

# Dampferzeugerkorrosion eine unendliche Geschichte

Franz W. Albert

## Einleitung

Die Verbrennung von chlorhaltigen festen Brennstoffen und das Thema Korrosion gehören zusammen. Seit mehr als zwei Generationen beschäftigen sich einige der besten Köpfe mit der Ermittlung der Ursachen dieser z.T. verheerenden katastrophalen Korrosionen und den Möglichkeiten, diese Schäden zu vermeiden oder mindestens zu mindern. Es ist gelungen, sowohl bei den metallischen wie mineralischen Werkstoffen bei Konstruktionsvorgaben und im Betriebsregime Grundsätze zu entwickeln, die einen korrosionsarmen Alltag ermöglichen. Neue Anforderungen wird als Folge der Klimadiskussion, die Anhebung des Wirkungsgrads stellen. Mit dem Aufkommen des betriebswirtschaftlichen Zeitalters verliert technisches Wissen an Wert. Daher müssen neue Generationen erst oder wieder lernen, dass sich Naturgesetze allein von einer cleveren Vertragsgestaltung nicht beeindruckt lassen. Dies ist kein Fach- sondern ein Meinungsbeitrag.

## Was war Stand 13.09.2007

Dampferzeugerkorrosion gibt es und wird es geben, solange Dampferzeuger mit Müll oder EBS oder Altholz beheizt werden. Man muss auch heute lange suchen, um eine Anlage ohne Korrosionsschäden zu finden, auch bei Anlagen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden. Die Betreiber der ersten Anlagen führten die Ursache der aggressiven Korrosion auf die extrem schlechte Regelbarkeit der Feuerungsleistung und dem damit parallel gehenden hohen Anteil von reduzierenden Verbindungen im Rauchgas zurück. Da war sicher auch was dran, keine Rohrwand bleibt lange erhalten, wenn sie einem ständigen Wechsel von oxidierenden und reduzierenden Gasen ausgesetzt ist, noch dazu bei hohen Temperaturen. Aber das war es nicht ausschließlich: Vergleichende Brennstoffanalysen erlaubten es in den neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts, das ungünstige Schwefel / Chlor-Verhältnis des Brennstoffs Müll als primäre Ursache für die MVA-spezifische Korrosion zu sichern. Die Sulfatisierung von Alkali- und Erdalkaliverbindungen nahe der Rohroberfläche mit der Bildung des Stahlfressers Eisenchlorid und der Angriff von eutektischen Salzschnmelzen, die direkt oder auf dem Weg vom Chlorid zum Sulfid als Werkzeug der Korrosion arbeiten, sind mittlerweile gesichertes Wissen. Das Wissen, die Bildung dieser ungünstigen Verbindungen einzuschränken und Korrosion treibende, ungünstige Temperaturkombinationen von Rauchgas / Kühlmedium zu vermeiden oder zur Auswahl geeigneter Werkstoffe, ist grundsätzlich vorhanden. Durchzusetzen hat sich noch die Hypothese der hohen Wärmestromdichte als einer von mehreren gewichtigen korrosionsfördernden Einflüssen. Die Anwendung der verfügbaren Erkenntnisse wird aktuell behindert vom Zeitgeist, der Managementmethoden und phantasievollen Vertragsgestaltungen den Vorrang gibt vor pragmatischer Ingenieurarbeit.

Korrosionsvermeidung oder besser Korrosionsminderung ist eine Aufgabe, die wie im Bereich Qualitätssicherung oder Arbeitssicherheit oder frei nach Max Weber's Definition für Politik: « ...das **beharrliche** und ausdauernde **Bohren dicker Bretter** bedeutet », und das alle Tage.

## Immer und in jeder Anlage gültige Feststellungen

- Es gilt weiter das Primat der Feuerung
- Niedrige Leistungsdichte auf dem Rost
- „Kaltes und langes Feuer“
- Vermeidung einer Düsengeometrie zwischen Feuerung und Brennkammer (Strahlpumpeneffekt)
- Möglichst vollständige Füllung des Brennkammerquerschnitts, keine sichtbaren Flammen im ungeschützten Brennkammerbereich
- Keine an ungeschützten Wänden anliegenden Flammen
- Strömungsoptimierte Gestaltung der Kesselzüge und Umlenkungen
- Vermeiden von: Wirbeln, Rauchgasstrahlen, Entmischungen, Totwassergebieten
- Lokale Rauchgas-Geschwindigkeiten über 6 m/s sind auszuschließen, lokale, nicht mittlere Geschwindigkeit
- Feuerfestplatten statt Massen, soweit der DE-Wärmehaushalt es zulässt, hinterlüftete Platten einsetzen
- Nicht mit der Verwendung von Nickelbasislegierungen geizen, und zwar echtem zwei-lagigem Cladding
- Standorte mit verfahrenstechnischen oder kraftwerksspezifischen Wärmesenken wählen
- Wenn das Großhirn das Sagen hat, fossil oder mit flüssigen / gasförmigen Bio-Brennstoffen überhitzen

## Wo stehen wir?

Es gibt eine Epoche vor diesem Datum und danach. Der 1. Juni 2005 war durch die TA Siedlungsabfall ereignismächtig, dieser Termin führte zu einer Umkehrung der Verhältnisse in den MV-Anlagen. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die Anstrengungen der Geschäftsführungen überwiegend darauf gerichtet, Brennstoff, auch nur zu Deckungsbeiträgen, zu akquirieren. Den Betriebsführern war es deshalb - kein Geld, keine Konten - meistens nicht möglich, mit den eingedampften Budgets notwendige und sinnvolle Revisions- und Ertüchtigungsarbeiten durchzusetzen. Nach dem Stichtag - derzeit werden jährlich etwa 17 Mio. Tonnen Müll verbrannt und 5 Mio. Tonnen in MBA oder ähnlichen Verfahren missbraucht /1/ - stellt sich nur noch die Frage, welche sinnvollen Maßnahmen können in immer zu kurzen Stillständen durchgeführt werden. Wie ist eine Verfügbarkeit zu erreichen oder zu halten, die dem hohen und stetigen und nicht endenden Brennstoffstrom genügt. Denn Korrosion ist immer und überall.

