

**Kaiser, M.; Spiegel, W. (2017):**

**Informationsbasierte Steigerung der Effizienz von  
wte-Anlagen.**

In: Pohl, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2017  
Wechselwirkungen – Diagnosemethoden – Minderungsstrategien -  
Erfahrungen, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und  
-verwaltungsgesellschaft mbH, 2017,  
S. 15-23

# Informationsbasierte Steigerung der Effizienz von wte-Anlagen

Wolfgang Spiegel und Marie Kaiser

1.	Einleitung .....	1
2.	Realisierung erster Schritte .....	2
3.	Korrosion und Verschmutzung.....	3
4.	Informationsbasierte Effizienzsteigerung.....	7
5.	Quellen.....	9

## 1. Einleitung

Energietechnik entwickelt sich zu einem zunehmend spannenden und dynamischen Bereich der Ingenieursdisziplinen. Dies lässt sich auch am wachsenden Interesse von Studenten für diese Themen ablesen.

Die Einbindung eines möglichst hohen Anteils an regenerativen Brennstoffen in die thermischen Verfahren ist einer der Grundpfeiler der klimaschonenden Energieversorgung.

Die bestehende, ausgereifte Technik für Feuerungen, Dampferzeuger und Rauchgasreinigung erfährt Impulse für Innovationen und Verbesserungen durch neuartige Brennstoffe, veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen und strukturelle Veränderungen bei der Einbindung der erzeugten Nutzenergie.

Diese Entwicklungen erfassen auch die abfallgefeuerten Kraftwerke, Ersatzbrennstoffanlagen und Biomasseanlagen (Altholz, Naturholz etc.) in Deutschland und Europa. Zudem sind auch wachsende Märkte für diese Anlagen in Schwellenländern zu erkennen.

Der Anpassungs- und Wettbewerbsdruck auf dieses Segment der Energietechnik wird zur Verfügbarmachung und Nutzung möglichst breiter und tiefergehender Prozessinformationen führen, eingebettet in die allgemeine industrielle Entwicklung *4.0*.

Prozessinformationen sind ein wesentlicher Schlüssel zur Nutzung von Optimierungspotenzialen und Innovationen. Als unmittelbarer Vorteil können sich

daraus - auch auf kürzeren Zeitskalen - Effizienzsteigerungen und damit auch Ertragsteigerungen ergeben.

Die bisher übliche Bereitstellung und Nutzung von Prozessinformationen fußt vor allem auf den Anforderungen für Arbeitsschutz und Umweltschutz. Der sichere Betrieb der Anlage steht im Fokus. Dies sind bewährte und hochwertige Standards. Die erfassten Prozessinformationen werden archiviert und können - mit einem unterschiedlichen Grad an Aufwand - auch rückblickend verfügbar gemacht werden.

Diese Prozessinformationen sind bisher häufig passiv gestellte Datenarchive. Deren Aktivierung, im gleitenden Zeitversatz, zur Bewertung und Hinterfragung der Prozessabläufe öffnet Potenziale zur Optimierung der Verfahrenstechnik und zum Aufdecken von Schwachpunkten.

Dies ist der erste Schritt zu einem 4.0-Ziel.

Ein weiterer Schritt ist die Ermittlung zusätzlicher Prozessinformationen über das notwendige Maß hinaus. Dies erfolgt z. B. durch die Installation von Sensoren oder durch temporär eingebrachte Bauteile (Sonden), die zu den Nebenwirkungen der Brennstoffe (Verschmutzung, Korrosion) Informationen bereitstellen.

