

# Publikation

*Klasen, T., Görner, K., Auel, W., Sudau, B.  
VGB-PowerTech-Zeitschrift, Heft 7/2006*

*MHW Bremen  
Müllverbrennung  
CFD-Simulation  
Betriebserfahrungen*

**InPro-Consult** GmbH

**SIPREU-TEC**

Innovative Prozessoptimierung

**AnSimO GmbH**



## Optimierung des Müllheizkraftwerkes (MHW) Bremen auf Basis von CFD-Simulationen und Betriebserfahrungen nach dem Umbau

VGB-PowerTech-Zeitschrift  
Heft 7/2006

# Optimierung des MHW Bremen auf Basis von CFD-Simulationen und Betriebserfahrungen nach dem Umbau

Dr.-Ing. Thomas Klasen<sup>1)</sup>, Prof. Dr.-Ing. Klaus Görner<sup>2)</sup>, Dipl.-Ing. Werner Auel<sup>3)</sup>, Dipl.-Ing. Bernd Sudau<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Ingenieurbüro Thomas Klasen (Sipreu-Tec), Geschäftsführer, Mülheim an der Ruhr

<sup>2)</sup> Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik, Universität Duisburg-Essen

<sup>3)</sup> ThyssenKrupp Xervon Energy GmbH, Leitung Feuerungsbaubereich, Duisburg

<sup>4)</sup> Abfallbehandlung Nord GmbH, Geschäftsführer, Bremen

## Einleitung

Seit 1969 betreibt die Abfallbehandlung Nord GmbH (ANO) in Bremen ein Müllheizwerk (MHW), in dem Industrie- und Hausmüll thermisch behandelt wird. Vor einigen Jahren hatte die ANO beschlossen, das MHW zu modernisieren und die Verbrennungskapazität zu erweitern, um die Entsorgungssicherheit für den anfallenden Abfalls zu gewährleisten. Kessel 1 wurde gänzlich neu errichtet, die Kessel 2 und 3 wurden saniert und Kessel 4 ist momentan in der Umbauplanung.

Den Auftrag für die Modernisierungsarbeiten des Müllheizkraftwerkes bekam die damalige LLS Standardkessel Service GmbH (heute: ThyssenKrupp Xervon Energy GmbH). Anlagenkomponenten wie Verbrennungsrost, Entschlacker, Feuerungsleistungsregelung, Verbrennungsluftsystem und Müllaufgabe mussten neu konzipiert bzw. angepasst werden. Die vorhandene Walzenrostfeuerung an den Kesseln 2 und 3 wurde gegen eine neue wassergekühlte Vorschubrostfeuerung ausgetauscht, bei dem die Kühlung der Roststäbe vor allem durch das durchströmende Kühlwasser erfolgt [1].

Für Müllverbrennungsanlagen können mit Hilfe von CFD-Programmen in Kombination mit Submodellen quantitative Aussagen zum Verbrennungsprozess, z.B. CO- und O<sub>2</sub>-Konzentrationen, Geschwindigkeiten sowie Temperaturen, als auch qualitative Bewertungen über Korrosions-, Verschlackungs- und Verschmutzungsneigungen erzielt werden. Im Vorfeld hatte LLS Standardkessel Service GmbH daher gemeinsam mit dem Essener Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT) der Universität Duisburg-Essen CFD-Studien für die Kessel 2 und 3 des MHW Bremen durchgeführt. Ziel war das Erreichen von homogenen Verhältnissen im gesamten Feuerraum sowie im 1. Zug. Hierbei spielt vor allem die Zugabe der Sekundärluft eine entscheidende Rolle. Als Idealvorstellung gelten konstante Geschwindigkeiten, Temperaturen und Spezieskonzentrationen. Ein homogenes Strömungsfeld bei klassischer Sekundärlufteindüsung ist Merkmal einer optimierten Verbrennung. Nur wenn die Hauptströmung, beginnend von der Müllbahn, in der Kesselmitte zentriert wird, kann bei ausreichender Sekundärlufteindringtiefe ein gleichmäßiger Verbrennungsvorgang eingehalten und eine frühzeitige sowie vollständige Aufoxidierung des Kohlenmonoxids gewährleistet werden.

## Theorie

Unter einer mathematischen Modellierung wird die Abbildung von chemischen und physikalischen Vorgängen mit Hilfe von mathematischen Beziehungen verstanden. Die Gleichungssysteme sind vorwiegend so komplex, dass sie nicht analytisch, sondern numerisch gelöst werden. Als Ergebnis einer solchen numerischen Berechnung erhält man dreidimensionale Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrations-Verteilungen. Die Modelle für die Gasphase können erfolgreich im Feuer- und Strahlraum angewendet werden. Für die heterogene Verbrennung auf dem Rost lassen

sich diese Ansätze nicht anwenden. Die wesentlichen Ursachen sind in der breiten und meist kaum zu definierenden Partikelgrößenverteilung des Mülls und seiner chemischen Zusammensetzung zu suchen. Infolgedessen stellt die Kopplung zwischen Müllbett und Feuerraum ein großes Problem bei der Modellierung dar. Am LUAT wurde für die Müllbahn ein eindimensionales Submodell entwickelt, mit dem sich Temperatur-, Konzentrations- und Geschwindigkeits-Profile durch eine integrale Bilanzierung oberhalb des Rostes näherungsweise angeben lassen [z.B. 2 und 3]. In Abhängigkeit der Feuerraumgeometrie sowie des eingesetzten Rostes kann sich die Lage und der Peak der Hauptverbrennungszone verändern (Bild 1).

