

Wärmetechnische Auslegung von Kesseln für Verbrennung von Reststoffen–Grundlagen und Korrosionsdiagramm

Dipl.-Ing. N. A. Foster (Baumgarte Boiler Systems GmbH, Bielefeld), Dipl.-Ing. R. Dräger (Martin GmbH, München), Dipl.-Ing. Chr. Daublebsky von Eichhain (Kerntechnik Entwicklung Dynamik, München), Dr.-Ing. R. Warnecke (GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, Schweinfurt)

Einleitung

Seit Jahren werden die Korrosionsmechanismen in Kesselanlagen zur Verbrennung von Reststoffen wie beispielsweise Hausmüll oder Ersatzbrennstoffen (EBS) intensiv untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und die Erkenntnisse aus mehreren Jahrzehnten Kesselbau für und Betriebserfahrungen aus MVA haben zur Entwicklung diverser Kesselkonzepte für die MVA geführt. Trotz aller Forschung und der Bemühung um verbesserte Kesselkonzepte, verursachen der Verschleiß von Kesselheizflächen und die eingeschränkte Verfügbarkeit durch Verschmutzung und Korrosion nach wie vor einen großen Teil der Betriebskosten der Kesselanlagen.

Die wärmetechnische Auslegung einer Kesselanlage erfolgt mit dem Ziel zahlreichen Anforderungen zu genügen. Zu diesen Anforderungen zählen neben zahlreichen Verfahrenparametern unter anderem lange Reisezeiten, hohe Verfügbarkeiten und hohe Standzeiten der Kesselheizflächen. Daneben gibt es zahlreiche andere Forderungen, welche erfüllt werden müssen und die sich auf das Kesselkonzept stark auswirken können.

Der wesentliche Grundstein für eine gut funktionierende und zuverlässige Kesselanlage wird bereits bei der Formulierung der Ausschreibung für eine Kesselanlage durch den Kunden und seine Berater gelegt. Gefolgt wird die Ausschreibung von einer wärmetechnischen Kesselauslegung, welche versucht den Ansprüchen der Ausschreibung gerecht zu werden. Der Anlagenbauer ist häufig gezwungen, Anforderungen aus der Ausschreibung einzuhalten, obwohl diese zu einem (auch hinsichtlich der späteren Betriebskosten der Anlage) ungünstigen Kesselkonzept führen.

Im Rahmen dieses Vortrages werden zunächst die wichtigsten Anforderungen dargestellt, die an einen Dampferzeuger in der MVA gestellt werden. Anschließend wird eine kurze Einführung in die thermodynamischen und wärmetechnischen Auslegungsgrundlagen eines MVA-Kessels gegeben. Ausgehend von diesen Grundlagen soll qualitativ dargestellt werden, wie sich bestimmte Anforderungen und Verfahrensparameter positiv oder negativ auf Korrosion und Belagsbildung im Kessel auswirken können.

Abschließend sollen einige Bewertungskriterien vorgeschlagen werden, welche für den Vergleich von Dampferzeugerkonzepten hinsichtlich ihrer Korrosionsneigung herangezogen werden können. Im Mittelpunkt dieser Betrachtungen soll das Korrosionsdiagramm stehen.

Auforderungen an einen Kessel zur Reststoffverbrennung



Abbildung 1:
Die Eier legende Wollmilchsau

Die Anforderungen die bei der wärmetechnischen Auslegung eines modernen Dampferzeugers sind vielfältig. Sie ergeben sich im Wesentlichen aus drei grundsätzlichen Zielen:

- I. Minimierung der Invest- und Betriebskosten
- II. Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften und Verordnungen
- III. Erstellung eines zuverlässigen verfahrenstechnischen Konzeptes

Die Anforderungen die an den Dampferzeuger gestellt werden lassen sich jeweils einem oder mehreren dieser Ziele zuordnen.

Im Detail sind die Anforderungen die bei der wärmetechnischen Auslegung eines modernen Dampferzeugers vielfältig (**Abbildung 1**):

1. vollständige, saubere und stabile Verbrennung eines extrem heterogenen Brennstoffs unbekannter Zusammensetzung und breitem Brennstoffband
2. Einhaltung einer Verbrennungstemperatur von mind. 850 °C nach letzter Luftzugabe über einen Zeitraum von 2 sec. in allen Lastzuständen (17. BImSchV) und dies möglichst ohne Einsatz der Stützfeuerung.
3. niedrige Wandoberflächentemperaturen im Feuerraum und im ersten Kesselzug zur Vermeidung von Verschlackung.
4. hohe Standzeit der Feuerfestzustellung
5. niedrige Rauchgasmengen
6. niedrige Rauchgasgeschwindigkeiten im Feuerraum und im 1. Kesselzug zur Reduzierung des Staubaustrages aus der Feuerung
7. aber auch Vermeidung zu niedriger Rauchgasgeschwindigkeiten im 1. Zug zu Vermeidung von Rückströmungen
8. großzügige Strahlräume mit niedrigen Rauchgasgeschwindigkeiten und möglichst niedriger Rauchgastemperatur vor den Konvektionsheizflächen.
9. gute Rauchgasmischung vor Eintritt in die Überhitzerheizflächen
10. Vermeidung von Temperatur und Rauchgasgeschwindigkeitsspitzen/Schief lagen vor allem im Bereich der Überhitzer
11. Rauchgastemperatur vor Überhitzer möglichst niedrig
12. moderate Rauchgasgeschwindigkeiten in den Konvektionsheizflächen
13. möglichst hohe Dampfparameter (Druck und Temperatur) über einen großen Lastbereich und über die gesamte Reisezeit des Kessels
14. niedrige und konstante Abgastemperatur über die gesamte Reisezeit es Kessels
15. ein hoher Kesselwirkungsgrad
16. kleine gut zu reinigende und leicht zu reparierende Überhitzerheizflächen
17. Einsatz möglichst einfacher und günstiger Werkstoffe
18. großzügige Rohrteilungen in den Konvektionsheizflächen
19. Berücksichtigung aller konstruktiver Beschränkungen (Festigkeit/Statik der Kessels)
20. einfache Fertigung und Montage
21. Wartungsfreundlichkeit
22. minimaler Platzbedarf, Berücksichtigung der baulichen Rahmenbedingungen
23. hohe Verfügbarkeit der Kesselanlage
24. lange Reisezeit
25. niedriger Heizflächenverschleiß (Korrosion /Erosion)
26. niedrige Betriebsmittelverbräuche
27. niedriger Eigenbedarf (Druckverluste)
28. niedrige Investitionskosten
29. usw.

Hier sollen diejenigen Anforderungen näher beleuchtet werden, welche mit den Ansprüchen bezüglich Reisezeit, Korrosion und daraus resultierend der Verfügbarkeit und den Betriebskosten zusammenhängen.

Zwischen vielen der oben aufgeführten Anforderungen bestehen Beziehungen und gegenläufige Abhängigkeiten. So ist es beispielsweise wünschenswert die korrosionsgefährdeten Überhitzerheizflächen möglichst klein zu halten. Unter Einhaltung der geforderten Heißdampfparameter ist dies aber nur dann möglich, wenn die Überhitzerheizflächen in Bereich hoher Rauchgastemperaturen platziert werden. Dem gegenüber verstärken hohe Rauchgastemperaturen, welche eine Verkleinerung der Heizflächen ermöglichen würden, die Belagsbildung und Korrosion an diesen Flächen. Wichtig ist es hier einen „gesunden“ Kompromiss zwischen Höhe der Rauchgastemperatur und Heizflächengröße zu finden.

Ziel des Betreibers ist es, eine betriebssichere, kostengünstige Anlage zu kaufen, welche langfristig (20 bis 25 Jahre) mit möglichst geringem Aufwand zuverlässig Ihren Dienst tut und nicht mit ständigen Reparatur- und Umbaumaßnahmen zu kämpfen hat. Der Anlagenbauer kann das Betreiberrisiko nur über einen begrenzten Zeitraum mittragen (Gewährleistungszeitraum 2 – 5 Jahre). Danach gehen die Betriebsrisiken auf den Betreiber über. Umso wichtiger ist daher für den Betreiber neben der kommerziellen Bewertung der Investitionskosten eines Kesselkonzeptes auch die technische Bewertung hinsichtlich der Verfahrensparameter und sorgfältige Formulierung von Forderungen an den Kessel, welche sich langfristig auf die Belagsbildung und Korrosion auswirken können.

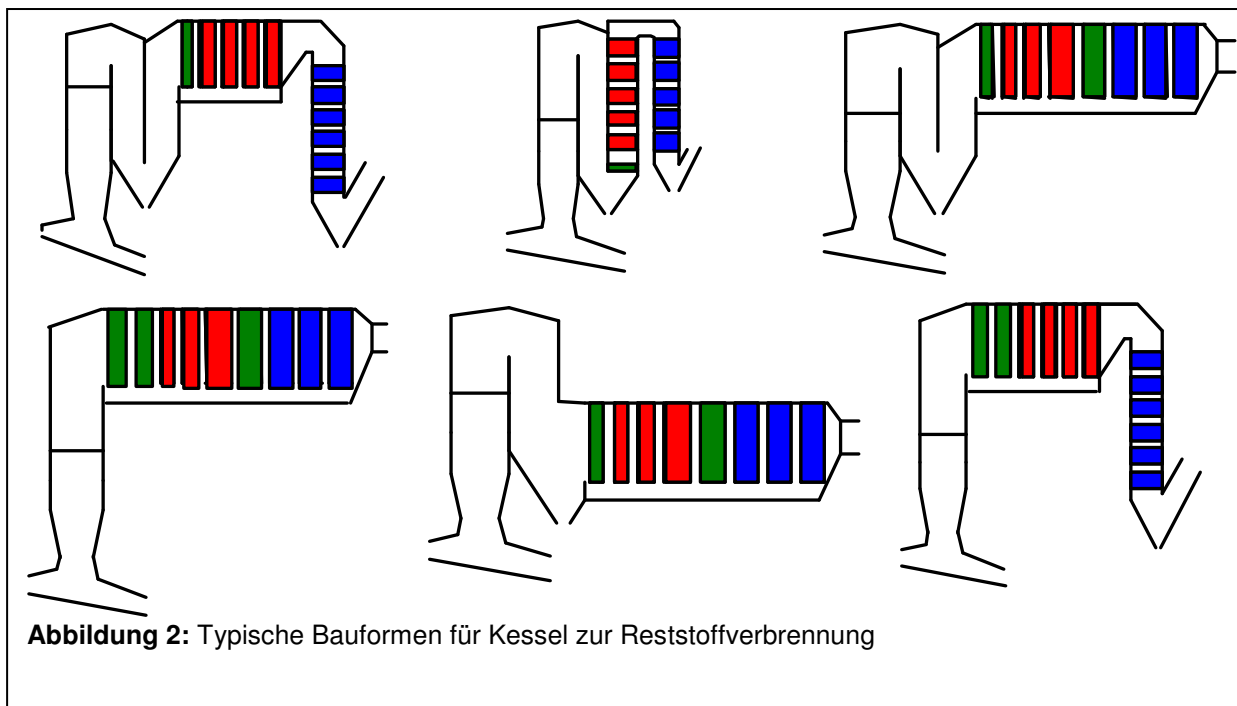
Thermodynamische und wärmetechnische Grundlagen

Die Aufgabe des Kessels

Die Aufgabe des Kessels, unabhängig vom Kesselkonzept (siehe **Abbildung 2**) ist aus thermodynamischer Sicht die Übertragung der Wärme aus der Verbrennung an Wasser welches erhitzt (Economiser), verdampft (Verdampfer) und anschließend überhitzt (Überhitzer) wird.