Xerxes ließ 480 v.u.Z., nachdem das unruhige Meer seine Schiffsbrücke zerstörte, den Hellespont mit 300 Peitschenhieben bestrafen und mit glühenden Eisenstäben brennen. Das Meer war beeindruckt, die zweite Schiffsbrücke konnte zum Übergang eines Millionenheeres ohne Probleme genutzt werden. Nebenbei, die Baumeister der ersten Schiffsbrücke wurden geköpft. Die Betriebsleiter von Müllverbrennungsanlagen könnten oft genug in tiefem Ingrimme auch den Brennstoff im Bunker peitschen. Zu den Geiselschwingern aus den MVA könnten sich noch die Betreiber von EBS gefeuerten Anlagen und, aus Erfahrung, ebenfalls Leidensträger aus Altholzverbrennungsanlagen gesellen. Es gab in der Zeit einer / meiner Ingenieurgeneration eigentlich nur drei uneingeschränkt belastbare technische Verbesserungen, die nachhaltig zur Anhebung der Verfügbarkeit von MVA führten. Das war die Entdeckung des Cladding, der Auftragsschweißung von Nickelbasislegierungen auf ferritischem Druckteil. Im Feuerfestbereich die Entwicklung der hinterlüfteten Platten und die Wahl von 1.4828

(X15CrNiSi20-12/alloy 309 UNS) für Stifte, Halterungen und Hauben. Im Gegenzug hat der Dolchstoß der 17. BImSchV u.a. mit der 850°C Forderung die inhibitorische Wirkung dieser Entwicklungen nahezu aufgezehrt. Wie immer, wenn sich der Gesetzgeber detailliert in technische Prozesse einbringt, entstehen volkswirtschaftliche Schäden. Hätte sich die 17. BImSchV auf die Vorgabe der Qualität der festen, flüssigen oder gasförmigen Emissionen beschränkt, wir müssten Korrosion nur als Nebenthema behandeln. Mein Beitrag bildet u.a. die Aufforderung, sich mit diesen drei Verbesserungen nicht zufrieden zu geben, sondern die vierte, fünfte und n-te Verbesserung zu entwickeln, neben Korrosionsminderung auch den Brennstoffnutzungsgrad anzuheben und darüber auch zu berichten.

## Klarheit und gutes Zusammenwirken

Da gibt es doch Wiedergänger aus den siebziger und achtziger Jahren. Aus einer Zeit als keine Anlage nie nicht Probleme hatte, keine Korrosion und mindestens 100% Vollast-Verfügbarkeit nachweisen konnte. Wenn nicht, dann wurden die Probleme immer nachhaltig und endgültig gelöst. Diesen Wiedergängern erlaubt ihre Aufstellung in der Hierarchie (Hierarchie = heilige Herrschaft), Mitarbeiter anzuweisen: „ ... doch bitte, wenn ich bitte sage, ist das auch ein Befehl, das Korrosionsproblem auf einer halben DIN A4 Seite zu erläutern, einschließlich Lösungsvorschlägen und Kostenbetrachtung natürlich “. Dieses Vorgehen trägt nicht wirklich zu einer Problemlösung bei. Da wird von den Hierarchen, die in Skythia, an der Wharton University oder sonstwo die Weihen der betriebswirtschaftlichen Metaphysik, den MBA, erhielten und dabei das Verhalten inkorporierten „make a secret out of your business“ und den Technikern untersagten, bei Treffen, die mit Erfahrungsaustausch überschrieben sind, außer dem aktuellen Datum und der Uhrzeit sonstige Erfahrungen dem Teilnehmerkreis vorzutragen. U-neingedenk der Tatsache, dass quid pro quo schon immer und allezeit gilt, wer nicht gibt bekommt auch nichts. Oder den Betriebsingenieuren wird a priori untersagt, an Treffen, die dem Erfahrungsaustausch dienen, teilzunehmen. Man nimmt selbst als Angehöriger der bestimmenden Klasse an diesen Meetings teil, um zum Abschluss die rhetorische Frage ins Auditorium zu schmettern:“ ... und was hat mir diese Veranstaltung jetzt gebracht?“ Nichts natürlich, weil die Beiträge der Praktiker / Empiriker nicht verstanden wurden. Einfach, weil das dazu notwendige Vorwissen fehlt. Aber ausschließlich mit Plausibilitätsüberlegungen sind Korrosionsursachen nicht zu ermitteln, mit Plausibilität kann man möglicherweise ermitteln, wie viele Engel auf einer Nadelspitze Platz haben, aber mehr auch nicht. Obwohl das natürlich eine wichtige Frage ist. Wie die besten Köpfe der Sorbonne im Paris des 13. Jahrhunderts feststellten, sind es drei Engel. Widersprüche wurden zusehends seltener, die Engel-Nadelspitzenfrage war final geklärt, Häretiker wurden verbrannt.

Auch belegbares Wissen kann wenig ausrichten, wenn eine allgemeine Denkblockade vorliegt. Beispiel **helicobacter pylori**: Generationen von Medizinern waren der Meinung, dass dem Magensäureüberschuss nur mit alkalisierenden Mitteln begegnet werden kann, Freudianer waren sich sicher, dass das Magengeschwür auf unbewältigte Kindheitserlebnisse im Vater-Sohn-Konflikt zurückgeführt werden kann. Antipodische Provinzler in Australien mussten im Selbstversuch nachweisen, dass helicobacter pylori sehr wohl den Angriff der Magensäure überlebte und Magengeschwüre auslöst.

Da gibt es im Bereich der MVA-spezifischen Korrosionsangriffe immer noch Meinungscluster, welche die von der Wärmestromdichte getriebene oder von erhöhter Rauchgasgeschwindigkeit angestoßene Korrosion einfach nicht wahrhaben möchten!

Einige der Korrosionsleugner sind Zocker, die es darauf ankommen lassen. Die klassische Antwort, wenn ein Börsenzocker auf die Erfahrung aus dem letzten Crash hingewiesen wird, lautet „dieses Mal ist alles ganz anders“. Der Korrosionszocker, auch wenn er das Selbstverständnis hat, ganz seriös vorzugehen, glaubt nicht, will nicht wahrhaben, dass in der von ihm zu verantwortenden, neu zu errichtenden Anlage das gleiche Korrosionspotential ansteht wie in allen anderen Anlagen auch. *„Bei uns gibt es keine Korrosion, das haben wir vertraglich ausgeschlossen und dazu noch mit einer Pönale abgesichert“*. Der Mann glaubt das wirklich, man nennt das Leidensbild kognitive Dissonanz.