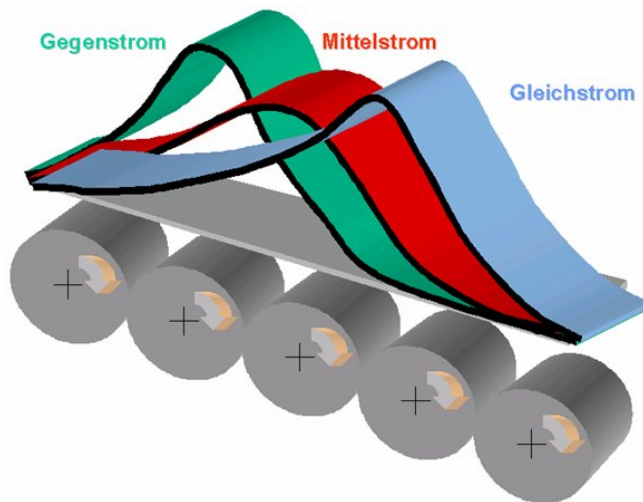


Bild 1: Wärmefreisetzungsprofile in Abhängigkeit der Feuerraumgeometrie

## Müllheizwerk Bremen

Die Ausgangssituation des Feuerungssystems zeigt Bild 2. Hierbei sind vor allem die ursprünglich sieben Walzen und die strömungstechnisch recht ungünstige Feuerraumgeometrie zu erwähnen. Ein großes Problem war auch, dass u.a. auf Grund des luftgekühlten Walzenrostes die Müllheizwerte (basierend auf den Daten von 1969) auf ca. 10 MJ/kg begrenzt waren.

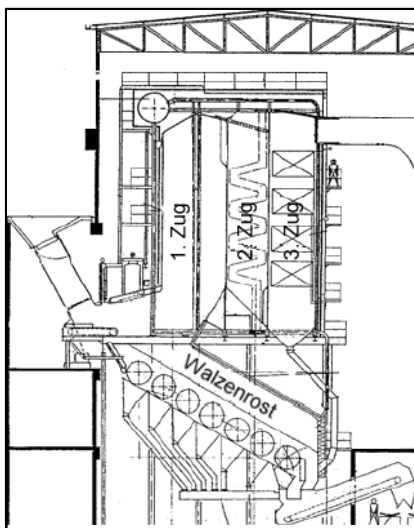


Bild 2: Kesselansicht vor dem Umbau

Die in Bremen bei Linie 2 und 3 umgebaute Feuerraumgeometrie (Mittelstromfeuerung) ist in Bild 3 dargestellt. Durch den Einsatz des wassergekühlten Rostes ist gewährleistet, dass die angestiegenen Müllheizwerte (bis 15 MJ/kg) recht problemlos verarbeitet werden können.

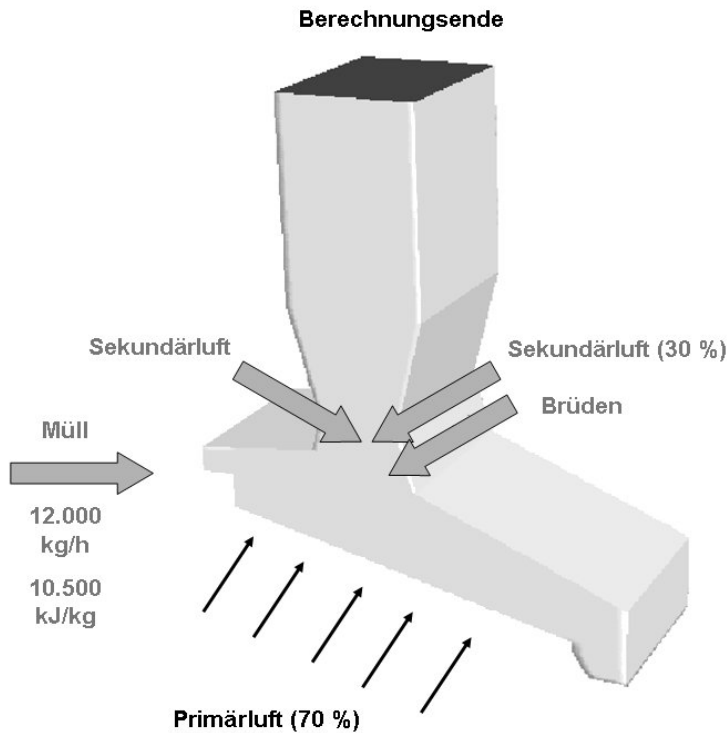


Bild 3: Kesselansicht nach dem Umbau

Von der gesamten Verbrennungsluft (ca. 55.000 m<sup>3</sup><sub>i,N</sub>/h bei Nennlast) werden 70 % als Primärluft unterhalb des Rostes zugegeben, 30 % der Gesamtluft sollen als Sekundärluft dafür sorgen, dass ausreichend Sauerstoff in der Kesselmitte vorhanden ist. Die Sekundärluft wird über insgesamt vier Düsenreihen zugeführt, wobei jeweils zwei Reihen an der Vorder- sowie Rückwand angeordnet sind. Zusätzlich werden 2000 m<sup>3</sup><sub>i,N</sub>/h Brüden von der Rückwand eingedüst.