## 2. Realisierung erster Schritte

Die erfolgreiche Bereitstellung und Nutzung von Informationen zur Steigerung der Effizienz von wte-Anlagen wird in erster Linie nicht von den Betrieben selbst vollzogen, sondern typischerweise als Dienstleistung externer Spezialisten eingebunden. Entscheidend ist hier eine möglichst umfangreiche Erfahrung der Experten und ein spezifisches Handwerkszeug, u. a. in Form von Bilanzierungsprogrammen, Sensoren und Sonden. Da es sich hierbei um Erweiterungen von bestehender Verfahrenstechnik handelt, sind diese Dienstleistungen (noch) nicht im Wettbewerb verankert. Vielmehr bilden sich zurzeit Kooperationen zwischen Spezialisten, um möglichst breit aufgestellte informationsbasierte Dienstleistungen anbieten zu können. Zudem flankieren Universitäten und andere Forschungseinrichtungen diese Entwicklungen mit innovativen Vorgehensweisen und Methoden. Es ist zu erwarten, dass sich Experten aus unterschiedlichen Erfahrungsbereichen zusammenfinden, um informationsbasierte Leistungen anbieten zu können.

Ein Beispiel für diese Entwicklungen ist die sich sukzessive aufbauende Kooperation zwischen den Firmen ENVERUM und CheMin. ENVERUM befasst sich mit den Prozessinformationen aus Datenarchiven. CheMin entwickelt und installiert Sensoren und Sonden und wertet diese Informationen aus.

Damit können beide Firmen zusammen bereits mehrere Schritte auf dem Weg zur 4.0-Technik umsetzen.

Die Dynamik dieser Entwicklungen hin zu stärker informationsbasierten und damit effizienteren Prozessen für Abfall-, Ersatzbrennstoff- und Biomasseanlagen ist schwer abzuschätzen. Sicher scheint zu sein, dass dieser Weg begangen werden muss, um im allgemeinen industriellen Fortschritt mithalten zu können.

Die nachfolgenden Beispiele beschreiben die Aufgabenstellungen aus dem Themenkreis von Verschmutzung und Korrosion, die mittels der aktuell verfügbaren Sonden und Sensoren von CheMin bearbeitet werden können. Ein weiterer Beitrag in diesem Tagungsband befasst sich mit den Bilanzierungsmethoden von ENVERUM und beschreibt diesbezügliche Beispiele.

### 3. Korrosion und Verschmutzung

Der Ausgangspunkt für viele der durch Sonden und Sensoren realisierbaren Optimierungen ist, dass thermochemische Prozesse in der Energie- und Verfahrenstechnik, die durch die Kombination aus hohen Temperaturen und einem komplexen chemischen Inventar gekennzeichnet sind, nachteilige Nebenwirkungen aufweisen können, u. a. in Form von Korrosion und Verschmutzung. Hierzu werden nachfolgend einige grundlegende Anmerkungen zu den Mechanismen von Verschmutzung und Korrosion angeführt, die die Notwendigkeit für eine ausgeweitete und verbesserte Prozessinformation nachvollziehbar machen sollen.

Die hohen Temperaturen in der Feuerung von Dampferzeugern transformieren das nicht brennbare, feststoffliche Inventar des Brennstoffs weitestgehend. Dies schließt stoffliche Reaktionen, Phasenübergänge und Gefügeveränderungen ein. Ein Teil dieser so entstandenen Stoffströme wird mit dem aus dem Verbrennungsprozess entstehenden Rauchgas mitgetragen und gelangt so in die nachgeschalteten Verfahrensschritte, z. B. in den Dampferzeuger und die Rauchgasreinigung.

Im Dampferzeuger ergeben sich im Grundsatz sinkende Temperaturen für die Massenströme des Rauchgases. Dieser Trend kann durch lokale Effekte, z. B. des Wärmeübergangs, für Teilvolumina des Rauchgasstroms verstärkt oder vermindert werden. All diesen zwangsläufig gegebenen Temperaturgradienten im Rauchgas müssen die in der Feuerung gebildeten stofflichen Komponenten folgen, d. h. sich durch Phasenübergänge, Reaktionen und Gefügeveränderungen anpassen.