## **Klimawandel, was geht uns da an?**

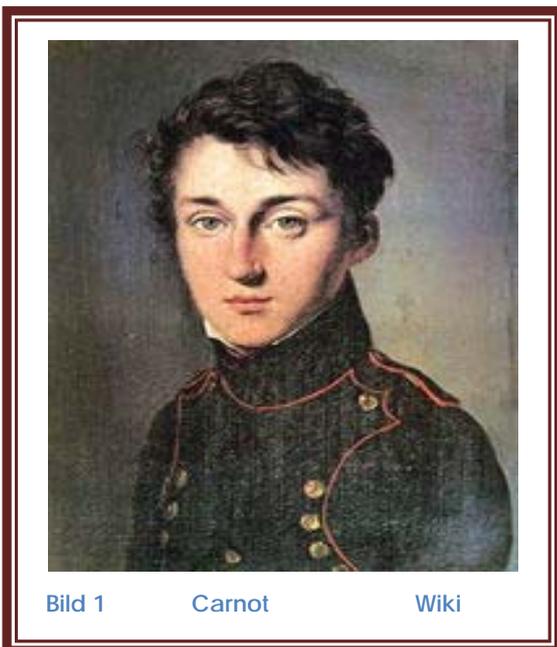
Wissenschaft bedeutet, Fragen zu stellen, das hat mich Prof. Vogg gelehrt, einer der Dioxinpäpste, wie man damals sagte, bei seinen never ending Untersuchungen zur Bildung von halogenisierten Kohlenwasserstoffverbindungen bei der Müllverbrennung, mit Sätzen wie: „...und dann habe ich meine Betriebsleiter gefragt und die wussten mir keine Antwort“. „Hoppla“, dachte ich oft genug, eigentlich wollte ich armes Frontschwein von dem Wissenschaftler Antworten erhalten. Altbekannte Phänomene mit neuen Fragestellungen zu beleuchten führt auch zu neuen Erkenntnissen und ich bringe den Klimawandel mit der Müllverbrennung und weiter mit der Energiegewinnung und den damit sicher nicht zurückgehenden MVA-Korrosionsproblemen in Zusammenhang. Es gibt kontroverse Meinungen zum Klimawandel, ich neige auch eher zu der skeptischen Fraktion, die davon ausgeht, dass zwar ein Klimawandel stattfindet aber diese klimatischen Schwingungen schon immer, d.h. so weit wie die Wissenschaft erdgeschichtlich zurücksehen kann, stattfanden (Dansgaard-Oeschger-Ereignis: Kalt-Warm- Zyklus mit einer Periode von ca.1500 Jahren, Temperaturanstieg in Grönland um +10K binnen weniger Jahrzehnte). Aber wir dürfen uns aus zwei Gründen hier nicht irren, zunächst das Ereignis selbst, und auch um denen zuvor zu kommen, welche aus dem sicheren klimatologischen Weltuntergang beliebige Rechtfertigungsgrade für die Errichtung der Diktatur der Klimophilen ableiten werden. Was ist eine beliebige persönliche Freiheitsbeschränkung verglichen mit der Abwendung des Weltuntergangs? Wie wurden 82 Millionen Deutsche von den Dosenfürsten wegen Pfand oder NICHT-Pfandverpackungen geschurigelt, was erwartet uns erst, wenn die ganze Welt gerettet werden muss? Ablasshandel und Inquisition geben hier anschauliche Hinweise.

Also sehen auch wir Müllverbrenner, dass die von uns ausgelegten und betriebenen Anlagen klimafreundlich sind. Nicht klimafreundlich handelt die Fraktion der von Gutmenschentum beseelten Verrotter, die biogene Verbindungen - aus energierelevanter Sicht Brennstoff - ohne Ausnutzung des Energiepotentials, ohne Substitution von fossilen Brennstoffen den Bakterien und Pilzen zur Erzeugung von zusätzlichem Kohlendioxid ausliefern. Wobei es scheint, als hätten diese Verfahren im Großversuch unter Vernichtung von Volksvermögen sowohl unter technischen wie kaufmännischen Gesichtspunkten den Nachweis des Versagens erbracht. So kamen im

Nahbereich der MVA Mannheim und Stuttgart, nämlich in Buchen und Heilbronn, zwei dieser Rotteanlagen nie aus der Inbetriebnahmephase und wurden letztlich wegen Geruchsproblemen und nicht ausreichender Geostabilität des Endprodukts ersatzlos stillgelegt. Ein Umstand, der das Land Baden-Württemberg entgegen der politischen Zielsetzung wieder zum Müllexport zwingt. Um zu den von uns zu verantwortenden Anlagen zurückzukehren: wir müssen den Brennstoffnutzungsgrad anheben, und zwar auch bei den Anlagen, welchen der Unversand und die Feigheit der politischen Entscheidungsgremien Standorte auf der grünen Wiese zuteilten. Dort, wo auch bei beliebiger Aggregateanhäufung keine Kraftwärmekopplung bewirkt werden kann, sondern letztlich ein Luko die Wärmesenke abbildet. KWK, die andernorts - nahezu als Gottesgeschenk - einen komfortablen Brennstoffnutzungsgrad ermöglicht. Genau bei diesen Anlagen muss es auch möglich sein, Energienutzungsgrade zu erreichen, die unter der Fragestellung Klimawandel uns ermöglichen, den aufrechten Gang beizubehalten.

## Thermodynamik

Nicht, um im Kreis von Kraftwerkern zu belehren, das wäre albern, aber um einiges zurückzurufen, einige Worte zu dem im Kraftwerk ablaufenden Kreisprozess. Müllverbrennungsanlagen sind, wenn sie mit dem Kopf aufgebaut wurden Kraftwerke. Wenn nicht, dann werden die Anlagen und deren Betriebsführungen auch wie Müllschlucker behandelt. Thermodynamisches Wissen scheint in den MVA nicht mehr durchgängig vorhanden zu



sein. Bauingenieure, Chemiker, Verfahrenstechniker, Maschinenbauer alle Sparten sind im Bereich der thermischen Abfallbehandlung zu finden. Da ist eine seltsame Hinwendung zur Kabbalistik zu beobachten, da werden Bilanzgrenzen verächtlich gemacht, profundes Wissen niederpolemisiert und Wirkungsgrade durch Kennzahlen ersetzt, die mit scholastischer Begründung schon mal Brennstoffnutzungsgrade von über 100% ausweisen. Auslöser für diese Exkursion sind eigentlich die zu verschiedenen Anlässen zu hörenden begründeten, aber seltsamen Fragen: Wozu überhaupt diese hohen Dampf-Temperaturen, die doch nur Betriebsstörungen, Verfügbarkeitseinbrüche und letztlich Kosten verursachen und was geschieht eigentlich mit der Energie der Wassertropfen im Abdampf? Oder: ist es den EVU nicht vollständig gleichgültig, wie viel Strom Müllverbrennungsanlagen in die

Netze einspeisen? Eben nicht, insbesondere wenn ein EVU als Eigentümer und Betreiber der MVA agiert. Sollte der Tag herannahen, dass MVA eine den Holzkisten vergleichbare Vergütung für die eingespeiste Kilowattstunde bekommen, *schon der Gedanke: glitzernde Augen allüberall*, dann steigt aber der Wirkungsgrad.