Im Rahmen der simulationstechnischen Studien wurden diverse Feuerraumgeometrien untersucht. Die linke Abbildung in Bild 4 zeigt den Ausgangszustand. Über eine veränderte Rückwandgeometrie (mittlere Darstellung) als Zwischenvariante wurde schließlich die rechte Anordnung gewählt. Vorteile dieser Geometrie liegen in der gleichmäßigen Anströmung, wie später noch ausführlich gezeigt wird.

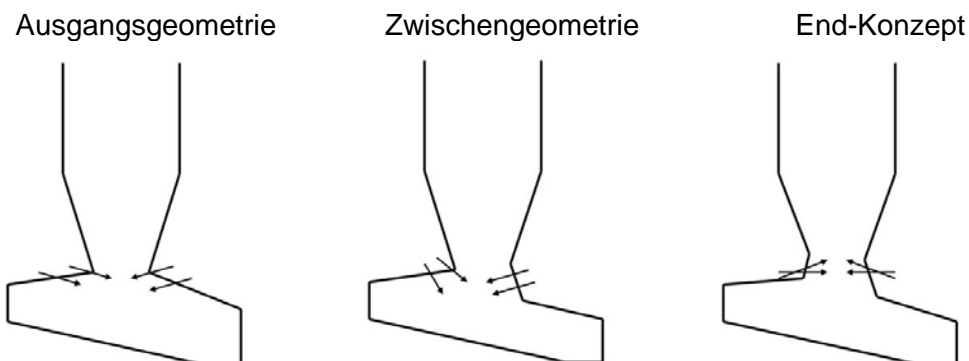


Bild 4: Schematische Übersicht über die untersuchten Feuerraumgeometrien

## Simulationsergebnisse

Für einen Nennlastfall mit typischer Müllzusammensetzung wurde die Ausgangsgeometrie der beschriebene Anlage simuliert (Bilder 5a-c).

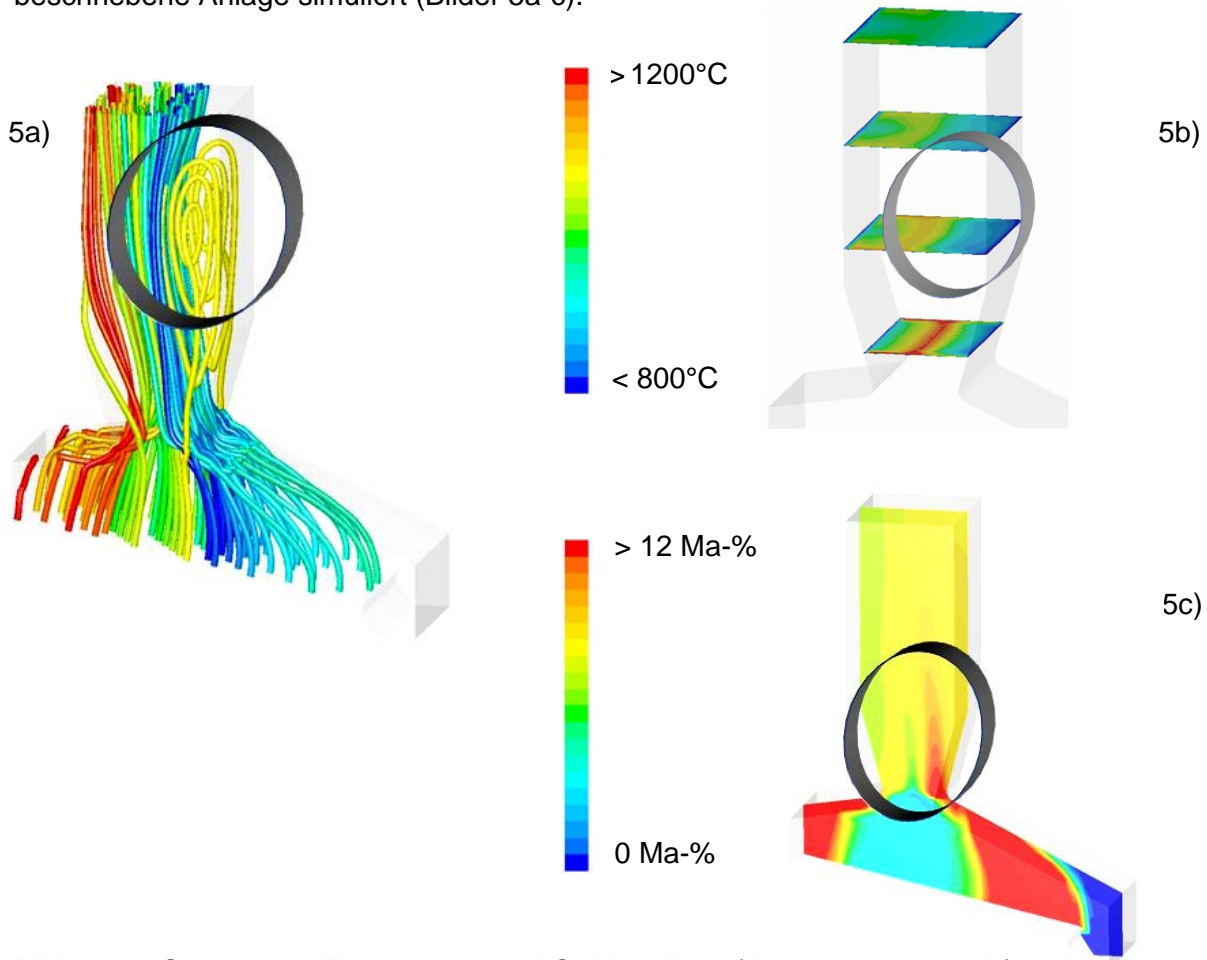


Bild 5 a-c: Stromlinien, Temperatur- und  $\text{O}_2$ -Verteilung (Ausgangsgeometrie)