Durch die Wärmeübertragung wird das Rauchgas von der Verbrennungstemperatur auf eine Abgastemperatur abgekühlt, welche geeignet ist hinter dem Kessel eine Rauchgasreinigungsanlage zu betreiben. Die Wärme aus der Verbrennung eines Reststoffs wird somit z.B. in einem Wasserdampfkreislauf nutzbar gemacht.

Die langfristig dominierende Störgröße für den Betrieb von Kesseln zur Verbrennung von Reststoffen ist die Verschmutzung der Heizflächen (Fouling). Durch die Verschmutzung wird der Wärmeübergang zwischen Rauchgas und Wasser massiv beeinflusst, was im Laufe der Reisezeit zu einer starken Verschiebung der Wärmeaufnahme im Kessel führt. Trotz dieser Verschiebungen in der Wärmeaufnahme sollen die verfahrenstechnische Schnittgrößen wie der Brennstoffmassenstrom, die Abgastemperatur und die Heißdampfparameter möglichst konstant gehalten werden.



Verbrennung

Die Verbrennung von heterogenen Reststoffen wie Hausmüll, Altholz und EBS (Ersatzbrennstoff) stellt eine besondere Herausforderung dar. Eine saubere und gleichmäßige Verbrennung ist ein wesentlicher Baustein für den störungsfreien Kesselbetrieb. Auf die verschiedenen zur Verfügung stehenden Rost-Feuerungskonzepte (Vorschubrost, Gegenschubrost, Walzenrost, Mittelstrom-, Gleichstrom-, Mittelstrom-feuerung etc) soll nicht im Detail eingegangen werden. Gemeinsam ist allen Systemen eine mehr oder minder aufwendige Primär- bzw. Sekundärluftzufuhr. Einige System werden mit Rein- oder Rohgasrezirkulation betrieben, um die Verbrennungstemperaturen zu senken und gleichzeitig mit niedrigeren Luftüberschüssen zu arbeiten.

Wichtige Verfahrensparameter für die Kesselauslegung sind die Rauchgasmenge aus der Feuerung und die adiabate Verbrennungstemperatur. Geht man von einer konstanten adiabaten Verbrennungstemperatur aus, so kann die Rauchgasmenge durch den Kessel bei einer bestimmten Kesselleistung praktisch unabhängig von Brennstoffheizwert oder der evtl. rezirkulierten Rauchgasmenge gehalten werden.

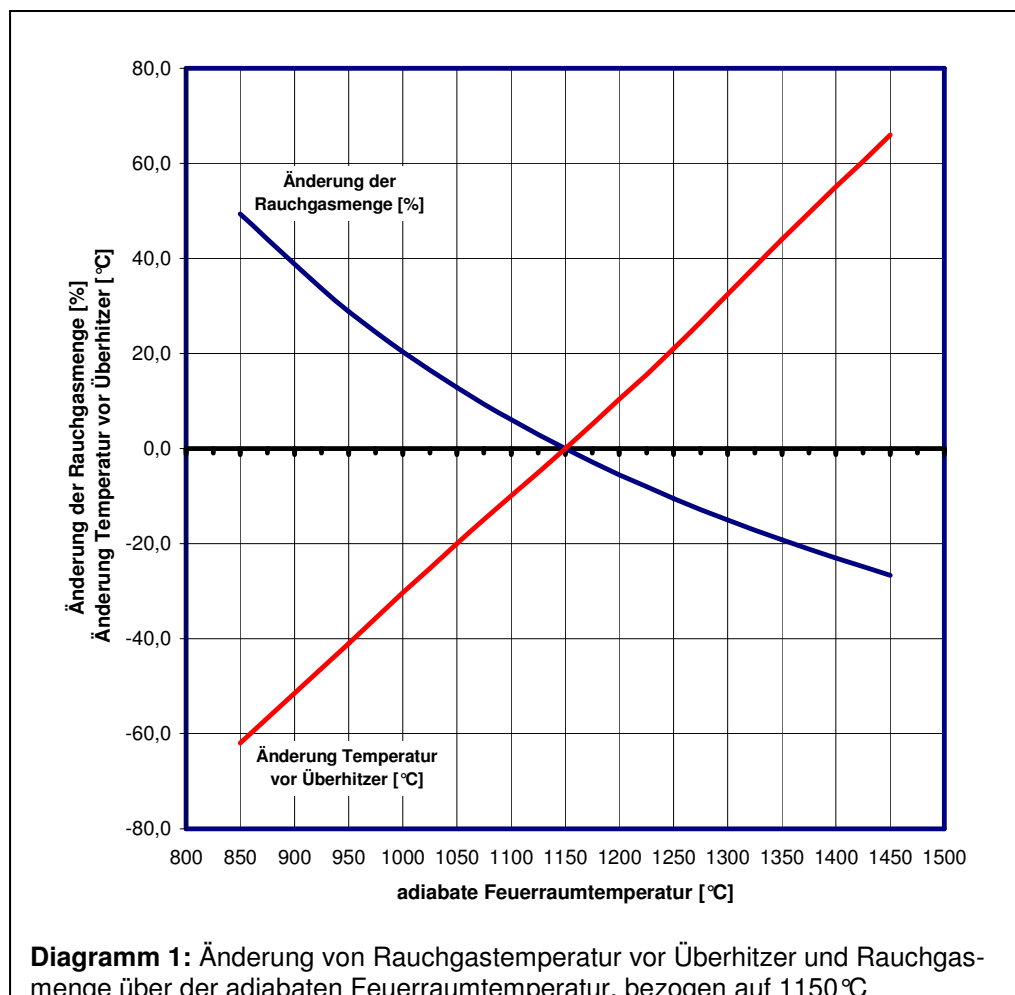
$$\dot{Q} = \dot{m}_{RG} \cdot \bar{c}_{pm, RG} \cdot (t_{adiabat} - t_{RG, Kesselende}) \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\bar{c}_{pm, RG} \approx \text{const.}$$

Die Verbrennungstemperatur hat einen starken Einfluss auf die Standzeit der Feuerfestzustellung im Feuerraum und im 1. Kesselzug und, im Zusammenhang mit der Rauchgasmenge, auf die Dimensionierung des Kessels und der Rauchgasreinigung. Hohe Verbrennungstemperaturen können den Austrag von verdampfenden Aschebestandteilen (z.B. Salzen) begünstigen und damit auch negativen Einfluss auf die Verschmutzung und die Korrosion im Kessel haben. Durch hohe Verbrennungstemperaturen wird die Verschlackung des Feuerraums begünstigt, da einerseits vermehrt schmelzflüssige Asche auftreten, welche an den Heizflächen stark anhaften und dort erstarren und andererseits die Schmelzpunkte der Anhaftungen erreicht werden können.

Bei der Bewertung eines Kesselkonzeptes hinsichtlich Korrosion und Verschmutzung ist somit die Verbrennungstemperatur bzw. die Rauchgasmenge durch den Kessel unbedingt zu berücksichtigen. Eine Absenkung der adiabaten Verbrennungstemperatur von 1.250 °C auf 1.150 °C hat eine Vergrößerung der Rauchgasmenge durch den Kessel von rund 10 % zur Folge, was sich annähernd proportional auf die Größe der Kesselheizflächen auswirkt. Gleichzeitig wird sich die Standzeit der Feuerfestzustellung im Feuerraum erhöhen und der Kessel langsamer verschmutzen, was sich positiv auf die Betriebs- und Instandhaltungskosten auswirkt.

Abgesehen von den veränderten Flugascheigenschaften bei hohen Verbrennungstemperaturen wirken sich diese auch auf die Dimensionierung und Positionierung der Überhitzerheizflächen aus: durch die Reduzierung der Rauchgasmenge und damit verbundenen Erhöhung der Dampfmenge verschiebt sich das Verhältnis von Dampfmenge zu Rauchgasmenge hin zu höheren Werten. Um aber mit weniger Rauchgas mehr Dampf zu überhitzen, sind höhere Rauchgastemperaturen am Eintritt des Überhitzer erforderlich (siehe Diagramm 1).



Die Feuerfestzustellung des Feuerraums

Die Zustellung des Feuerraumes und der Nachverbrennungszone mit keramischen Werkstoffen erfolgt unter 2 Zielsetzungen:

1. Schutz des Kesseldruckteils vor hohen thermischen Belastungen und vor Korrosionsangriff durch aggressive Rauchgasbestandteile
2. Regulierung des Wärmehaushaltes zur Einstellung bestimmter Verbrennungsbedingungen (z.B. 17. BImSchV)

Um Verschlackungen und Verschleiß der Feuerfestmaterialien zu minimieren muss die Oberflächentemperatur der Wände im Feuerraum möglichst niedrig gehalten werden. Niedrige Wandtemperaturen führen zu einer Absenkung der Rauchgastemperaturen in Feuerraum. Der Gesetzgeber (17.BImSchV) fordert aber nach der letzten Verbrennungsluftzugabe die Einhaltung einer Rauchgastemperatur von 850 °C über mindestens 2 sec. Aus diesem Grund ist der Abkühlung der Rauchgase vor allem bei kleinen und mittleren Anlagengrößen Grenzen gesetzt. Es ergeben sich zwei gegenläufige Bestrebungen bei der Feuerfestauslegung: auf der einen Seite werden niedrige Wandtemperaturen durch hochwärmeleitende Gussmassen, Plattensystemen oder sogar nur auftraggeschweißte Flächen aufgebracht, auf der anderen Seite müssen die Wände ausreichen isolierend zugestellt werden, um die 17. BImSchV auch im sauberen, unverschlackten Zustand und bei Teillasten ohne Stützfeuerung einzuhalten, was zum Einsatz isolierender Werkstoffe führt.