Wärmeenergie wird mit dem Vehikel Wasserdampf seit dem 18. Jahrhundert mit der Wärmekraftmaschine Dampfmaschine und im Übergang vom 19. zum 20. Jahrhundert mit Turbinen in mechanisch / elektrische Energie umgesetzt. Die Anfänge lagen ausschließlich in der Empirie, es klingen Namen wie Newcomen, Watt, Ste-

venson, alles Maschinenbauer, Schrauber eben. Die theoretischen Grundlagen zum Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen hat zuerst **Nicolas Léonard Sadi Carnot** (\*1. Juni 1796; † 24. August 1832), Bild 1, Anfang des 19. Jahrhunderts formuliert. Wobei Carnot seiner Zeit so weit voraus war, dass seine Formulierung erst eine Generation später verstanden wurde. Carnot war nicht nur Ingenieuroffizier im Geniecorps der französischen Armee, er war Genie. Seine Beobachtung von Dampfmaschinen erlaubte ihm die Feststellung, dass der physikalisch erreichbare Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen abhängig ist vom Temperaturgefälle des Arbeitsmediums. Da Endtemperatur nie niedriger sein kann als die Umgebungstemperatur, ist der Wirkungsgrad eigentlich nur mit der Anhebung der Ausgangstemperatur zu steigern. Was wir Ingenieure meistens unter dem Wirkungsgrad verstehen, ist der technische Wirkungsgrad, der sich mit apparativem und finanziellem Aufwand mühsam dem Carnotwirkungsgrad der vollkommenen, verlustfreien Maschine annähert, aber nie erreichen wird.

Es gilt:  $\eta_c = 1 - \frac{T_u}{T_o}$   $T_u$ : Umgebungstemperatur;  $T_o$ : Frischdampf Temperatur

Carnots Veröffentlichung wurde von Clausius als erste Beweisführung des zweiten Hauptsatzes gewürdigt.

Tabelle 1 zeigt den Anstieg des Carnotwirkungsgrad mit der Anhebung der Frischdampf Temperatur

Frischdampf Temperatur	300	350	400	450	500
Umgebungstemperatur	20	20	20	20	20
Carnotwirkungsgrad (%)	49	53	56	59	62

Tabelle 1

Mit der Anhebung der Frischdampf Temperatur von 300°C auf 500°C steigt der Carnotwirkungsgrad um 13 Prozentpunkte bzw. um 26%. Auf was warten wir?

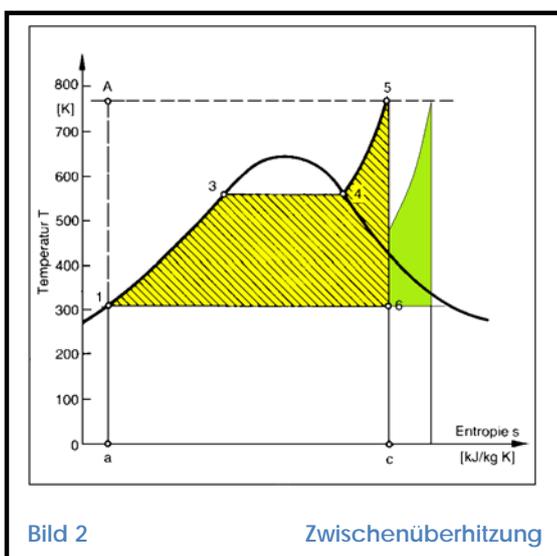


Bild 2

Zwischenüberhitzung

Außer dass hier ein interessanter Abschnitt aus der Wissenschaftshistorie angerissen ist, hat das Thema auch Relevanz auf die Bilanzen der müllgefeuerten Energiezentralen, weil die hohen Temperaturen auch den Erlös anheben. In 2006 wurden an der EEX für die  $MWh_{base}$  51,- € bezahlt, im Mittel von 2007 bisher 55,- € /  $MWh_{base}$ . Derzeit befindet sich unser Wirtschaftszweig in der noch ansteigenden Phase eines Schweinezyklus, wer derzeit Verbrennungsleistung anbieten kann, generiert nahezu automatisch Gewinne, das Geld strömt hier wie Wasser fließt, wenn man den Hahn aufdreht. Was natürlich dazu veranlasst, zusätzliche Anlagen zu bau-

en, die in wenigen Jahren bei abfallendem Schweinezyklus nur mit Preiszugeständnissen auszulasten sind. Was dann bleibt sind die Anlagenkosten, aber wenn sie richtig aufgebaut sind, auch eine optimierte Stromerzeugung.

Der Erlös für den Strom wird in der Zukunft nur noch steigen, weil der Wind weht wann und wo er will, weil China Kohle aufkauft, weil deutsche Kernkraftwerke, die derzeit günstigste Grundlast erzeugen, stillgelegt werden und weil die internationalen Gasanbieter nur darauf warten bis der verbrauchende Markt endlich ideale monopolistische Bedingungen geschaffen hat, die nicht auszunutzen von Dummheit zeugen würde. Technik hilft zunächst - ohne vertiefende Betrachtung - nur die allfälligen Verluste aus Reibung und mangelnder Isolation zu mindern. Kraftwerkstechnik bedeutet aber den Kraftwerksprozess zu carnotisieren, z.B. der Kondensation Wärme vorzuhalten.

Das bedeutet aber primär - und die Betreiber konventioneller, mit fossilen Brennstoffen befeuerter Kraftwerksblöcke machen das mit dem Ziel 700°C vor - die Anhebung der Dampftemperatur. Bei den Müllverbrennern wird dieses Ansinnen Heulen und Zähneknirschen auslösen, nachdem der Leidensweg der Korrosion bisher nur abwärts zu mittleren bis freundlichen Dampftemperaturen führte. Erster Trost: 700°C werden nicht gefordert. Eine Carnotisierung war, die Überhitzung auf 530°C im Müllkessel 4 der MVA Mannheim mit korrosionsfreier Gasfeuerung zu bewerkstelligen und die Verdampfung dem kritischeren Brennstoff Müll zu überlassen. Wenn die Zeit reif gewesen wäre, hätte man noch einen Schritt weitergehen und eine Zwischenüberhitzung einbauen können - auch mit Gas oder biogenen Brennstoffen gefeuert - ohne ein zweites Mal der Verdampfung Enthalpie zu opfern, sondern um grünen Strom zu erzeugen (Bild 2). Die Zeit ist jetzt reif für derartige Lösungen. Ist da nicht eine Anlage in Frankfurt, die sich dem Weg abwärts verweigerte und unter Anwendung höchstwertiger Werkstoffe, Cladding mit Inconel 686, die Dampftemperatur auf 500°C bei 60 bar angehoben hat? Wie man hören kann mit gutem Erfolg. Aber zugegeben, mit der Erhöhung der Frischdampftemperatur wird korrosionsmäßig ein altes Faß neu aufgemacht. En passant, es lohnt sich den exotischen aber hoch beständigen Werkstoff TP 347 HFG in der eigenen Anlage in kritischen Bereichen zumindest auszutesten.