Viele dieser Übergänge und Reaktionen führen zu Partikeln, welche im festen oder flüssigen Aggregatzustand vorliegen können. Diese Stofffrachten des Rauchgases können sich ablagern und ggf. im Belag auch weiter reagieren. Es kommt zur Verschmutzung. Von besonderer Relevanz ist hierbei die Geschwindigkeit der Belagsbildung, insbesondere gesteuert durch die Klebrigkeit von Belags- und Partikeloberflächen.

Zudem sind alle Wärmetauscher des Dampferzeugers Stahloberflächen, die dem umgebenden Rauchgas verfahrensbedingt ein Temperaturgefälle anbieten und damit einen Wärmefluss erzwingen (Strahlung, Konvektion, Konduktion). Durch die steigenden Temperaturen im Dampfmedium der Berührungsheizflächen steigt auch die Temperatur auf den Oberflächen der Wärmetauscher und damit sinkt die Wärmestromdichte.

Die Prozesse der Belagsbildung und der ggf. daran gekoppelten Korrosion führen zur Ausbildung eines lagenweise, senkrecht zur Wärmeströmung angeordneten Schichtenstapels (Abbildungen 1, 2 und 3). Es ergibt sich eine hochkomplexe Mikromilieusituation, die kleinräumig unterschiedliche Korrosionsprozesse her-

vorrufen kann, die zudem mit stark schwankender Dynamik wirken.

Beläge, die auf den Wärmetauscheroberflächen wachsen, sind zwangsläufig auch Wärmeleiter. Im Belag bildet sich ein Temperaturgradient, abhängig von den stofflichen Eigenschaften des Belags, der Porosität, der Wärmestromdichte und der Belagsdicke aus.

Dieser Temperaturgradient formt Temperaturzonen im Belag und trägt damit dazu bei, dass sich bestimmte stoffliche Komponenten des Belags je nach deren thermodynamischen Merkmalen umlagern, lokal anreichern und ggf. auch den Aggregatzustand ändern, z. B. von fest nach gasförmig.

Am Ende dieser komplexen stofflichen Prozesse - vom Brennstoffbestandteil zum Belagsbestandteil - ergibt sich ein Mikromilieu an der Grenze des Belags zur Werkstoffoberfläche, das Korrosionsprozesse auslösen kann und somit eine Korrosionsfront ausbildet. Von besonderer Relevanz ist hierbei die Dynamik der Korrosion, die ebenfalls eine Funktion der lokalen Temperatur-, Gefüge- und Chemie-Milieus ist.

Thermochemische Prozesse können auf diese Weise vielfältige und kleinräumig unterschiedliche Nebenwirkungen auslösen, die in Form von Verschmutzung und Korrosion erhebliche betriebswirtschaftliche Belastungen bedingen. Diese komplexen Zusammenhänge erfordern möglichst umfangreiche und breit gefächerte Informationen zur Chemie, zur Mineralogie sowie zum Gefüge und zur Textur der belagsbildenden Ablagerungen, der Korrosionsprodukte und der Korrosionsfront. Dies ist die Voraussetzung, um unerwünschte Nebenwirkungen verstehen und vermeiden zu können. Informationen aus Schadensobjekten, Vor-Ort-Beprobungen im Stillstand sowie aus betriebsbegleitenden Sonden und Sensoren sind hierfür wesentliche Hilfsmittel.

Aus Sicht dieser Prozesse gliedert sich der Verfahrensablauf eines mit Abfällen und/oder Biomassen befeuerten Kraftwerks grob in drei thermochemische Milieus. Dies sind:

- a) Hochtemperaturmilieu  
Strahlungswärmeübergang, meist auf Verdampferheizflächen
- b) Mittleres Temperaturmilieu  
Berührungswärmeübergang, meist auf Überhitzerheizflächen
- c) Niedriges Temperaturmilieu  
Wärmetauscher und Bleche am Kesselende und in der Rauchgasreinigung