Hier entscheiden also die Anforderungen an die Einhaltung der 17.BImSchV, vor allem bei kleinen und mittleren Kesselgrößen, ganz entscheidend über die Qualität der Feuerfestzustellung:

Um eine Einhaltung der 17 BImSchV auch bei Teillasten des Kessels und bei unverschlacktem Feuerraum sichern zu können, ist der Anlagenbauer gezwungen isolierende und weniger haltbare Feuerfestmassen vorzusehen. Großen Einfluss haben in diesem Zusammenhang die evtl. vorhandenen Forderungen der Ausschreibung nach Einhaltung der 17.BImSchV auch bei Teillasten und bei sauberen Kesselheizflächen. Diese führen zwangsläufig zu höher Isolierenden Feuerfestmassen.

Die Erfahrung aus dem Servicegeschäft zeigt, dass seitens der Betreiber bei späteren Umbauten im Bezug auf Einhaltung der 17.BImSchV bei Teillasten im sauberen Zustand erhebliche Abstriche hingenommen werden, um höher wärmeleitende und damit haltbarere Feuerfestsysteme einzusetzen zu können oder sogar auf Teile der Feuerfestzustellung zu verzichten und durch mit Inconel auftragsgeschweißte Flächen zu ersetzen.

Hier können bereits in der Planungsphase die Weichen so gestellt werden, dass von vornherein ein optimiertes Feuerfestsystem möglich wird, wenn beispielsweise akzeptiert wird, dass der Feuerraum zunächst belegt werden muss, um die Bedingungen der 17.BImSchV auch bei Teillasten ohne Stützfeuerung einzuhalten.

Bei großen Kesselanlagen wird das Volumen/Flächenverhältnis günstiger, so dass eine Einhaltung der 17.BImSchV auch mit höher leitenden Feuerfestsystemen weniger problematisch wird.

Zusammenfassen sollte bei der Auswahl des Feuerfestsystems ein intensiver Erfahrungsaustausch zwischen Anlagenbauer und Betreiber (ggf. weiteren Betreibern) erfolgen. Der Schaden durch Betriebsausfälle ist im Zweifelsfalle deutlich höher als der Streitwert des Feuerfestmaterials!

Auslegung der Strahlzüge und der Konvektionsheizflächen vor dem Überhitzer

Die Strahlungszüge und konvektiven Verdampferheizflächen vor den Überhitzerheizflächen von Kesseln zur Reststoffverbrennung werden in der Regel sehr großzügig ausgelegt. Typische Hausmüll- oder EBS-Anlagen haben 1 bis 3 Strahlungs- oder Leerzüge. Aufgrund von z.T. flüssigen Bestandteilen in den Aschepartikeln ist deren Haftvermögen so groß, dass eine Online-Abreinigung von Bündelheizflächen bei Rauchgastemperaturen über 650 °C häufig nur wenig wirksam ist. Trotzdem werden Verdampferbündel in der Regel auch bei deutlich höheren Rauchgastemperaturen eingebaut. Diese Verdampferbündel werden dann allerdings mit sehr großen Querteilungen ausgeführt, um ein schnelles „Zuwachsen“ dieser Heizflächen und damit zu große Rauchgasdruckverluste zu verhindern. Eine Reinigung dieser Heizflächen ist durch Klopfen (Horizontalzug/Tailend) oder Rußblasen (Vertikalzug) nur begrenzt wirksam.

Die Verdampferbündel vor dem Überhitzer werden häufig als Schutzverdampfer oder Wärmefalle bezeichnet und haben den Vorteil, dass sie zeitliche und örtliche Temperaturspitzen abbauen können und zudem eine (wenn auch geringe) strömungsgleichrichtende Wirkung haben.

Wie auch immer Strahlräume und Schutzverdampfer gestaltet sind, Ziel ist es die Rauchgastemperatur vor den Überhitzern so weit abzusenken, dass dort das Korrosionsrisiko minimiert wird. Gleichzeitig darf die Rauchgastemperatur im sauberen Zustand nur so weit abgesenkt werden, dass die Heißdampftemperatur bei gegebenen Wärmeübertragungsflächen gehalten werden kann.

Häufig wird eine Rauchgastemperatur von maximal 650 °C (Ende der Reisezeit) vor dem Überhitzer angestrebt. Diese Temperaturgrenze leitet sich aus der praktischen Beobachtung ab, dass die Überhitzerkorrosion häufig verstärkt unter Belägen auftritt. Diese oft harten und schlecht abzureinigenden Beläge bilden sich erfahrungsgemäß vorwiegend in höheren Rauchgastemperaturbereichen > 650 °C in dem die Aschepartikel teigig und klebrig sind.

Ob diese Temperatur eingehalten werden kann hängt zum einen davon ab, wie groß die Heizflächenreserven vor dem Überhitzer hinsichtlich der geforderten Heißdampftemperatur gewählt werden können und zum anderen davon, wie der Kessel im Laufe der Reisezeit verschmutzt. Hier liegt ein ganz wesentlicher Unsicherheitsfaktor bei der Auslegung von Kesseln für die Reststoffverbrennung. Es ist praktisch nur sehr ungenau vorhersagbar, wie sich die Verschmutzung in den Strahlräumen im Laufe der Reisezeit entwickelt. Es gab und gibt selbstverständlich Erfahrungswerte aus zahlreichen Anlagen, trotzdem können ungünstige Brennstoffzusammensetzungen oder Verbrennungsbedingungen zu extremen Verschmutzungszuständen führen.

Seiten einigen Jahren werden verstärkt nasse online - Reinigungsverfahren in den Strahlzügen eingesetzt (Schlauchreinigungsanlagen, Wasserlanzenbläser). Die Verschmutzung (Fouling) in den Strahlräumen lässt sich durch diese nassen Reinigungsverfahren wenn auch nicht verhindern, so doch deutlich verzögern, was zu einer Verlängerung der Reisezeit führen kann.

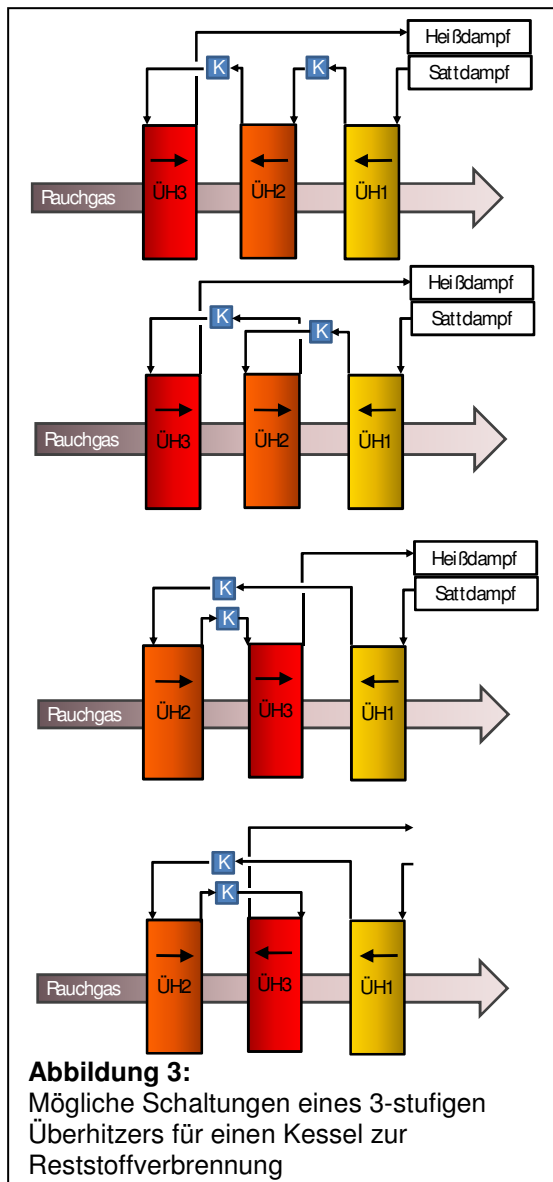
Zu beachten sind neben den Wärmeübergängen auch die Strömungsverhältnisse, die die Vorgänge in den Leerzügen stark beeinflussen können. Der erste Zug sollte Strömungsgeschwindigkeiten > 4 m/s aufweisen und ein möglichst hohes Höhen- zu Tiefe-Verhältnis aufweisen. Ist die Höhe des 1. Zuges gering im Verhältnis zur Kesseltiefe, neigt die Strömung dazu, eine „Kurzschluss-Strömung“ auszuführen, in der das Rauchgas auf dem kürzesten Weg von der Feuerung zum Übertritt in den 2. Zug strömt, wodurch sich eine deutlich verringerte Verweilzeit der Rauchgas, mit allen Konsequenzen (z.B. verminderte Sulfatierung, Strömungsschiefelage) ergibt.

Überhitzerheizflächen

Die Überhitzerheizflächen dienen der Überhitzung des Dampfes von der Siedetemperatur in der Kesseltrommel auf eine geregelte Heißdampftemperatur am Kesselaustritt. In der überwiegenden Anzahl der Kesselanlagen für die Abfall- und EBS-Verbrennung wird der Dampf in konvektiven Überhitzern mit typischen Heißdampfparametern von 320 – 420 °C bei 32 bis 65 bar überhitzt. Es gibt aber auch Beispiele für Anlagen mit Dampftemperaturen bis zu 500 °C. Solche hohen Dampftemperaturen sind nur unter Einsatz sehr hochwertiger Nickelbasis-Legierungen, Schutz durch Feuerfestbestampfung und mit großem Aufwand bei der Instandhaltung möglich.

Typischerweise wird der Überhitzer bei Kesseln für die Reststoffverbrennung in niedrigen Rauchgastemperaturbereichen angeordnet, um Verschlackung und Korrosion zu vermeiden. Damit unterscheiden sie sich deutlich von Überhitzer in Gas, Öl oder Kohlegefeuerten Anlagen in denen die Überhitzerheizflächen möglichst nahe am Feuerraum installiert werden, um die Fläche möglichst klein zu halten.

Thermodynamisch hat die Anordnung der Überhitzer im „kalten“ Bereich des Kessels gravierende Folgen: sowohl Lastschwankungen als auch die Verschmutzung der Heizflächen im Laufe der Reisezeit führen im Bereich der Überhitzer zu starken Veränderungen der Rauchgastemperatur. Gleichzeitig sind die Temperaturdifferenzen zwischen Dampf und Rauchgas verhältnismäßig gering und die Heizflächen der Überhitzer sehr groß, so dass bereits kleine Änderungen der Rauchgastemperatur, durch den starken Einfluss der Temperaturdifferenz auf den Wärmeübergang (siehe Gleichung 1), einen massiven Einfluss auf die übertragene Wärmeleistung im Überhitzer haben.



Die großen Unterschiede bei der Rauchgaseintrittstemperatur und den daraus resultierend großen Schwankungen bei der Wärmeaufnahme in den Überhitzern führt nicht nur zu einem sehr großen Aufwand bei der Heißdampftemperaturregelung, sondern auch dazu, dass der Überhitzer am Anfang der Reisezeit „zu klein“ und am Ende der Reisezeit „zu groß“ ist. Die Wärmeaufnahme verschiebt sich mit der Verschmutzung und steigender Last immer weiter in den hinteren Teil des Kessels, also zu den konvektiven Überhitzern, Verdampfern und Economisern.