## **Beobachtungen und Vorschläge**

### **Beispiel 1 Klärschlammverbrennung und Additive**

Wie sieht es mit Additiven aus? Die Geheimnisse der Chemie sind vielfältig und für Maschinenbauer meist nur im Hörensagen nachvollziehbar. Es war ganz plausibel, dass man mit Zugabe von Schichtsilikaten Kalium und Natrium im Wasserglas binden kann. In großtechnischen Versuchen gelang auch der Nachweis, dass die Wasserglasbildung eintritt. Allerdings wer will schon niedrig schmelzende Verbindungen im Kessel und hohe Kosten für ein Additiv mit ungewissem Ausgang im Jahrhundert der Betriebswirte rechtfertigen. Wiederholend möchte ich auch auf die Gefahr hin, das Auditorium zu langweilen zwei Ereignisse aus 1990 wiedergeben. Der Kreis der damals mitwirkenden Betriebsleiter ist noch heute in stiller Wut über den politischen Unsinn vereint. Nachdem in einem bundesweiten Forschungsprogramm des BMFT festgestellt wurde, dass mit Zugabe von Schwefel in die



vor Kammerfilterpressen kompensiert. Wegen der nicht durchgehend möglichen Sicherstellung der Schwefelbürde wurde dann auf Schwefelzugabe direkt in die Feuerung umgestellt (als Globuli von 3-10mm Durchmesser). Die SO<sub>2</sub>-Konzentration wird mit der Dosierung im Bereich zwischen 1000 und 2000 mg/m<sup>3</sup> gehalten. Bisher, und das sind nahe 16 Betriebsjahre, ist von Korrosion und Erosion im Dampferzeuger nicht eine einzige Betriebsstörung ausgegangen.

An diese erfolgreiche Betriebsführung muss eine zweite jetzt wissenschaftliche Beobachtung an verschiedenen Müllverbrennungsanlagen angehängt werden. In systematischer Beprobung der Rauchgase mehrerer Müllverbrennungseinheiten wurde der spezifische Feststoffgehalt ermittelt. Der Feststoff wurde analysiert und unterteilt in inerten Flugstaub (Asche) und in Salze. Das Ergebnis sind die allgemein vergleichbaren Asche-Salz-Propportionen ASP (Bild 4). Gewichtet am Korrosionsbefall der Anlagen kann bereits jetzt aus dem ASP von einem hohen Salzanteil die Korrosionsträchtigkeit des von der Feuerung und Brennstoff ausgehenden Feststoffstroms abgeleitet werden.

Das ASP-Verhältnis kann, wie Chemin dargestellt hat, in Grenzen durch geeignete Feuerführung „auf dem Rost“ durch Feuerlage und Feuerlänge positiv im Hinblick auf ASP beeinflusst werden. Positiv bedeutet hier der Ascheanteil übersteigt die Salze um ein Wesentliches. Natürlich ist das nicht von allen Rostkonstruktionen zu erbringen, insbesondere dann nicht wenn Rostfelder und Luftzonen nicht deckungsgleich oder in so große Segmente unterteilt sind, dass eine Einflussnahme auf die Feuerlage und Feuerlänge aus diesen konstruktiven Gründen a priori ausgeschlossen ist.

Meine rhetorische Frage: ist die Betriebsführung, wenn ein Salzsieder betrieben werden muss, dann verdammt und der Korrosion hilflos ausgeliefert? Salzsieder sind Roste die relativ unbeeinflussbar ein kurzes hartes Feuer bewirken, eine gute Schlacke erzeugen aber Schwermetalle und Chloride quantitativ austreiben. Nein, ist sie natürlich nicht. Aber hier kann das Mysterium ASP handwerklich zugänglich (**sehen – erkennen - begreifen - handeln**) gemacht werden, in Handlungsfähigkeit gewandelt werden. Die Beobachtungen in der südwestdeutschen Klärschlammverbrennung geben doch ebenfalls Hoffnung. Wenn die Feuerungskonstruktion nur geringe Aschebildung zulässt, dann holt man sich Asche und möglichst silikatisch-sulfatische Asche, Chloride gibt's eh schon im Überfluss. Lassen wir die Asche / Flugstaub, je nach Lage der MVA, Flugstaub aus dem E-Filter eines Steinkohle- oder Braunkohlekraftwerks sein, bei Steinkohle aus einer trockenen Feuerung, nicht Schmelzkammerfeuerung.

Die spez. Oberfläche von Müllkesselstaub liegt in der Größenordnung von 3 m<sup>2</sup>/g, also je Kilogramm eingebrachten Staub bei 3000 m<sup>2</sup>, damit ist mit einer Staubzugabe im Vergleich zu den einigen 100 m<sup>2</sup> Oberfläche der Bündel eine nahezu unendlich große Fläche anzubieten.

Diese Stäube bei maximal Raumtemperatur in den zweiten Zug eines müllgefeuerten Kessel eingeblasen, schaffen mindestens für einige Sekunden eine „Keimfalle“ mit großer Oberfläche und langfristig im Rahmen der erwarteten Wirkung Kondensationskeime für die schmelz- und gasförmig vorliegenden Salzgehalte des RG, die sich erwartungsgemäß auf diese mit den Rohrbündeln konkurrierende Oberfläche stürzen müssten.

