-Feuerungsregelung, die sich in der Abfallverbrennung bewährt hat, erfolgreich auf einen neuen Brennstoff und ein neues Verbrennungsverfahren adaptiert.

Es zeigt sich, dass das hybride Regelungskonzept auch hier eine wesentlich stabilere Dampfproduktion selbst bei stark veränderlichen Klärschlammqualitäten ermöglicht und somit einen Betrieb mit höheren Dampfmassenstromsollwerten erlaubt. Die direkte Folge der höheren Dampfproduktion ist ein gesteigerter Klärschlammdurchsatz, der durchschnittlich 10 % höher als vor der Installation der Feuerungsregelung ist. Vorgegebene Randbedingungen, zu denen insbesondere Temperaturgrenzwerte gehören, werden dabei zuverlässig eingehalten.

4. Literatur

- [1] Austel, D.; Schopen, M.; Röderer, M. ; Wendelberger, K.: Erhöhter Durchsatz in Abfallverbrennungsanlagen durch Einsatz einer hybriden Feuerleistungsregelung. In: Müll und Abfall (2007) Nr. 7, S. 328-333