Bei Heißdampftemperaturen $> 360^\circ\text{C}$ werden die Überhitzer daher in der Regel 3-stufig aufgebaut. Die Überhitzer werden dann mit Blick auf ihre dampfseitige Reihenfolge Überhitzer 1 (Vorüberhitzer), Überhitzer 2 (Mittelüberhitzer) und Überhitzer 3 (Endüberhitzer) genannt. Zwischen den Überhitzerstufen 1 und 2 bzw. 2 und 3 befinden sich jeweils Dampfkühler (Einspritzkühler), welchen die Dampftemperatur am Austritt der jeweils nachfolgenden Überhitzerstufe regeln.

Die Dampfkühlung erfolgt durch Einspritzen von Speisewasser in den Dampfstrom. Der Einspritzkühlung sind Grenzen gesetzt, da nur bis etwa $10 - 20\text{ K}$ über die Siedetemperatur des Dampfes gekühlt werden kann. Darunter ist die vollständige Verdampfung des Einspritzwassers nicht gewährleistet was zu Thermoschocks und Schädigung der nachfolgenden Heizflächenrohre führen kann. Um eine gute Regelbarkeit der Heißdampftemperatur zu erreichen und um zu vermeiden, dass der Dampf bis ins Nassdampfgebiet hinein gekühlt werden muss, darf der Endüberhitzer hinsichtlich seiner Aufwärmspanne nicht zu groß ausgelegt werden.

Die Gestaltung, Schaltung, Aufteilung und Lage der Überhitzerheizflächen in Kesseln für die Reststoffverbrennung hat sowohl bei Anlagenbauern als auch bei Betreibern und Beratern zu vielfältigen Lösungsansätzen

geführt. Ist der Endüberhitzer der erste Überhitzer im Rauchgasstrom, so wird er in der Regel im Gleichstrom geschaltet. Bei dieser Schaltung wird vermieden, dass die höchste Rauchgastemperatur mit der höchsten Rohrwandtemperatur zusammentreffen, was erfahrungsgemäß zu höchster Korrosion führt. Einige Beispiele für rauchgasseitige Schaltung der Überhitzerstufen sind in Abbildung 3 gegeben.

Die Größe der Überhitzer ermittelt sich aus der kleinsten Last, ab welcher der Kessel am Anfang der Reisezeit die Heißdampftemperatur erreichen soll und der Rauchgastemperatur, die sich dann am Eintritt zum Überhitzer einstellt. Extreme Teillast-/Dampftemperaturanforderungen führen dann aufgrund der fallenden Rauchgastemperaturen, entweder zu extrem großen Überhitzerheizflächen oder zu einer Positionierung der Überhitzer in höheren Rauchgastemperaturbereichen. Beides, große Überhitzerheizflächen und hohe Rauchgastemperaturen, wirkt sich negativ sowohl auf Invest- als auch auf die Instandhaltungs- und Betriebskosten des Kessels aus.

Die Überhitzer werden vorzugsweise als Konvektionsheizflächen ausgeführt und bei Rauchgastemperaturen möglichst unter 650°C (Ende der Reisezeit) angeordnet. Dies gilt für rostgefeuerte Kesselsysteme mit einer typischen Heißdampftemperatur von 400°C . Für höhere Dampftemperaturen oder ungewöhnlich hohe Verbrennungstemperaturen ist u.U. eine Anordnung der Überhitzer bei entsprechend höheren Rauchgastemperaturen, z.B. als Schotten, erforderlich.

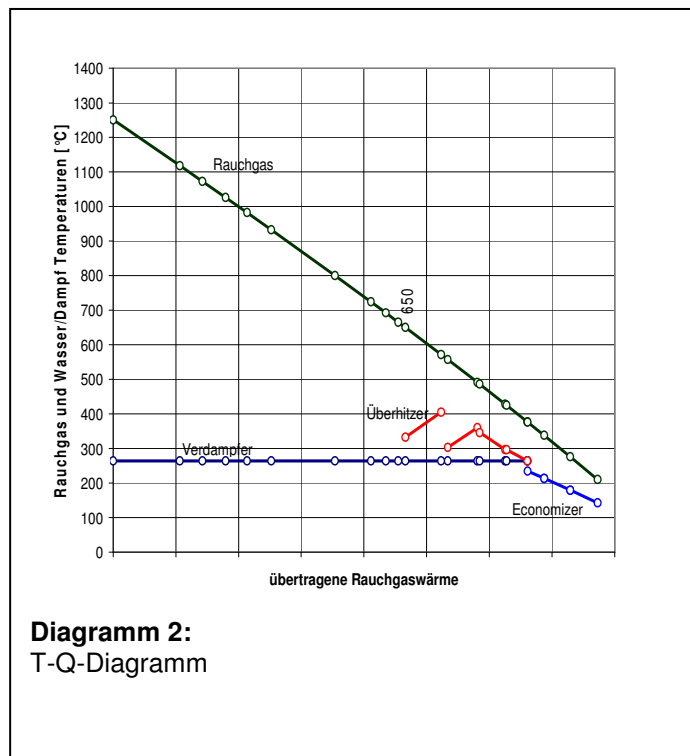
Aufgrund des günstigeren Verhältnisses zwischen Rauchgasmenge/Dampfmenge wirkt sich eine niedrige adiabate Verbrennungstemperatur positiv auf die Positionierung und/oder die Größe des Überhitzers aus.

Grundsätzlich ist auch im konvektiven Wärmeübertragungsbereich die Strömung besonders zu beachten. Erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten können zu erhöhter Korrosion führen.

Nachgeschaltete Verdampfer- und Economiserheizflächen

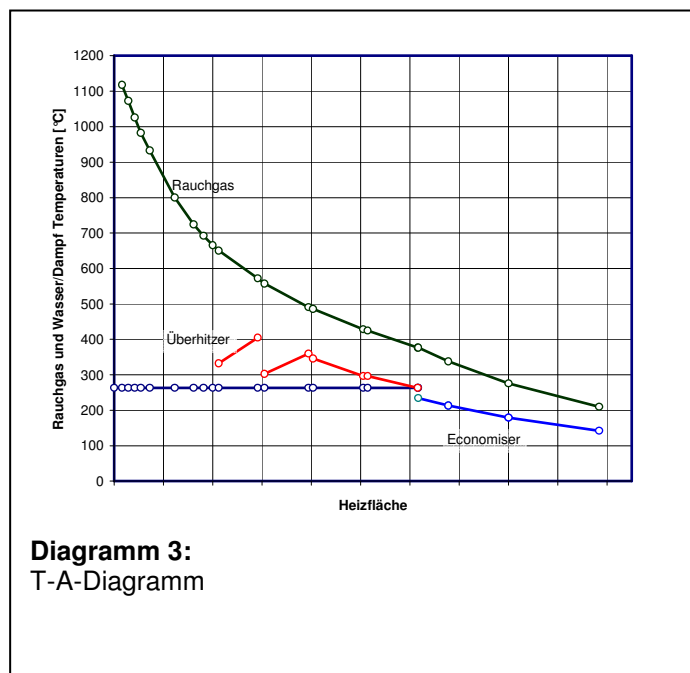
Die Aufgabe des Economisers ist die (geregelt) Abkühlung der Abgase, im Allgemeinen unter die Siedetemperatur im Kesselsystem. Um zu vermeiden, dass der ECO in Verdampfung gerät, was sich bei Economiser in horizontalen Konvektionszügen katastrophal auf die wasserseitige Durchströmung auswirken kann, ist es häufig erforderlich vor dem Economiser Verdampferheizflächen vorzusehen.

In der Regel stellen die hinter den Überhitzern angeordneten konvektiven Verdampfer- und Economiserbündel die flächenmäßig größten Heizflächen des Kessels, obwohl hier nur verhältnismäßig kleiner Teil der Gesamtwärme übertragen wird (Vergleiche **Diagramm 2** und **Diagramm 3**).



Hier haben vertikal durchströmte Economiser (Eco) Vorteile gegenüber horizontalen Systemen da, diese weniger empfindlich auf Verdampfung reagieren und die (wenig effektiven) Verdampferheizflächen nach den Überhitzern entfallen oder zumindest verkleinert werden können. Auch die Fertigung von gewickelten Ecoheizflächen im Vertikalzug ist wesentlich kostengünstiger als die von Ecos in horizontalen Tailendzug.

Hinsichtlich der Hochtemperaturkorrosion und Erosion treten in den nachgeschalteten Verdampfer- und Economiserheizflächen praktisch keine Probleme auf. Hinsichtlich möglicher Unterschreitungen des Säuretaupunktes und der daraus resultierenden Gefahr einer Säurekorrosion werden die Economiser i.d.R. mit Speisewassertemperaturen von 130 °C und höher beaufschlagt. Es gibt Erfahrungen mit Kesselanlagen für die Verbrennung mit EBS (hochkalorische Ersatzbrennstoffe) deren Economiser über längere Zeiträume mit 105 °C betrieben wurden und wo keine säurebedingten Korrosionen festgestellt werden konnten. Eine derartige Betriebsweise ist allerdings mit Vorsicht zu genießen und vor allem hinsichtlich schwankender SO₂-Beladungen im Rohgas (H₂SO₄-Bildung mit Säurekorrosion) ist erhöhte Aufmerksamkeit angebracht.