Den Grafiken ist deutlich zu entnehmen, dass der Verbrennungsprozess nicht optimal abläuft. Anhand der Stromlinien ist im 1. Zug eine große Tot- bzw. Rezirkulationszone im Bereich der Rückwand zu beobachten. Demzufolge existieren dort geringe Temperaturen sowie hohe Sauerstoffkonzentrationen. Die Hauptströmung mit den zu verbrennenden Spezieskonzentrationen ( $\text{CO}$  und  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) wird zur Vorderwand abgelenkt. Die Folge sind Temperaturspitzen und niedrige  $\text{O}_2$ -Werte. Sowohl in den horizontalen Ebenen (Temperatur, Bild 5b) als auch im vertikalen Schnitt (Sauerstoff, Bild 5c) können recht inhomogene Verteilungen festgestellt werden.

Ziel der weiteren Simulationsstudie war die Vergleichmäßigung dieser inhomogenen Profile. Durch Änderung der Sekundärlufteindüsung, z.B. Eindüsungswinkel oder Verteilung, konnte der Verbrennungsprozess in der Anlage Bremen nicht weiter bzw. nicht wesentlich optimiert werden. Folglich wurde zusätzlich die Feuerraumgeometrie variiert.

Zunächst wurde der Übergang „Feuerraum / 1.Zug“ in der Simulation modifiziert. Hierbei wurden u.a. neue Sekundärlufteindüsungen (Winkel, Ort, ...) in die überarbeitete Geometrie integriert (mittlere Darstellung in Bild 46). Bild 6 zeigt die Sauerstoffverteilung in einem vertikalen Schnitt für diese neue Anordnung.



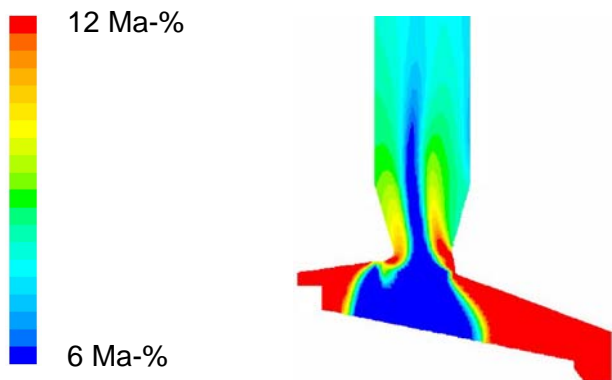


Bild 6: O<sub>2</sub>-Verteilung (Zwischengeometrie)

Grundsätzlich ist daran zu erkennen, dass die Zustände im Vergleich zum Ausgangszustand stabiler waren. Vor allem das schnelle Anlegen der Hauptströmung an die Vor- bzw. Rückwand konnte hierbei nicht mehr festgestellt werden. Allerdings waren auch für diese Konfiguration noch negative Effekte zu beobachten. Die Vorderwand-Sekundärluftstrahlen legen sich bei zu geringer Beaufschlagung an die Umlenkungskontur an, sodass eine ausreichende Eindringtiefe bis in die Kesselmitte verhindert wird.

Da die veränderte Geometrie der Ausbranddecke durchaus positiv zu bewerten war, wurde die Zünddecke entsprechend modifiziert (rechte Darstellung in Bild 4). Eine Vorstudie, bei der nur Primärluft berücksichtigt wurde, sollte die Vorteile der neuen Feuerraumgeometrie bestätigen. Allein durch die neue Übergangskontur konnten Geschwindigkeitsspitzen abgebaut werden, was in Bild 7 deutlich zu erkennen ist.