## Beispiel 2 Wärmestromdichte und Rauchgasgeschwindigkeit



Bild 5

Lenkblech

Das ist wahrscheinlich mein letzter Versuch, öffentlich die Beheizung als eine der wesentlichen Ursachen für Korrosionsauslösung darzustellen. Obwohl in der Wiederholung die Wahrheit an Wertigkeit verliert, und Unwahrheit unverdientes Gewicht und Glaubwürdigkeit gewinnt, ist das vorgestellte Beispiel so anschaulich, dass ich auf eine Wiederholung nicht verzichten kann. Um beim Müllkessel, im Rahmen der Umwidmung des Endüberhitzers zum Mitteldruck-Sattdampferzeuger, die Endtemperatur des HD-Dampferzeugers zu erhalten, mussten die Pakete des Dampferzeugers natürlich umgeschaltet werden. U.a. wurde im 4. Zug ein Eco-Paket zum Überhitzer mit äußerst moderaten

Prozessparametern, **Rauchgastemperatur um 490-510 °C, Dampftemperatur ÜH-Austritt max. 440 °C (ca. 330°C Eintritt)**, im Gegenstrom geschaltet. Also **nach dem Flinger'schen Korrosionsdiagramm unbedingt im sicheren Bereich**. Doch genau an dieser Stelle zeigten sich Rohrschäden, die nach dem vereinbarten Stand der Technik nicht hätten eintreten dürfen. Das Paket wurde gegen die Rückwand im letzten Viertel direkt nach der Rauchgasumlenkung abgezehrt. Die Abzehrung verursachte Betriebsstörungen mit Nichtverfügbarkeit und Stillstands- und Reparaturkosten. Das Paket war nach der Eco-ÜH-Umschaltung, obwohl der veröffentlichte Stand der Technik eingehalten wurde, ein krankes Kind. Ende 2000 untersuchten wir in einem Modell 1:4 die Strömungsverhältnisse in der Umlenkung. Wie befürchtet, lag die Strömung an der Rückwand an und beheizte in der Rohrlänge ungleichgewichtig das Überhitzerbündel. Anfang 2001 wurde in die Umlenkung ein Lenkblech (Bild 5) aus dem Universalmehrzweckwerkstoff 1.4828 montiert und die Abzehrung ist nicht wieder aufgetreten. Also: geringere Beheizung durch Vergleichmäßigung bzw. Absenkung der Strömungsgeschwindigkeit. Oder auf meine Hypothese eingestimmt: bei gleichen Rauchgas - und Wandtemperaturen senkt eine geringere Wärmestromdichte die Korrosionsrate. Um den Gedanken gleich zu unterdrücken, die Abzehrung war **keine** Erosion.

### 2.2 Auswirkung einer Erhöhung der Wärmestromdichte

Das Beispiel ist ein Beweis, dass mit erhöhter Wärmestromdichte der bisher schlafende Tiger Korrosion zur Aktivität provoziert werden kann. Oder ein Beispiel für die Allgemeingültigkeit des zweiten Hauptsatzes: alles hat seinen Preis, man bekommt nichts geschenkt. Man muss sich den Umständen mittelbar nähern.

In einer süddeutschen MVA: ein Müllkessel mit 25 t/h Brennstoffdurchsatz bei 9600 kJ/kg und fossil befeuertem Überhitzer, Inbetriebnahme 1997. Im zweiten Zug sind als Schotten ausgebildete Vorüberhitzer angeordnet, die von Sattdampf auf 370°C anheben, die RG-Anströmung liegt bei 700-750°C. Die Endüberhitzung erfolgt im „Rucksack“ mit Gasfeuer. Im dritten Zug verschmutzte das zweite Ecopaket von unten mit über der Reisezeit

ansteigender Temperatur. Über 500°C stieg die Verschmutzung bzw. der resultierende Druckverlust nahezu quadratisch mit der RG-Temperatur. Es wurden Versuche mit Rütteln, Schütteln, Wasserbläser (Drehrohrbläser) durchgeführt, mit unterschiedlichen Ergebnissen. Letztlich wurden 2004 in den zweiten Zug zwei Schlauchbrausen montiert, welche die Gassen des Schottüberhitzers und die Stirn- und Rückwand auch bestimmungsgemäß

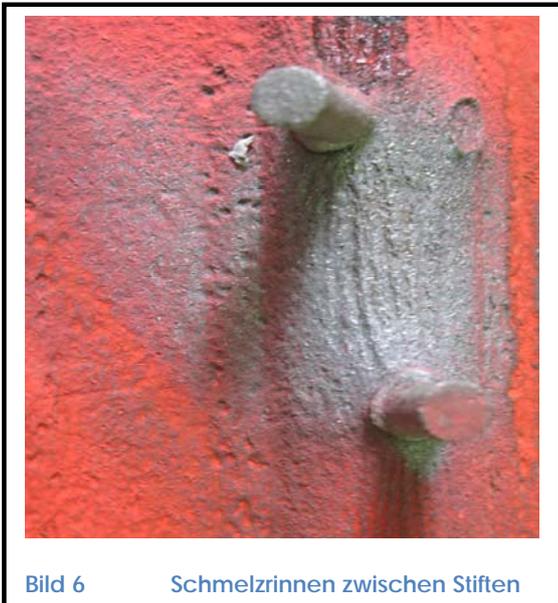


Bild 6 Schmelzrinnen zwischen Stiften

sauber halten. Mit der Schlauchbrause ist es sicher möglich die RG-Austrittstemperatur aus dem zweiten Zug unter 500°C zu begrenzen. Der Effekt war natürlich auf das ständige sauber halten der Wände zurückzuführen. Ohne Reinigung hätte sich eine 10 bis 30 mm starke isolierende Staubschicht ( $\lambda$  ca. 0,2 W/mK) /7/ auf den Schottwänden des Vorüberhitzers und den Verdampferwänden abgelagert, die WLF der Bestampfung liegt bei 7 W/mK. Die periodische Beseitigung der Isolation bedeutet natürlich umgekehrt auch höhere Wärmestromdichte bzw. höhere Beheizung der Schottwände und ein unerwartetes Anspringen der Korrosionsbeschleunigung. Das Bild 6 mit den noch weitgehend erhaltenen Stiften 1.4828 ( $\lambda=15$  W/mK) und den vom Stiffuß ausgehenden Isothermen, die als Schmelzrinnen

deutlich erkennbar sind, ist der "Leider"- Beweis dafür, die (von der Hypothese zur Theorie geronnen) Wärmestromdichte als Korrosionsfaktor neben der Rauchgas- und Wandtemperatur verantwortlich zu machen.