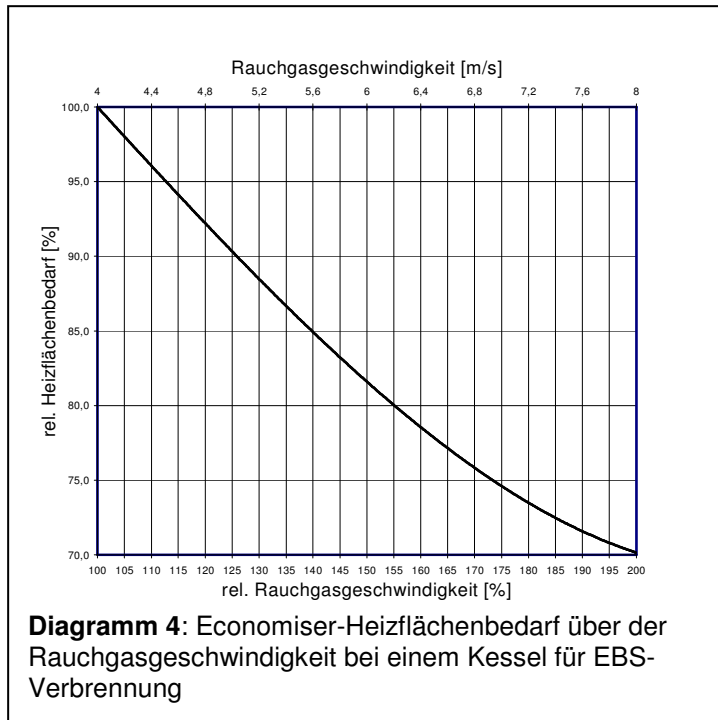


Die Größe der Verdampfer-/Economiserheizflächen wird im wesentlich durch folgende Parameter bestimmt:

- Annahmen bezüglich der Heizflächenverschmutzung (Foulingfaktoren / Heizflächenwirksamkeiten / Heizflächenreserven)
- geforderte Abgastemperatur am Kesselende am Ende der Reisezeit und Speisewassertemperatur
- Rauchgasgeschwindigkeit

In **Diagramm 4** ist beispielhaft der Einfluss der Rauchgasgeschwindigkeit dargestellt. Es zeigt sich dass die Rauchgasgeschwindigkeit von entscheidender Bedeutung für die Dimensionierung der Verdampfer- und ECO-Heizflächen ist. Bei Kessel mit horizontalem Konvektionszug (auch als Dackel- oder Tailend-Kessel bezeichnet) ist die Rauchgasgeschwindigkeit konstruktionsbedingt

Bei Kessel mit horizontalem Konvektionszug (auch als Dackel- oder Tailend-Kessel bezeichnet) ist die Rauchgasgeschwindigkeit konstruktionsbedingt



relativ niedrig. Somit werden, vor allem für niedrige Abgastemperaturen, sehr große Economiserheizflächen benötigt (**Diagramm 4**).

In den letzten Jahren werden zunehmend trockene oder halbtrockene Rauchgasreinigungungsverfahren angewendet. Für diese Verfahren sind niedrige Abgastemperaturen erforderlich, was dazu geführt hat, dass verstärkt vertikal durchströmte Economiser eingesetzt werden. In diesen lassen sich konstruktionsbedingt deutlich höhere Rauchgasgeschwindigkeiten realisieren, was sich, wie auch die einfachere Herstellung, positiv auf den Investitionsbedarf auswirkt. Für die Reinigung solcher vertikaler Economiser bieten sich Dampf-russbläser oder Kugelregenanlagen (letztere vorzugsweise bei Rauchgastemperaturen von merklich < 450 °C) an.

Bei konvektiven Heizflächen im Horizontalzug ist durch entsprechende Barrieren zu verhindern, dass es zu rauchgasseitigen Bypass-Strömungen kommt.

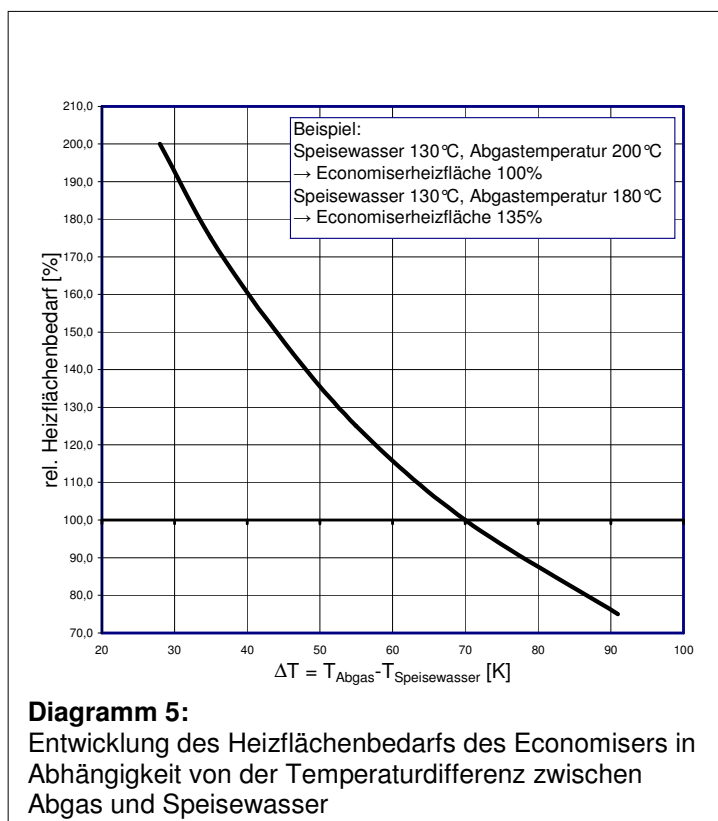


Diagramm 5: Entwicklung des Heizflächenbedarfs des Economisers in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Speisewasser

Bewertung von Kesselkonzepten

Welche Kenngrößen sind wichtig und welche Werkzeuge stehen dem Anlagenplaner zur Verfügung, um die Qualität eines Kessels hinsichtlich Belagsbildung und Korrosion zu ermitteln? Wichtig ist es dabei im Auge zu behalten, in welcher Weise sich Auslegungsvorgaben positiv oder negativ auf das Kesselkonzept auswirken können. Auch hier bleibt stets im Hinterkopf zu halten, dass es in der Regel keine positive Detailauslegung gibt, die nicht auch irgendeinen Nachteil mit sich bringt (und seien es höhere Kosten).

Selbstverständlich sollte sein, bei der Auslegung von Kesseln zur Reststoffverbrennung alle vertretbaren Maßnahmen einzusetzen, die darauf abzielen die negativen Folgen von Korrosion und Verschmutzung abzuschwächen. Diese können sein:

- ausschließlich fluchtende Rohranordnung in den Konvektionsheizflächen
- großzügige Rohrteilungen vor allem im Bereich höherer Rauchgastemperaturen
- möglichst kleine Heizflächenbündel zu Erleichterung der Reinigungs- und Reparaturarbeiten
- einige Kesselkonzepte ermöglichen es, ganze Heizflächenabschnitte/Bündel, vor allem im Bereich der Überhitzer, am Stück aus dem Kessel zu ziehen und auszutauschen.
- eine gute Zugänglichkeit über ausreichend große Mannlöcher und großzügige Bündelabstände
- ausreichend steile Aschetrichter und adäquat dimensionierte Ascheaustrageinrichtungen
- Effektiver Online-Reinigungseinrichtungen wie Rußbläser, Kugelregenanlagen, pneumatische oder mechanische Klopfanlagen oder nasse Reinigungsanlagen
- Optimierte Strömungsverhältnisse (Rauchgasgeschwindigkeiten, Durchmischung, Verweilzeit – vorzugsweise unter Berücksichtigung von CFD-Simulationen erfahrener Anbieter).

Neben diesen Punkten und der Untersuchung der noch folgenden Kriterien sind noch weitere Gesichtspunkte zu untersuchen, die in diesem Beitrag noch nicht explizit angesprochen werden (z.B. Zustand des Naturumlaufes, Druckverlust auf der Rauchgas- und der H₂O-Seite etc.).

Verbrennungsparameter und Feuerfestzustellung (Feuerung und 1. Zug)

Wie bereits erläutert wirkt sich eine niedrige Verbrennungstemperatur positiv auf den Schadstoffaustrag aus der Feuerung und die Positionierung des Überhitzers aus. Die Verschlackung des Feuerraums und der Strahlzüge erfolgt langsamer und es ist eine höhere Standzeit der Feuerfestzustellung zu erwarten.

So weit möglich sollte ein gut durchdachtes Feuerfestsystem (Feuerfestmassen sowie geklebte, hintergossene oder hinterlüftete Plattensysteme) eingesetzt werden. Besonders exponierte /gefährdete Wandbereichen können durch Austragsschweißungen geschützt werden.

Die Strömung im 1. Zug sollte gleichmäßig ausgeprägt sein. Niedrige 1. Züge (z.B: Höhe zu Tiefe des 1. Zuges < ungefähr 3) sollten deshalb unbedingt vermieden werden. Zu geringe Strömungsgeschwindigkeiten (<< 4 m/s) führen zu instabilen Strömungen, während zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten zu einem erhöhten Staubaustrag aus der Feuerung führen können.

Strahlungsheizflächen und Schutzverdampfer

Die Strahlungsheizflächen sollten so großzügig wie möglich ausgelegt werden, wobei es sich als vorteilhaft erwiesen hat, einen Teil der Wärmeaufnahme vor dem Überhitzer in einem Schutzverdampfer vorzunehmen.

Ein Zusammenhang zwischen der Größe des Schutzverdampfers und der Korrosion im Überhitzer konnte bisher nicht nachgewiesen werden, ist aber zu vermuten. Vorteilhaft ist die strömungsgleichrichtende und Temperatenausgleichende Wirkung. Die Teilungen im Schutzverdampfer sollte aufgrund der Positionierung von in der Regel > 650°C so groß gewählt werden, dass eine Versperrung des Rauchgasweges durch Verschlackung ausgeschlossen werden kann (>> 200 mm).

Konzepte mit einem oder zwei schützenden Verdampferrohren auf der Anströmseite eines jeden Überhitzerbündels haben sich als vorteilhaft erwiesen.

Die Bewertung der Gesamtheizflächen vor den Überhitzern ist ohne eine wärmetechnische Nachrechnung nur sehr begrenzt aussagefähig. Im Zusammenhang mit diesen Bewertungen müssen auch immer folgende Parameter mit in Betracht gezogen werden:

- adiabate Verbrennungstemperatur und Rauchgasmenge

- Qualität (Isolierwirkung) und Größe der mit Feuerfestmaterialien geschützten Heizflächen
- die Anwendung der selben Abwertungs-/Foulingfaktoren
- Beachtung der sehr unterschiedlichen Heizflächenwirksamkeit von Strahlungsheizflächen und Konvektionsheizflächen

Die Rauchgasgeschwindigkeiten in den Strahlzügen sollten vor Allem im Bereich der Umlenkungen niedrig (ca. 4 – 6 m/s) sein. Zu niedrige Rauchgasgeschwindigkeiten können sich vor allem im 1. Kesselzug negativ auf die Strömungs- und Temperaturverteilung auswirken (z.B. Rückströmung; s.o.).

Wichtig ist es, dass in einem vereinbarten Verschmutzungszustand (i. Allg. im „grundverschmutzten“ Zustand – nach rund 1.000 Bh) die Frischdampf­temperatur erreicht werden kann. **Diagramm 6 und 7** zeigen je 2 Fälle, gemäß denen die Frischdampf­temperaturen (hier: 400 °C) am Anfang und am Ende der Reisezeit erreicht werden. Die Auslegung des Kessels erfolge für eine adiabate Verbrennungstemperatur von ca. 1250 °C. Zudem ist eine Variation der adiabaten Verbrennungstemperatur (1300 °C und 1100 °C) über den Luftüberschuss eingezeichnet. Bei dieser Variation gibt es einen Schnittpunkt der beiden Linien (d.h. der Berechnungen mit unterschiedlichem Luftüberschuss – 1.300 °C = geringes λ ; 1.000 °C = hohes λ), der einmal am Ende des 2. Zuges liegt und einmal direkt vor den Überhitzern. Es wird deutlich, dass die Lage des Schnittpunktes von den gewählten Foulingfaktoren abhängt. Nach Krüger („Thermodynamische Untersuchungen der Ofenlinie 4 des Müllkraftwerkes Schwandorf“, anlässlich des 13. DVV-Kolloquium 2002) hilft dieser Schnittpunkt in der Bewertung der Auslegung des Kessels.