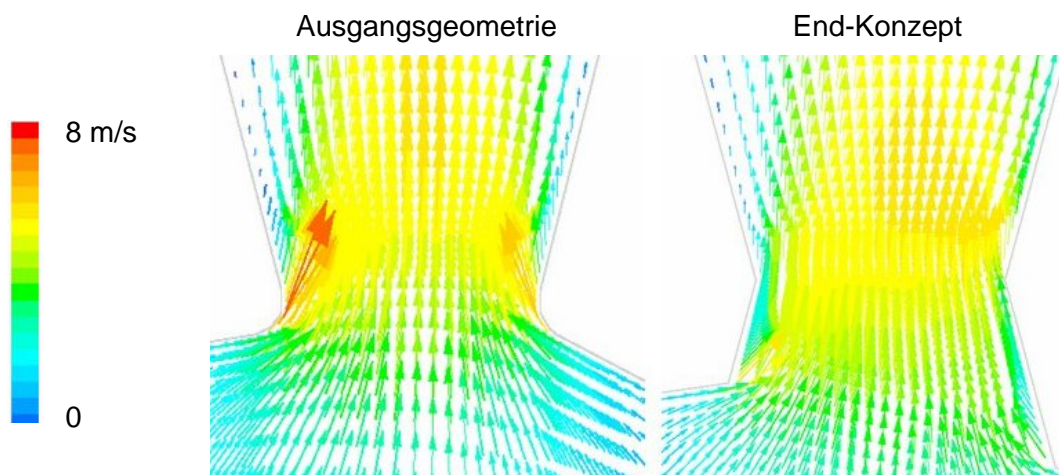
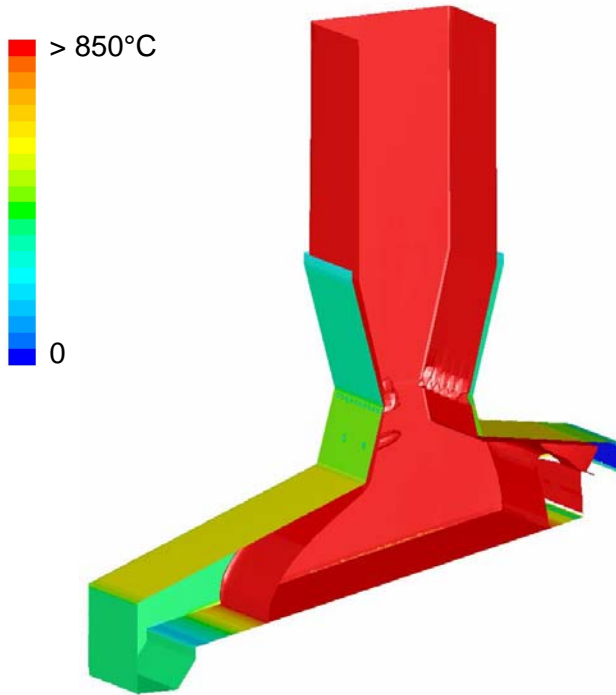


Bild 7: Geschwindigkeiten (Vergleich „Ausgangsgeometrie“ und „End-Konzept“)

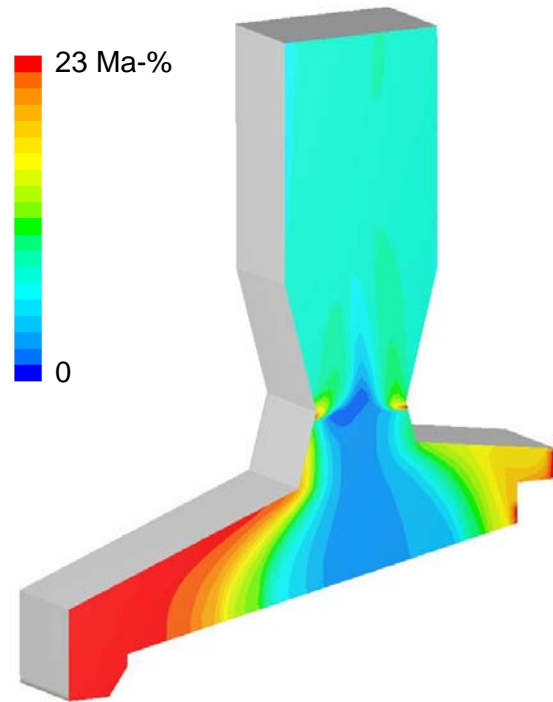
Durch die geringeren lokalen Geschwindigkeiten hat sich die Anströmsituation des 1. Zuges schon sichtbar verbessert. Darüber hinaus ist ebenfalls zu beobachten, dass weniger Totzonen im Bereich der Aufweitung existieren. Die gerade beschriebenen Effekte basieren ausschließlich auf der Primärluftzuführung. Mit diesen positiven Erkenntnissen wurde anschließend eine Verbrennungs-Simulation des End-Konzeptes, d.h. mit Sekundärlufteindüsung sowie Verbrennungsreaktionen, durchgeführt. Die Resultate der CFD-Verbrennungsrechnung sind in Bild 8 a-d dargestellt.