Bild 7

Rußbläserkopf

### Rußbläsermißbrauch:

### Rußbläser und Korrosion

Rußbläser sind immer eine unerwünschte Einrichtung, entsprechend entwickelt sich auch die Vernachlässigung, die bis zur Missachtung entarten kann. Es gibt daher eigentlich nur schlecht und weniger schlecht arbeitende Rußbläser. Da wird auf die Entleerung der verbindenden Leitungen wenig bis keinen Wert gelegt; da findet die Anwärmung des Dampfsystems ohne Überwachung

statt, so dass Restkondensat bis zu den Lanzen mitgerissen wird. Da erlaubt man den Lanzen ein Eigenleben als Thermosiphon, der dann bis zu dem inneren Düsenüberstand mit Rauchgaskondensat angefüllt ist. Das absolut Größte in Anlagen mit kritischem Brennstoff ist natürlich die Empfehlung und Realisierung, das Rohr- bündel mit dem Blasstrahl zwangs besserer Reinigung zu überstreichen. Bei unseren Brennstoffen: Müll+EBS+Altholz, es ist zum Haare raufen, flugs wird die Oberfläche vom Metall zum Mineral oxidiert und dann kommt ein Blasstrahl, arbeitet mit Schallgeschwindigkeit die Mineralschicht ab, nicht ohne Hinterlassung der Botschaft: obacht, schön weiter mit Chloriden korrodieren und in einer Schicht bin ich wieder da. Kein Mensch

nimmt hier Anstoß, sondern Anlagenbauer und Rußbläserhersteller empfehlen gerade dieses Vorgehen. Eine Klobürste von Rußbläser (Bild 7) mit phallischem Kopf dreht sich, schraubt sich über das Rohrbündel und zerstört Rohr für Rohr. Damit sich das Rohr von dem Stress scheinbar erholen kann, wird mit kunstvollem Getriebe die Anfangsstellung vertrimmt. Das Wissen um das spezifische Bild eines Rußbläserschadens ist sowenig verbreitet, dass die augenscheinlich blanke Rohroberfläche zur Bleichlorid-Ablagerung erklärt wird, sancta simplicita. Nur weil seit etwa vier Jahren bekannt ist, dass Bleichlorid ein ganz böser Eisenfresser ist. Die durch Thermoschock und mechanische Rußbläserwirkung geschädigte Rohroberfläche sieht aus wie verzinnertes Blech, metallisch blank aber nicht hochglänzend. Die erfahrenen Heizer, die es nicht mehr oder immer seltener gibt, konnten derartige Schäden sofort zum Rußbläser zuordnen. Was können wir daraus lernen: Schraubrohbläser sind überall zulässig aber nicht bei Müll oder EBS oder Altholz gefeuerten Dampferzeugern. Das Mittel der Wahl sind Drehrohrbläser welche die Gassen freihalten, Rohre möglichst nicht anstrahlen und dem Saugzug erlauben, bestimmungsgemäß zu arbeiten. Bei der Suche nach Schrifttum zur Rußbläseranordnung war wieder nur die pragmatische Fachliteratur der ex-DDR hilfreich, hier heißt es: „ *Es ist daher zu beachten, dass das Blasmittel nur in die Rohrgassen bläst oder so an der Heizfläche vorbeistreicht, dass die Wandung nicht zu Schaden kommt.*“ /5/. Die Beeinträchtigung des Wärmeübergangs durch die Ablagerung in der Längsteilung, wo sich Karmansche Wirbel nicht ausbilden können, sind für in MVA verschmutzte Bündel bloße Gerüchte, blutleere Theorie, wie Zwahr in eigenen Untersuchungen 2006 nachgewiesen hat.

Gegen Rußbläser sind die Klopferwerke eine richtig archaische Einrichtung: Hammer und Amboss, wie bei den Kelten, und das Faszinierende daran ist, das funktioniert auch, wenn, ja wenn man nur Horizontalzugkessel bauen würde mit Rohrrharfen statt Bündeln, was natürlich wieder andere Nachteile hat. Mit einer Einschränkung: Klopferwerke reinigen auch nur dann ab, wenn die Anhaftungen nicht dadurch zustande kamen, dass der anfliegende Staub noch klebrig war oder eine so geringe Eigenmasse hat, sprich so fein ist, dass er sich von der Beschleunigung aus dem Schlag nicht im Geringsten beschleunigen lässt. Aber das sind andere Themen, die mit Brennstoff und Feuerungsgeometrie in Zusammenhang gebracht werden müssen.

### **Unkonventioneller Vorschlag**

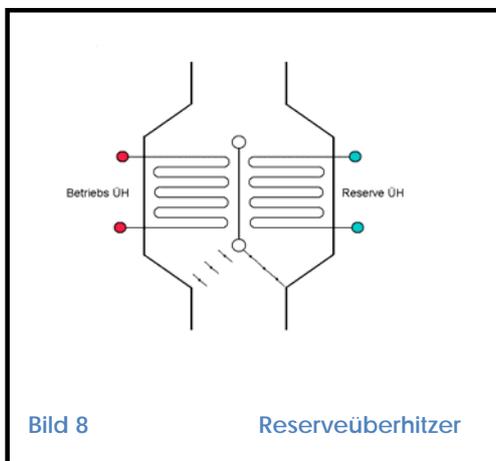
Als junger Ingenieur habe ich an der Errichtung von Kernkraftwerken mitgearbeitet, die jetzt absehbar geschleift werden: Philippsburg, Isar 1, Biblis A+B und an Gundremmingen B/C, die Blöcke die noch die längste Zeit am Netz bleiben werden.

Damals begann, was heute deutscher Nationalsport ist: KKW verdreschen, keiner blickt so richtig durch, aber jedermann hat eine fundierte Meinung und zwar dagegen. Ein Thema damals waren Risse, die nicht sein durften und um deren Wertung heftig gestritten wurde. Alles was geschweißt oder gegossen ist, ob Metall oder Beton, hat Risse, mindestens Mikrorisse. Ein Mitglied der Reaktorsicherheitskommission prägte, damals war man als Angehöriger der Kriegsgeneration noch der deutschen Sprache mächtig, den Halbsatz: "... mit Rissen leben" und verteidigte seine Position auch erfolgreich.

Angewandt im Metier der Müllverbrenner könnte der Satz auch lauten: "... mit Korrosion leben", und dennoch hohe Brennstoffnutzungsgrade und hohe Verfügbarkeiten erzielen. Eine Undichte in Stecknadelkopfgröße reicht

ja aus um eine Investition von 100 Mio. € dazu zu verdammen, außer Kosten nichts mehr zu produzieren. Im Kapitel Beobachtungen wurden Maßnahmen gegen Korrosion dargestellt, jetzt propagiere ich den Einweg- oder Wegwerfüberhitzer. Das Rohrmaterial, das im Rauchgas hängt, kann unter dem Gesichtspunkt der geplanten kurzen Einsatzzeit auch aus 16 Mo 3 gefertigt werden, Sammler natürlich ausgenommen.