Damit ergeben sich mindesten 2 verschiedene wärmetechnische Bewertungsmöglichkeiten:

1. Vergleich der Temperatur von den Überhitzern auf der Basis definierter Foulingfaktoren
2. Vergleich der Lage des Temperaturschnittpunktes auf der Basis unterschiedlicher Luftüberschüsse

Im Beispiel eines Kessels mit einer Heißdampf­temperatur von 400 °C und einer adiabaten Verbrennungstemperatur von 1250 °C im Auslegungslastfall in **Diagramm 6 und Diagramm 7** wird deutlich, dass diese beiden Kriterien gleichwertig sind. Der Schnittpunkt der Temperaturkurven am Ende der Reisezeit liegt bei einer Rauchgastemperatur von etwas über 650 °C vor dem Überhitzer und auch die üblichen 650 °C am Eintritt zum Überhitzer werden eingehalten. Der Schnittpunkt wird sich unter der Annahme einer stärkeren Verschmutzung der Strahlräume genau wie die 650 °C-Grenze in den Überhitzerbereich verschieben.

Das Ziel der Einhaltung von 650 °C bzw. Temperaturschnittpunkt vor Überhitzer kann z.B. im Fall höherer Dampfparameter (z.B. Heißdampf­temperatur 500 °C) nicht erreicht werden (siehe **Diagramm 8**). In solchen Fällen ist mit sehr hohen Korrosionsraten zu rechnen und es sind entsprechende Schutzmaßnahmen erforderlich (z.B. Cladding). Hier kann im Übrigen nicht davon gesprochen werden, dass der Kessel „zu klein“ dimensioniert ist. Diese einfache Sichtweise ist für die hier vorliegende komplexe Thematik nicht hilfreich.

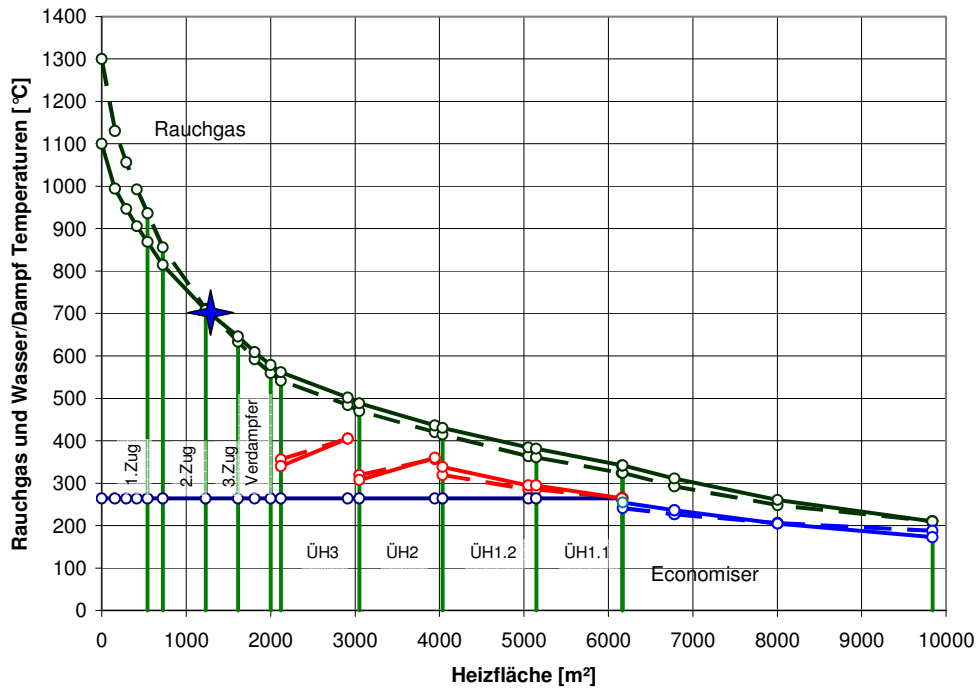


Diagramm 6: Rauchgas- und H₂O-Temperaturverlauf über der Heizfläche am Anfang der Reisezeit

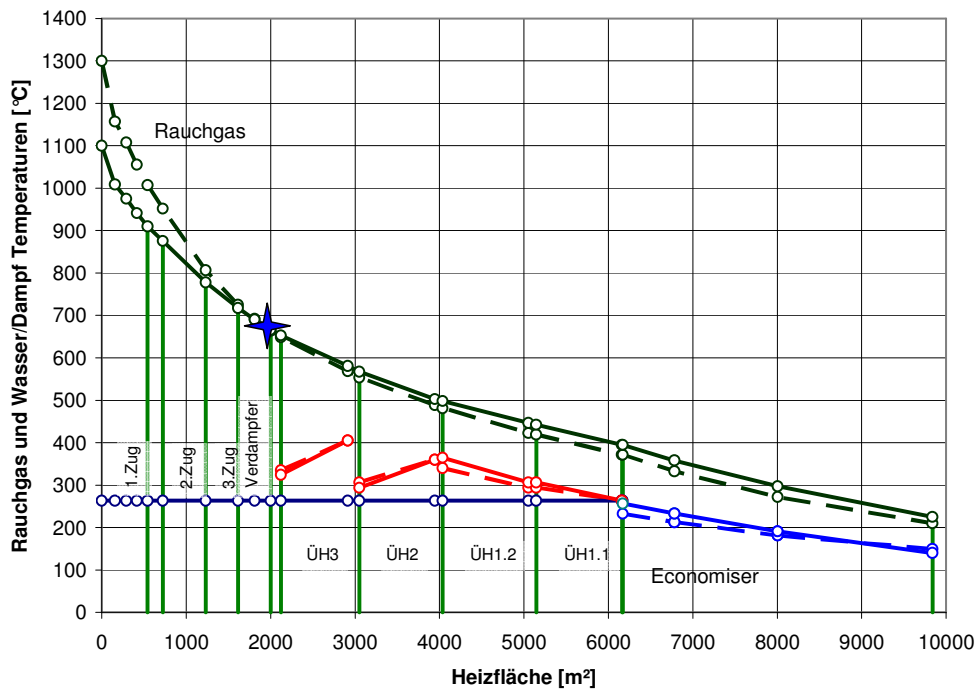


Diagramm 7: Rauchgas- und H₂O-Temperaturverlauf über der Heizfläche am Ende der Reisezeit

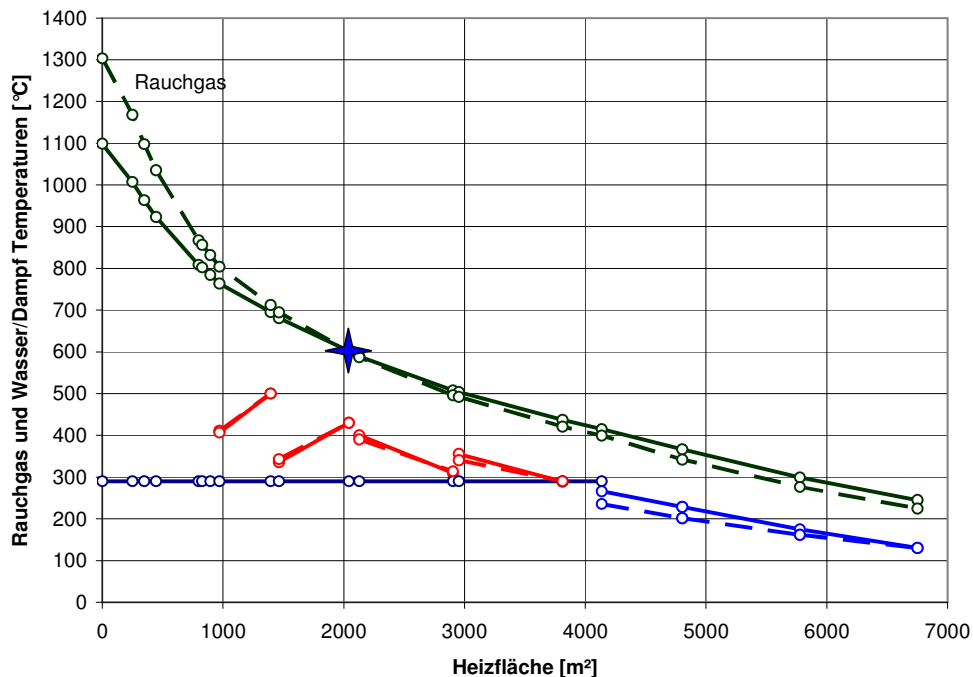


Diagramm 8: Rauchgas- und H₂O-Temperaturverlauf über der Heizfläche am Ende der Reisezeit für einen Kessel mit 500 °C Heißdampf Temperatur.

Überhitzer und Korrosionsdiagramm

Wie bereits dargestellt gibt es viele verschiedene Möglichkeiten die Überhitzer in Kesseln für die Verbrennung von belasteten Brennstoffen anzuordnen und zu gestalten. Neben einigen Konzepten mit Strahlungsüberhitzern in den Leerzügen werden im überwiegenden Teil der Fälle Konvektionsüberhitzer eingesetzt.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die einzelnen Stufen des Überhitzers rauchgas- und wasserseitig zu verschalten. Dabei wird sowohl die Reihenfolge der Überhitzerstufen (Vorüberhitzer ÜH1, Mittelüberhitzer ÜH2 und Endüberhitzer ÜH3) auf dem Rauchgasweg als auch deren Stromrichtung (Gleichstrom/Gegenstrom) variiert (siehe auch **Abbildung 3**).