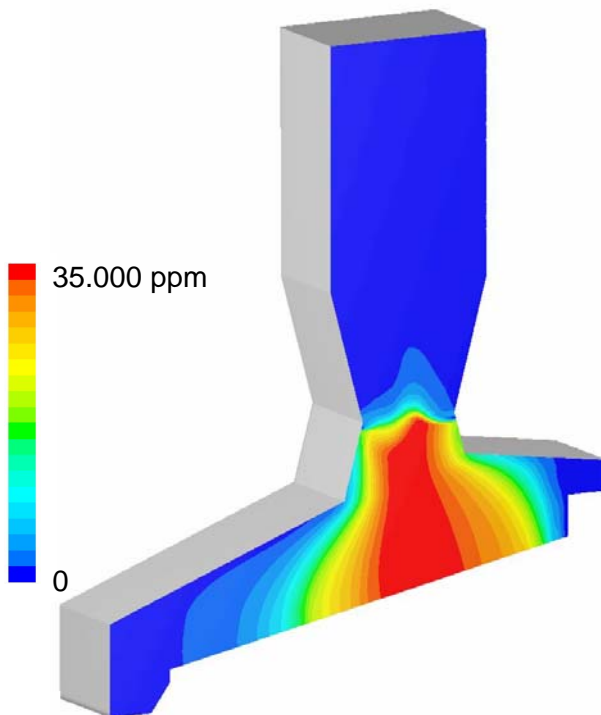
8a - Temperatur



8b - Sauerstoff



8c - Kohlenmonoxid



8d - Stromlinien

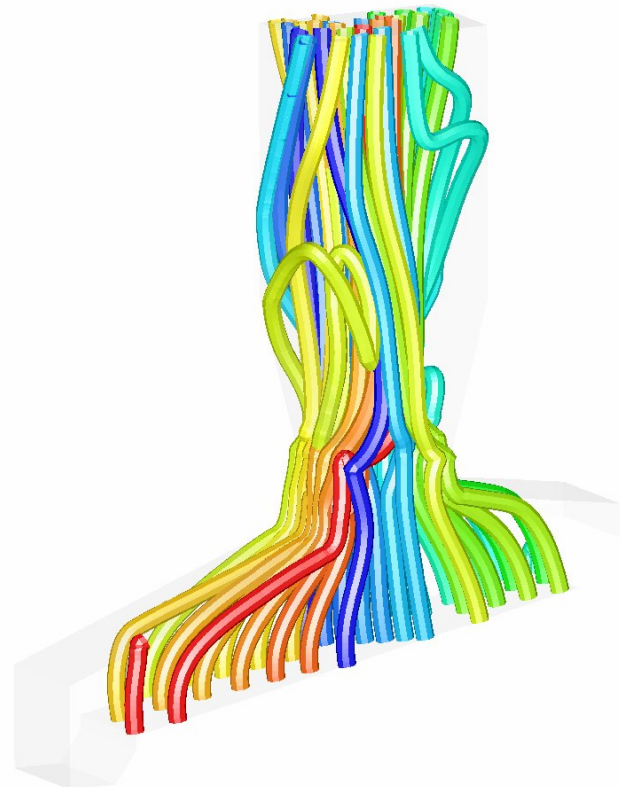


Bild 8 a-d: Temperatur-, O<sub>2</sub>- sowie CO-Verteilungen und Stromlinien (End-Konzept)

Den Ergebnissen kann entnommen werden, dass der Feuerungsprozess gegenüber früheren Konzepten deutlich verbessert worden ist. Die Sekundärluft wird so zugeführt, dass praktisch im gesamten 1. Zug konstante Sauerstoff-Werte sowie sehr geringe CO-Konzentrationen erkennbar sind. Grund für diesen vollständigen CO-Ausbrand zu Beginn des 1. Zuges ist neben der optimierten Sekundärluftzuführung auch die neue Feuerraumgeometrie. Die Strömungsverhältnisse konnten vergleichmäßigt werden, was zur Folge hatte, dass Tot- bzw. Rezirkulationszonen eliminiert oder zumindest reduziert werden konnten. Im Feuer- und Nachbrennraum werden Temperaturen größer 850°C erreicht.

## Betriebserfahrungen

Die für das End-Konzept vorausgesagten Zustände, z.B. geringe CO-Konzentrationen, wurden nach dem Umbau durch Messwerte bestätigt. Sowohl ThyssenKrupp Xervon Energy als auch ANO Bremen (z.B. in [5]) stellten im Vergleich zu den ursprünglichen Konzepten deutlich günstigere Bedingungen fest.

In Bild 9 sind die früheren und jetzigen CO-Betriebsmessungswerte der ANO Bremen aufgeführt. Die dunklen Balken kennzeichnen die CO-Werte des früheren Konzeptes (bis einschl. 2000), die hellen Balken stellen die CO-Mittelwerte der aktuellen Fahrweise dar. Von 1998 bis 2000 wurden CO-Werte von etwa 30 - 35 mg/m<sup>3</sup><sub>i.N.</sub> gemessen. Die jetzigen Beträge liegen ca. 25 % niedriger (bei etwa 20 - 25 mg/m<sup>3</sup><sub>i.N.</sub>).

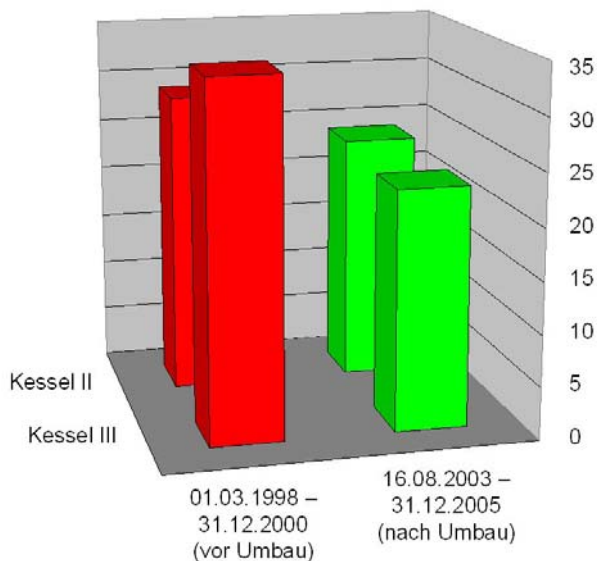


Bild 9: CO-Betriebsmessungen (Mittelwerte am Kesselende in mg/m<sup>3</sup><sub>i.N.</sub>)

Im Februar 2006 führte Thyssen Krupp Xervon Energy interne Netzmessungen am Kessel 2 durch, um die positiven Effekte der Umbaumaßnahmen zu dokumentieren bzw. zu bestätigen. In insgesamt zwei Messebenen (Mitte und Ende 1. Zug) wurden jeweils an 14 Einzelmesspunkten (jeweils 7 je Reihe) Temperaturen und Konzentrationen als 10-Minuten-Mittelwerte aufgenommen. Die CO-Netzmessung in der unteren Messebene ergab, dass die CO-Werte in 11 von 14 Einzelmesspunkten teilweise bereits sehr deutlich unter 100 ppm lagen. Werte im 1-stelligen ppm-Bereich waren keine Seltenheit. Bei drei Messpunkten lagen die CO-Mittelwerte bei den Momentaufnahmen über 100 ppm. Allerdings lagen alle Einzelwerte während der zehnminütigen Messdauer nicht gänzlich über 100 ppm. Beispielsweise lag das Minimum bei 12,8 ppm.