Angenommen sind zwei Bündel in einem Vertikalzug. Der Vertikalzug ist am Montageort der Überhitzer doppelt so breit, die Überhitzerbündel sind durch eine Verdampferwand getrennt parallel eingehängt. Das erste Paket wird als Überhitzer genutzt das zweite steht (gekühlt?) in Reserve (Bild 8). Beim Versagen des ersten Bündels kann, gemessen an der Reisezeit, nahezu verzögerungsfrei auf das zweite Bündel umgeschaltet werden, das jetzt als Überhitzer betrieben wird. Die Rauchgasanströmung kann mit (Jalousie-) Klappen oder Feuerfestebauten AN - oder AUS geschaltet, zugegeben mehr gedrosselt, werden. Alternativ steht es jedermann frei, die



Überhitzeranordnung und die Kesselumgebung derart zu gestalten, dass die Erneuerung in kürzester Zeit realisiert werden kann. Was dann etwa sieben bis zehn Tage Stillstand bedeutet. Der Reiz der Konstruktion liegt nicht nur in der erhöhten Verfügbarkeit sondern auch in der Freiheit, den Stillstandszeitpunkt selbst zu bestimmen. Der Zwang, den die Anlage auf die Revisionsplanung ausüben kann, wird deutlich eingeschränkt. Denke niemand daran, dass er vertraglich eine Erneuerung in 72 h erzwingen kann, Überhitzer Müll oder EBS gefeuerter Anlagen sind keine Intrexe die sich bei Begehungen blank gewienert präsentieren /6/. Sondern die Kruste aus heißen festen Ablagerungen machen Zeit für ein

aufwendiges Kaltfahren und eine Grundreinigung notwendig, erst danach kann ohne Staubschutz und P3-Filter gearbeitet werden.

Zur wirtschaftlichen Kontrolle:

Die spezifischen Kosten für Überhitzer liegen bei 600 €/m<sup>2</sup> Werkstoff 16 Mo 3; 700 €/m<sup>2</sup> Werkstoff 13 CrMo 44, angenommen wurde  $K = 70-90 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  und  $\Delta\vartheta_m = 150 \text{ K}$ .

Es errechnen sich für den Überhitzer von 450 auf 500°C bei 90t/h DE Leistung und 3,2 MW ÜH Leistung 300.000 € einschließlich Montage, ein Nasenwasser verglichen mit dem ungeplanten Stillstand der Anlage für zehn Tage, oder dem Bau einer Reserveanlage im Verhältnis einmal Reserve für zehn MVA.

Es wäre zu begrüßen, einige der Anregungen ernsthaft zu untersuchen, damit z.B. die Anregung, den Staubgehalt anzuheben, auch wirklich ausgetestet werden könnte. Was wird aus diesen Vorschlägen? Nichts, sie werden nicht einmal überdacht, nicht weil kein Geld da ist oder es an Gewinnen fehlt, aber alles, was ich will, ist alles, aber sofort. Aus unternehmerisch denkenden Geschäftsführern sind Manager geworden, die Sklaven des Jahresplans, die mit dem Instrument Zielvereinbarungen am Nasenring geführt werden, daher kein Risiko, keine Experimente. Niemand sollte sagen, die Anordnung von Reserveüberhitzern sei nicht zu realisieren, der Klasse der Ingenieure ist bei deutbarer Aufgabenformulierung und Akzeptanz alles möglich. Bei fehlender Akzeptanz gelingt auch etwas immer: der Nachweis der Nichtdurchführbarkeit aus wirtschaftlichen Gründen. Die Frage nach den Kosten sollte aber erst am Ende einer Betrachtung behandelt werden.

Korrosion ist real existent und lauert immer, Korrosion ist aber auch nicht grundsätzlich vermeidbar sondern nur zu mindern, aber wir können das. Natürlich nicht durch mehr oder weniger elegante Vertrags-Formulierungen, welche die Not oder Gier der Auftragnehmer mißbrauchen. Sondern durch Gestaltung nach dem bereits vorliegenden Wissen um Korrosionsursachen. Wenn die Anlage wegen eines Korrosionsschadens steht, dann steht sie für Auftraggeber und Auftragnehmer. Aber sie steht in der Wirkung, trotz aller Pönalen, doch viel mehr für den Auftraggeber, oder für den Betriebsführer. Insbesondere zeigt sich, ob eine Zielorientierung vorliegt am Verhalten der Vertragsparteien im Gewährleistungszeitraum. Schlecht, wenn der AG den Zeitraum nur dazu nutzt, Instandhaltungskosten einzusparen und eigentlich an seiner Anlage vorbeisieht, auch schlecht, wenn der Errichter nur auf das Ende der Gewährleistungszeit hin taktiert und bei Schäden keine grundsätzlichen sondern inhaltende Maßnahmen ergreift. Vorbeugende Maßnahmen am Kessel sind bezogen auf die Gesamtanlage ein geringer Aufwand, den Stillstand blockieren bei einlinigen Anlagen eine Investition von >100 Mio. €. Abschließend eine Feststellung mit Ewigkeitscharakter: bei der Abarbeitung von Korrosionsschäden hilft es un-  
gemein, **statt der Schuldigen Ursachen** für die Korrosionsschäden zu **ermitteln**.

#### Literaturverzeichnis

/1/ Alwast, H. (2007). Ersatzbrennstoffmarkt-Entwicklung in Deutschland-Mengen, Preise, Markttendenzen. 19. Kasseler Abfallforum und Bioenergieforum. Kassel.

/2/ Ende des Müllprotektionismus, Staaten wollen Verbrennungsanlagen den Abfallimport erleichtern. (30. Juni 2007). FAZ.

/3/ Krüger, J. (November 1994). Sektionale EDV-gestützte Untersuchungen des Strahlungsraums von MÜllverbrennungsanlagen. VGB Kraftwerkstechnik, S. 978-983.

/4/ Spiegel, W., Müller, W., Gruber, K., & Magel, G. (2005). ASP und Belagssonde-Weiterentwicklung und Erprobung von ASP(Asche-Salz-Proportionen) und Belagssonde. ATAB AG 5. Großlappen.

/5/ von einem Autorenkollektiv (1984) Handbuch für Kesselwärter, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig S.157 ff

/6/ wandschneider+gutjahr(Juni 2005) Zum Energiepotential von KVA in der Schweiz. Baudirektion Kanton Zürich

/7/ Jünger +Gräter (März 2006) Feuerfestabkleidung in Müllheizkraftwerken und Biomasseverbrennungsanlagen; Wärmedurchgangsberechnung mit Verschmutzung.