### **Hochtemperaturmilieu**

Abbildung 1 gibt einen Überblick zu möglichen nachteiligen Wirkungen im Hochtemperaturmilieu. Fotos a), b) und c) zeigen häufige Schadensbilder an Feuerfestzustellungen, wie z. B. oberflächige Abplatzungen, Versätze, Risse und Korrosionsprodukte am Rohr unter der feuerfesten Schutzschicht infolge geschädigter Zustellungen. Die Fotos d) und e) zeigen das typische Schadensbild korrosiver Abzehrung - bedingt durch Salzschmelzenkorrosion - an ge-

claddeten Rohren im verschmutzten und abgereinigten Zustand. In Foto f) ist ein ungeschütztes Rohr mit einer ausgeprägten, kompakten Korrosionsschicht zu sehen, entstanden durch chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion [1].

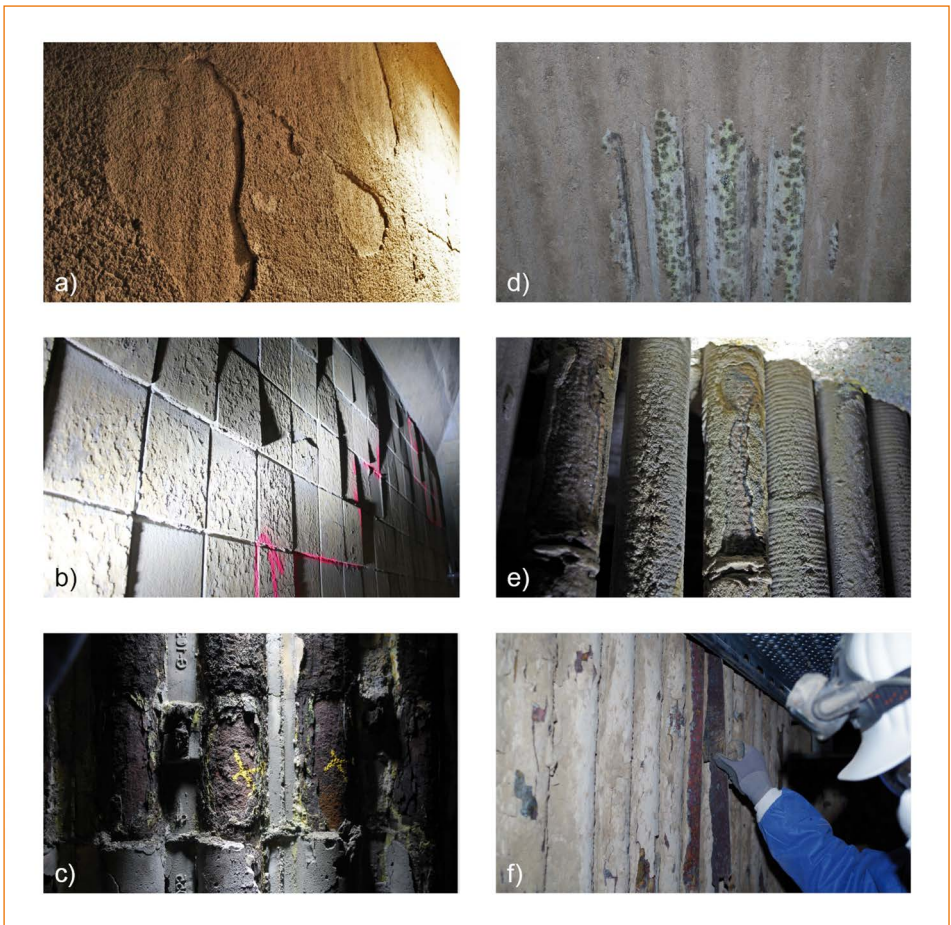


Abb. 1: a) und b) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Schutzschicht (Feuerfestzustellung); c) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Korrosionsfront – Korrosionsprodukte – Schutzschicht (Feuerfestzustellung); d) und e) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Schutzschicht (Cladding) – Korrosionsfront – Korrosionsprodukte – (Belag); f) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Korrosionsfront – Korrosionsprodukte – Belag