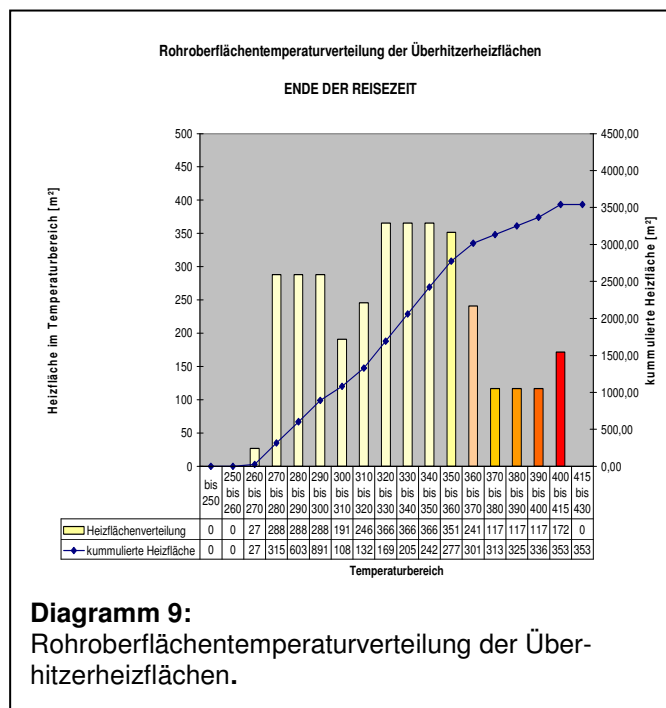


Diagramm 9: Rohroberflächentemperaturverteilung der Überhitzerheizflächen.

Die Überhitzer von Kesseln zur Reststoffverbrennung werden bei vergleichsweise niedrigen Rauchgastemperaturen platziert und sind daher sehr groß. Die Überhitzerheizfläche eines heute projektierten Kessels mit einer Heißdampf Temperatur von 400 °C stellt, je nach Größe der nachgeschalteten Economiser- und Verdampferheizflächen, nicht selten 25 - 35 % der Gesamt Heizfläche des Kessels.

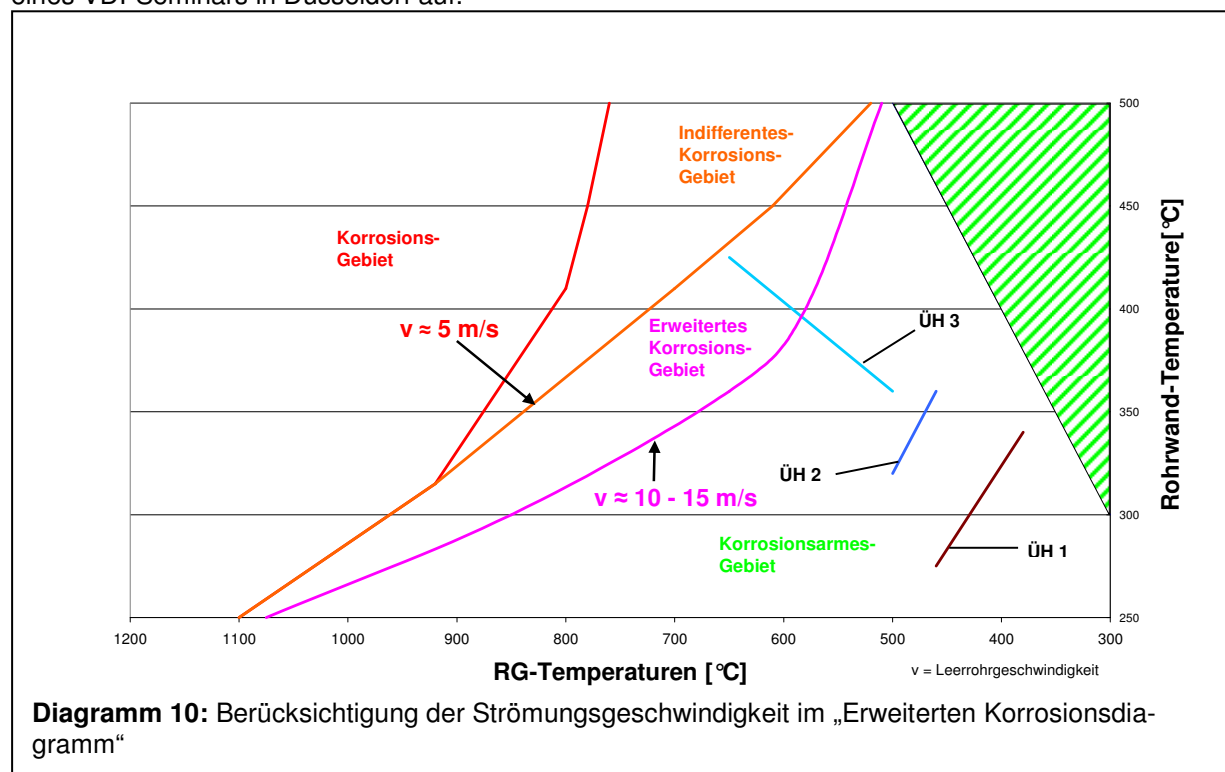
Gleichzeitig sind diese Flächen aufgrund der hohen Rohroberflächentemperaturen anfällig für Korrosion und damit potentielle Kandidaten für Reparaturen. Aus diesem Grund ist es erforderlich die Rohrwandtemperatur dieser Heizflächen über die gesamte Reisezeit des Kessels so niedrig wie möglich zu halten. Ein erster Schritt bei der Bewertung von Überhitzer-Konzepten kann es daher sein, die Verteilung der Heizflächen auf bestimmte Rohrwandtemperaturintervalle zu betrachten (siehe **Diagramm 9**). So kann dargestellt werden wie

groß der Anteil der Heizflächen ist, der durch hohe Wandtemperaturen einem erhöhten Korrosionsrisiko ausgesetzt ist.

Die Erfahrung hat gelehrt, dass eine Betrachtung der Wandoberflächentemperaturen allein nicht ausreicht. Andere Einflussgrößen müssen berücksichtigt werden.

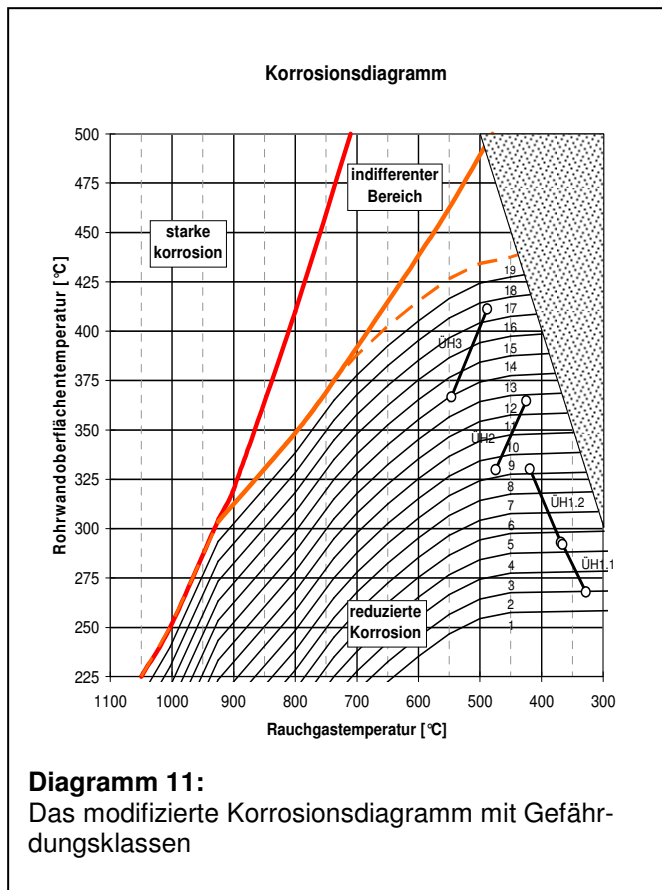
Der Zusammenhang zwischen Rohroberflächentemperatur, Rauchgastemperatur und Korrosion ist im Korrosionsdiagramm qualitativ dargestellt. In diesem Diagramm wird deutlich, dass Korrosion nicht allein von der Rohrwandtemperatur abhängig ist, sondern auch von der Rauchgastemperatur beeinflusst wird.

Die Herkunft des Korrosionsdiagramms konnte nicht ganz eindeutig geklärt werden. Unseres Wissens sind auch die Ergebnisse aus den sehr umfangreicher Untersuchungen aus der Zeit zwischen 1978 – 1980 in der MVA Düsseldorf-Flingern in dieses Diagramm mit eingeflossen. Die Untersuchungen liefen unter dem Titel: „Maßnahmen zur Minderung feuerraumseitiger Korrosionen“ und wurde seinerzeit von den Stadtwerken Düsseldorf AG, der Vereinigte Kesselwerke AG, und der Fa. Ferdinand Lentjes unter der Förderung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie durchgeführt. In der allgemein verfügbaren Literatur taucht es erst am 21./22. Februar 1994 in einem Artikel von J. Kümmel anlässlich eines VDI-Seminars in Düsseldorf auf.

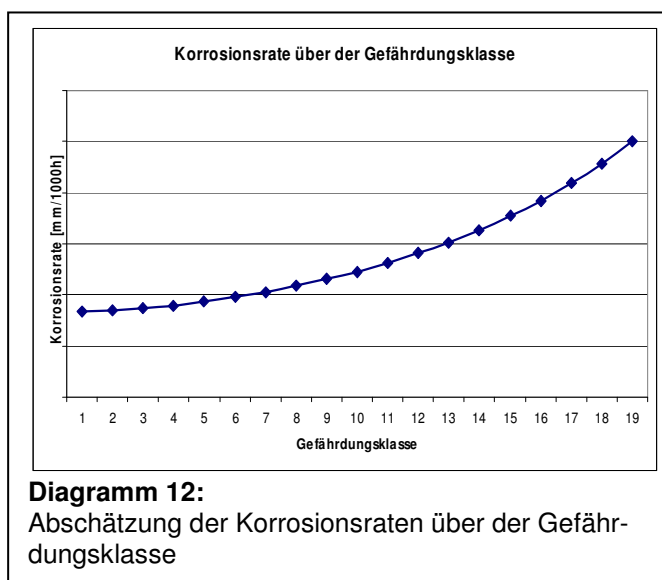


Das Konzept der Beurteilung der Korrosionsgefahr über die Einflussgrößen Rauchgas- und Rohrwandtemperatur wird seit ca. 2 ½ Jahrzehnten zur Bewertung der Anordnung und Schaltung von Überhitzerheizflächen herangezogen. Die Darstellung im Korrosionsdiagramm ist rein qualitativ und recht einfach. Quantitative Angaben fehlen leider völlig und die Begriffe „geringe Korrosion“ und „starke“ Korrosion sind nicht definiert. Es werden klare Grenzlinien dargestellt, aber die Praxis hat gezeigt, dass die eingezeichneten Grenzen die Tendenzen zwar richtig wiedergeben, aber durchaus auch im Bereich „geringe Korrosion“ durchaus signifikanter Verschleiß auftritt.