Analog zu den CO-Werten wurden in den meisten Messpunkten mittlere Sauerstoffkonzentrationen von etwa 8 Vol.-% gemessen. Demzufolge kann also davon ausgegangen werden, dass die Verhältnisse grundsätzlich recht homogen sind, wobei solche kurzzeitigen Rostschief lagen, wie sie bei drei Messstellen teilweise zu beobachten waren, immer wieder auftreten können und daher auch allgemein ein großes Problem bei der thermischen Abfallbehandlung darstellen. Abschließend soll anhand der Temperatur-Messwerte gezeigt werden, dass die Verteilungen für eine 2,5-stündige Messung (14 x 10 Minuten-Mittelwerte) sowohl bereits im unteren Bereich des 1. Zuges als auch am Ende des 1. Zuges recht gleichmäßig sind (Bilder 10 und 11).

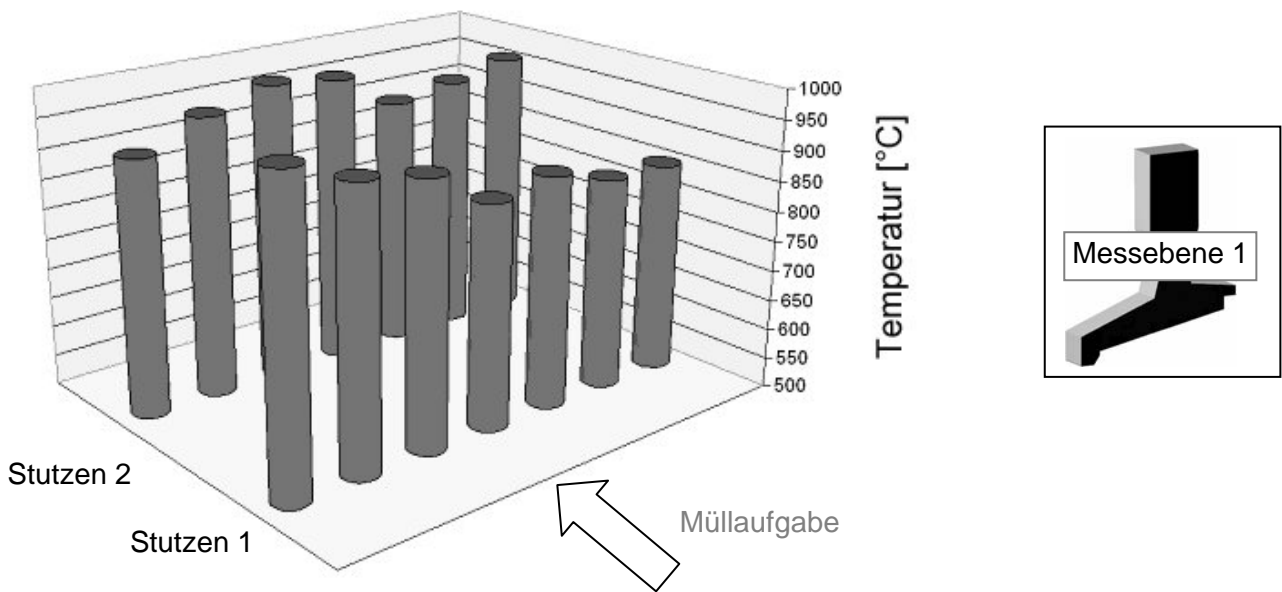


Bild 10: Gemessene Temperaturen in °C (Messebene 1)