### Mittleres Temperaturmilieu

Abbildung 2 gibt einen Überblick zu möglichen nachteiligen Wirkungen im mittleren Temperaturmilieu. Fotos a) und b) zeigen typische Verschmutzungssituationen mit Wechtenwachstum entgegen der Rauchgasrichtung an Wärmeübertragerbauteilen im überwiegend konvektiv und konduktiv geprägten Temperaturmilieu. Foto c) zeigt einen kompakten und flächig ausgeprägten Korrosionsbelag infolge einer chlorinduzierten Hochtemperaturkorrosion. Foto d) zeigt ein gecladdetes Rohr mit einer Schichtdickenreduzierung, her-



vorgerufen durch Salzschnmelzenkorrosion am Ort der höchsten Wärmestromdichte. Im mittleren Temperaturmilieu ergeben sich für die Bauteile mit höheren Werkstofftemperaturen oftmals Milieus, die eine Salzschnmelzenkorrosion ermöglichen. Zudem sind die meist mit Salzen angereicherten Beläge aufgrund eutektisch schmelzender Mischsalze porenarm und damit für chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion geeignet. Die sich ausbildenden Schichten führen bevorzugt zu stabilen Mikromilieus mit einer anhaltenden korrosiven Wirkung.



Abb. 2: a) und b) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Belag; c) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Korrosionsfront – Korrosionsprodukte – Belag; d) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Korrosionsfront – Korrosionsprodukte – (Belag)

### Niedriges Temperaturmilieu

In diesem Temperaturbereich bestehen Schutzschichten, sofern vorhanden, bevorzugt aus Kunststoff oder organischen Beschichtungen. Grundsätzlich muss in diesem Bereich zwischen wärmegetriebenen Systemen (Wasser/Dampf- bzw. luftdurchströmtes Rohr) und Systemen ohne Wärmefluss (ungekühltes bzw. beheiztes Blech) unterschieden werden. Fotos a) und b) in Abbildung 3 zeigen eine Korrosion aufgrund von Deliquescenz an wärmegetriebenen Systemen am Beispiel eines Gasvorwärmers und an den Rohren eines Economizers. Fotos c) und d) bilden Belchbauteile als Beispiele für ungekühlte und unbeheizte Systeme ab.

Das niedrige Temperaturmilieu ist geprägt durch die Taupunktkorrosion und die damit verwandte Deliqueszenzkorrosion. Es handelt sich also um elektrolytisch geprägte Korrosionsmechanismen [2].



Abb. 3: a) bis d) Schichtenaufbau: Rohrwerkstoff – Korrosionsfront – Korrosionsprodukte – Belag

### 4. Informationsbasierte Effizienzsteigerung

Diese in Kapitel 3 skizzierten spezifischen Prozessinformationen, die sich mittels Sonden und Sensoren ermitteln lassen, sind die Grundlage für informationsbasierte Optimierungen auf dem Gebiet von Verschmutzung und Korrosion. Insbesondere durch die Reduzierung bzw. Vermeidung von ungeplanten Stillständen ergeben sich Potenziale zur Effizienzsteigerung.

In die gleiche Richtung wirkt die Nutzung dieser Informationen für die Optimierung der Druckstufe, Endüberhitzung und Reisezeit. Auch das Kosten-Nutzen-Verhältnis der eingesetzten Schutzwerkstoffe lässt sich mit diesen Informationen optimieren.

Die als externe Dienstleister eingebundenen Spezialisten ermitteln und interpretieren diese zusätzlichen Prozessinformationen im Zuge von revisions- und betriebsbegleitenden Maßnahmen. Meist ergeben sich daraus zyklische Optimierungswege mit definierten Haltepunkten zur Überprüfung der erzielten betriebswirtschaftlichen Wirkungen. Diese zyklische Vorgehensweise wird so



lange fortgeführt, bis ein angestrebtes betriebswirtschaftliches Ziel erreicht ist (Abbildungen 4 und 5).