Während die Strömungsgeschwindigkeit bereits als Einflussgröße im „Erweiterten Korrosionsdiagramm“, berücksichtigt wurde (**Diagramm 10**), ist die Angabe der Korrosionsgeschwindigkeit weiterhin nicht quantitativ.



gleicher Korrosionsgefährdung welchen im Weiteren als Gefährdungsklassen bezeichnet werden sollen. Es ist nun möglich jeder Gefährdungsklasse eine Korrosionsrate zuzuordnen. Allerdings ist hierbei immer noch nicht der Einfluss der Schadstoffbelastung berücksichtigt.



konstruktiv vorgesehene Korrosionsreserve (Korrosionszuschlag), die Standzeit der Überhitzerheizflächen abgeschätzt werden. Mangels einer ausreichenden Datenbasis für die Korrosionsraten und anderer Unwägbarkeiten, wie z.B. Schadstoffbelastung, Rauchgasgeschwindigkeiten oder Temperaturschiefen etc., müssen die Ergebnisse einer solchen Berechnung hinsichtlich der absoluten Zahlenwerte mit großer Vorsicht genossen werden (**Diagramm 13**). Sie eignen sich allerdings durchaus zu Vergleichszwecken.

Nachgeschaltete Verdampfer und Economiser

Bei der Bewertung der nachgeschaltete Heizflächengrößen ist es erforderlich sowohl die Differenz zwischen Speisewasser- und Kesselabgastemperatur, als auch die Rauchgasgeschwindigkeit zu beachten. Beide Größen haben einen erheblichen Einfluss auf den Wärmeübergang, so dass ein einfacher Heizflä-

Für einen objektiven Vergleich unterschiedlicher Überhitzerkonzepte wären quantitative Größen erforderlich, welche sich aus dem Korrosionsdiagramm in seiner derzeitigen Form nicht ableiten lassen. Es gibt derzeit kein Modell, das quantitative Kennzahlen zur Bewertung der Korrosionsneigung und Verschleiß im Überhitzer ermöglicht.

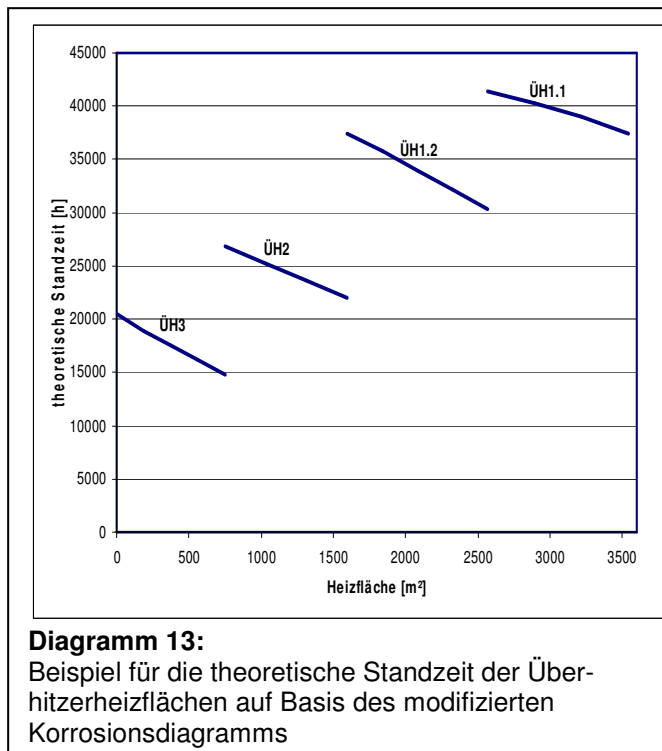
Auf Basis des Korrosionsdiagramms soll hier ein solches Modell entwickelt werden, dass eine quasi-quantitative Bewertung eines Überhitzers hinsichtlich Korrosion ermöglicht.

Aufgrund der Annahme, dass bei Rauchgastemperaturen unter 650°C die Rohroberflächentemperatur und weniger die Rauchgastemperatur die dominierende Einflussgröße für die Korrosion ist, wurde das Korrosionsdiagramm im Bereich niedriger Rauchgastemperaturen zunächst etwas modifiziert. Hier wurde der Einfluss der Rohrwandtemperatur höher bewertet als jener der Rauchgastemperatur.

Die Grenzlinie zum Bereich reduzierter Korrosion wurde dann willkürlich in Schritten von jeweils 10 K in Richtung fallender Rohrwandoberflächentemperaturen kopiert (**Diagramm 11**).

Es ergeben sich dadurch 19 Einzelflächen gleicher Korrosionsgefährdung. In der Literatur gibt es verschiedene Beispiele für Diagramme, bei denen die Korrosionsrate von typischen Kesselbaustählen (z.B. P235GH/St35 oder 16 Mo3) über der Wandtemperatur auf Basis von experimentellen oder theoretischen Untersuchungen aufgetragen wurde. Die Verläufe sagen niedrige Korrosionsraten zwischen 130 und ca. 250 °C und ab ca. 250 °C einen exponentiellen Anstieg der Korrosionsrate voraus. Auf Basis dieser Informationen wurde ein Diagramm erstellt dass jeder Gefährdungsklasse eine Korrosionsrate zuweist (siehe **Diagramm 12**).

Im nächsten Schritt kann nun für jede Überhitzerheizfläche auf Basis der Gefährdungsklassen, der daraus resultierenden Korrosionsrate und der



chenvergleich zu kurz greifen würde. Auch hier ist beim Vergleich verschiedener Kesselkonzepte die Nachrechnung der Heizflächen zur Ermittlung der vorhandenen Heizflächenreserven dringend zu empfehlen.

Bewertung wärmetechnischer Berechnungen

Obwohl an die verschiedenen Hersteller im Rahmen einer Ausschreibung dieselben Anforderungen gestellt worden sind, sehen die Dampferzeuger in den Angeboten bzw. Ausführungen unterschiedlich aus. Das bedeutet nicht unbedingt, dass ein Hersteller das technische Optimum erreicht hat und die anderen Hersteller schlechter sind, sondern beruht u.U. auch auf verschiedenen Annahmen bei der Auslegung und der Verwendung von unterschiedlichen Dampferzeuger- Berechnungsprogrammen.

In folgenden Punkten unterscheiden sich die Auslegungsberechnungen oft deutlich:

2. Luftüberschuss/adiabate Verbrennungstemperatur/Rauchgasmenge
3. Verluste im Rost / Rostdurchfall / Unverbranntes
4. Gekühlter Rost / ungekühlter Rost
5. Unterschiedliche Auskleidungen Feuerraum / 1. Zug
6. Anteil Ascheaustag und wirksame Projektionsfläche Asche, wichtig für die Strahlung
7. Unterschiedliche Bewertungsfaktoren / Schmutzschichtdicken und Wärmeleitfähigkeiten der Schmutzschicht. Wenn ein Dampferzeuger mit Bewertungsfaktor und der andere mit Verschmutzungswiderständen berechnet worden ist, sind die Strahlungswärmeübergänge differierend
8. Einige Berechnungsprogramme berücksichtigen nicht den Strahlungsaustausch zwischen den heißen Überhitzerheizflächen und den „kalten“ Verdampferwänden
9. Berechnungsmethode für den Wärmeübergang an die Wände neben den Bündeln (Nebenheizflächen)
10. ...etc.

Bei allen Berechnungsprogrammen sind folgende Annahmen in der Regel gleich:

- Stoffwerte Rauchgas / Wasserdampf
- Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung um die Rohre
- Verbrennungsberechnung
- Wärmebilanzen

Fazit: Um verschiedene Dampferzeuger vergleichen zu können, muss von gleichen Annahmen und Modellen ausgegangen werden. Es wird empfohlen, mit einem Berechnungsprogramm die Dampferzeuger der verschiedenen Hersteller zu modellieren und dann zu vergleichen.

Eine Bewertung der Kesselkonzepte unterschiedlicher Anlagenbauer in der Angebotsphase aufgrund der angegebenen Temperaturverläufe oder Heizflächengrößen allein ist problematisch. Dies liegt zum einen daran, dass die Größe einer Heizfläche allein nicht ausreicht, um ihre Wirksamkeit darzustellen (siehe z.B. Einfluss der Rauchgasgeschwindigkeit), zum anderen haben die Annahmen bezüglich der Verschmutzung (Foulingfaktoren / Heizflächenbewertungsfaktoren) einen entscheidenden Einfluss auf Temperaturverhältnisse im Kessel.

Eine korrekte Bewertung der Kesselkonzepte wird erst dann möglich, wenn die verschiedenen Konzepte insbesondere unter Annahme gleicher Foulingfaktoren nachgerechnet wurden. Dabei ist es nicht erforderlich die exakten Heizflächenbewertungsfaktoren nach einer bestimmten Reisezeit zu kennen. Ausreichend ist es einen beliebigen Verschmutzungszustand (z.B. Kessel ganz sauber, alle Heizflächen 100% wirksam) und/oder Kessel verschmutzt (alle Heizflächen 70% wirksam) und eine Temperatur am Ende der 2-sec Verweilzeit gemäß 17. BImSchV (je nach Kesselgröße z.B. „sauber“ 870 °C und „verschmutzt“ 950 °C) festzulegen und einheitlich auf alle Konzepte anzuwenden.

Zusammenfassung

Bei der Auslegung von Dampferzeugern für die Verbrennung von Reststoffen muss der Anlagenbauer einer großen Zahl von Anforderungen gerecht werden. Da bei diesen Kesseln die Verschmutzung und Korrosion erhebliche Kostenfaktoren sind, ist bei der Formulierung der Anforderungen besonderes Augenmerk auf Verfahrensvorgaben zu legen, welche die Verschmutzung und Korrosion negativ beeinflussen könnten.

Es wurde ein grober Überblick über einige der wichtigsten Anforderungen an den Dampferzeuger gegeben und dargestellt in welcher Weise sich einige dieser Anforderungen negativ auf das Kesselkonzept auswirken können. Dabei wurde ein Überblick über die wärme- und verfahrenstechnischen Parameter gegeben die hinsichtlich Korrosion und Verschmutzung bei der Auslegung der Dampferzeuger und ihrer einzelnen Heizflächenabschnitte besondere Beachtung finden.

Um Kesselkonzepte hinsichtlich Korrosion und Verschmutzung zu bewerten, können unterschiedliche Bewertungskriterien herangezogen werden, welche dargestellt wurden. Mit Blick auf die Bewertung unterschiedlicher Überhitzerkonzepte kann das Korrosionsdiagramm herangezogen werden. Unter Anwendung eines modifizierten Korrosionsdiagramms wurde eine Methode entwickelt, quantitative Kennzahlen herzuleiten, welche es ermöglichen, die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Überhitzerkonzepte zu vergleichen.

Es wurde erläutert, warum zum Vergleich unterschiedlicher Kesselkonzepte deren einheitliche wärmetechnische Nachrechnung zu empfehlen ist.

Dieser Beitrag soll der erste aus einer Reihe sein, in der auf die speziellen Fragestellungen bei der Auslegung und beim Betrieb von Kesseln eingegangen werden soll. Daher ist dieser Beitrag als Übersicht zu verstehen und geht noch nicht auf alle Gesichtspunkte im Detail ein.