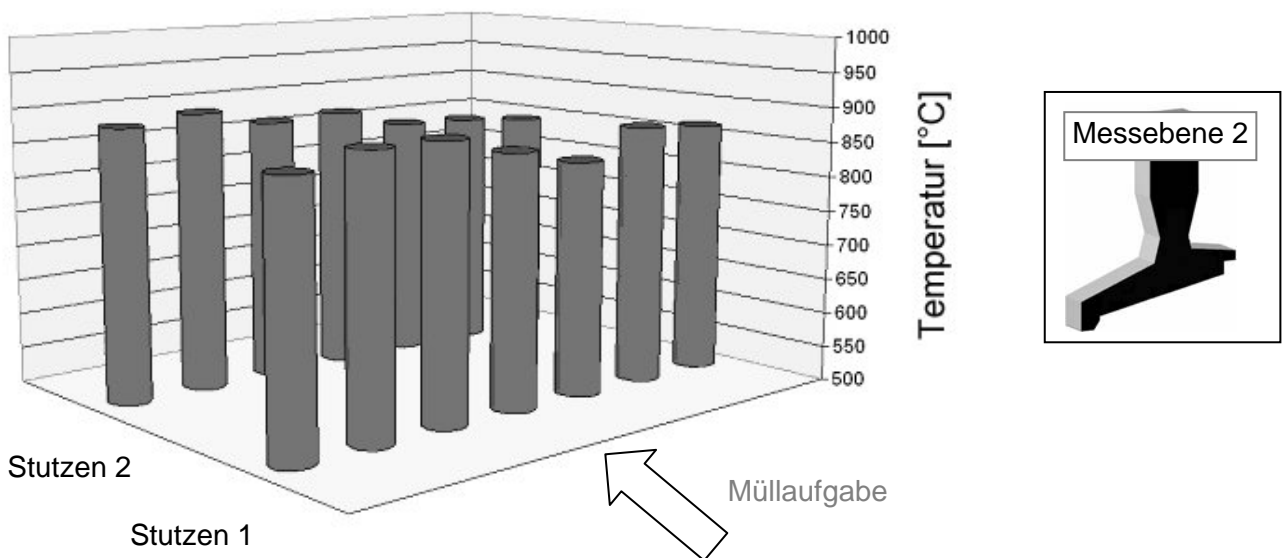


Bild 11: Gemessene Temperaturen in °C (Messebene 2)

Besonders zu erwähnen ist die Tatsache, dass in der unteren Messebene kein Temperaturwert unter 850°C lag, was auch die Simulationsergebnisse vorhersagten. Es gibt 2 Stellen, an denen vergleichsweise leicht erhöhte Temperaturen zu erkennen sind, nämlich beim 1. Stutzen in der Nähe der linken Seitenwand sowie beim 2. Stutzen in der Kesselmitte. Würde aber beispielsweise das Sekundärluftsystem nicht richtig ausgelegt worden sein, wäre die Eindringtiefe bei allen Sekundärluftdüsen zu gering, sodass in allen 7 Messpunkten je Stutzen niedrige O<sub>2</sub>-Werte bzw. hohe CO- und Temperatur-Werte hätten gemessen werden müssen. Des Weiteren ist zu anmerken, dass am selben Tag bei einer 2. Netzmessung beispielsweise an der Messstelle „1. Stutzen - linke Seitenwand“, bei der vorher noch leicht erhöhte Temperaturen bzw. etwas abgesenkte Sauerstoff-Werte auf Grund der Rostschiefelage gemessen worden sind, die höchsten O<sub>2</sub>-Mittelwerte aufgenommen wurden. Auch dies bestätigt ebenfalls, dass das Gesamtsystem grundsätzlich recht gut ausgelegt ist.

Die Netzmessung für Messebene 2 sieht außergewöhnlich gleichmäßig aus, insbesondere wenn man sich noch einmal verdeutlicht, dass zwischen dem ersten und dem letzten Messpunkt mehr als 2 Stunden lagen. Es ist ebenfalls zu beobachten, dass sich die leichten Schiefelagen der unteren Messebene nicht bis in die obere Messebene auswirken, was erneut für das neue Gesamtkonzept spricht. Demzufolge kann von zufrieden stellenden Ergebnissen und einer Bestätigung der vorhergesagten Simulationsresultate gesprochen werden.

## Zusammenfassung

Zur Erhöhung der Entsorgungssicherheit des anfallenden Abfalls wurden die seit 1969 in Betrieb befindlichen Verbrennungslinien 2 und 3 im Rahmen von Modernisierungen saniert. Hierbei sind insbesondere der Austausch der vorhandenen Walzenrostfeuerung gegen eine wassergekühlte Vorschubrostfeuerung sowie die Konzeption einer neuen Feuerraumgeometrie zu nennen.

Die Feuerraumgeometrie in Kombination mit der Sekundärluftdüsenanordnung wurde simulations-technisch untersucht und optimiert. Die Ausgangsgeometrie ließ noch große Wirbelzonen im Strömungsfeld erkennen, sodass Temperaturen unter 850°C in dieser Totzone existierten. Anschließend wurde eine Geometrie konzipiert, bei der die Rückwandkontur verändert wurde. Diese Veränderung bewirkte positive Effekte im Strömungsfeld, allerdings nur im Bereich der Rückwand. Infolgedessen wurde nach dieser Zwischengeometrie ebenfalls die Vorderwandkontur neu gestaltet. Die Simulationsergebnisse ließen optimierte Verbrennungsbedingungen sowie homogene Verteilungen für das End-Konzept erkennen. Diese homogenen Verbrennungszustände wurden auch nach dem Umbau anhand von Messwerten bestätigt.

Abschließend kann also gefolgert werden, dass anhand der Anlage in Bremen erneut nachgewiesen wurde, dass CFD-Simulationen ein wichtiges Werkzeug für die Optimierung von Rostverbrennungsanlagen sein können.

## 6 Literatur

- [1] LLS Standardkessel Service: Produktinformation am Beispiel der ANO-Bremen, 2005
- [2] Klasen, T., Görner, K.: Einfluss von Feuerraumgeometrie und -wandmaterial auf den Verbrennungsprozess sowie Vorhersage von gefährdeten Gebieten innerhalb einer MVA, VGB-Konferenz: „Thermische Abfallverwertung 2000“, 20.-21.11.2000, Essen
- [3] Klasen, T., Görner, K.: Einfluss diverser Sekundärlufteindüsenkonzepte auf die Müllverbrennung - mittels CFD -, VDI-Tagung "Flammentag", 04.-05.09.2001, Essen
- [4] Görner, K.: Technische Verbrennungssysteme. Springer Verlag, Berlin, 1991
- [5] ANO Bremen: Umwelterklärung 2005