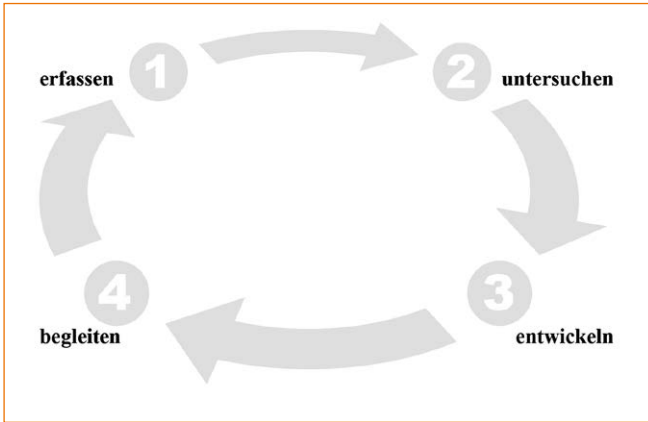


Abb. 4: Zyklische Vorgehensweise zur Optimierung

Aus Schadensuntersuchungen ist bekannt, dass die Mechanismen für die Verschmutzung und Korrosion nur bedingt von einer Anlage auf eine andere Anlage übertragbar sind.

Die gleiche Argumentation gilt auch für die bilanzierende Interpretation aus Datenarchiven und aus aktuellen Betriebsdaten. Auch dies erfordert einen individuellen Zuschnitt auf die jeweilige Anlage.

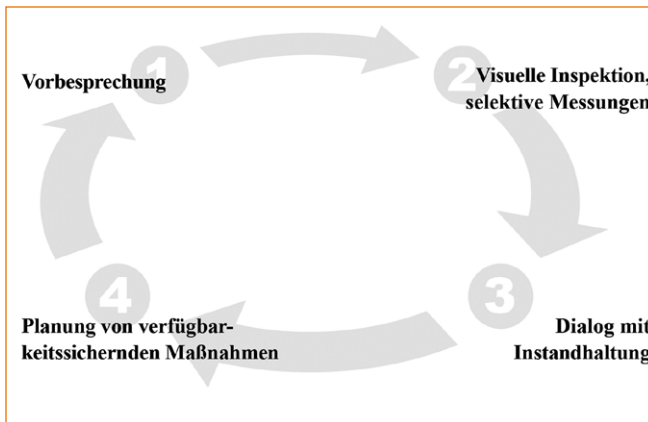


Abb. 5: Zyklische Vorgehensweise zur Vermeidung ungeplanter Stillstände

Der Betreiber bzw. Investor eines Kraftwerks, gefeuert mit schwierigen Brennstoffen wie Abfall, EBS oder Biomassen, muss sich auf diese informationsbasierten Wege einlassen, wenn er deren Potenzial für sich erschließen will. Die eingesetzten Methoden sind (noch) nicht im Bereich des technischen Standards

bzw. der planbaren Wirkung angekommen. Dies ist aber ein durchaus typisches Stadium in industriellen Reifungsprozessen (hier mit dem Schlagwort 4.0 umschrieben).

## 5. Quellen

- [1] Müller, Wolfgang; Kaiser, Marie; Schneider, Dominik; Herzog, Thomas; Magel, Gabi; Spiegel, Wolfgang: Korrosion in altholzgefeuerten Biomasseanlagen. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Michael Beckmann (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 10. Neuruppin: TK Verlag. 2013. S. 359-377.
- [2] Herzog, Thomas; Müller, Wolfgang; Spiegel, Wolfgang; Brell Joos; Molitor, Dominik; Schneider, Dominik: Korrosion durch Taupunkte und deliqueszente Salze im Dampferzeuger und in der Abgasreinigung. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Michael Beckmann (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. 2012. S. 429-460.