

# Publikation

*Klasen, T., Klein, R.*

*VGB-PowerTech-Zeitschrift, Heft 11/2008*

*Kraftwerk Uerdingen*

*Wirbelschichtkessel*

*CFD-Simulation*

*Betriebserfahrungen*

**InPro-Consult** GmbH

**SIPREU-TEC**

Innovative Prozessoptimierung

**AnSimO GmbH**



## Umbaumaßnahmen am CURRENTA-Kraftwerk L57 im CHEMPARK Krefeld-Uerdingen auf Basis numerischer Strömungsberechnungen

VGB-PowerTech-Zeitschrift  
Heft 11/2008

## Umbaumaßnahmen am CURRENTA-Kraftwerk L57 im CHEMPARK Krefeld-Uerdingen auf Basis numerischer Strömungsberechnungen

Dr.-Ing. Thomas Klasen<sup>1)</sup>, Dipl.-Ing. Roland Klein<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> InPro-Consult GmbH, Geschäftsführer, Essen

<sup>2)</sup> Currenta GmbH & Co OHG (vormals Bayer Industry Services), Betriebsleiter Kraftwerk L57, Krefeld

### **Abstract** *"Modification of the power plant L57 in Krefeld-Uerdingen based on CFD"*

Because of erosion at the pipes of the heat exchangers the fluidized bed boiler in Krefeld-Uerdingen should be modified. An analysis of the actual case and an optimised case by CFD simulations were therefore necessary. Besides the velocity field in front of four filters should be investigated because of some damages at the front filters, too.

At first the velocity field after the injection of the secondary and tertiary air were simulated. As a result of a non-symmetric configuration the influences of the different airbeams were very high and the flue gas stream tended to the front wall. Therefore all damages of the pipes were determined in the real plant as well as in the simulation in these areas.

The numbers of the secondary air nozzles and the nozzle diameters were changed (rear wall = front wall). The local maximum rate of erosion could be reduced from  $4,6E-7$  to  $1,1E-7$   $kg/m^2s$  for example with this new configuration (reduction of around 75%). Also very improved operation data could be measured after the modification. CO as an indicator of the burnout could be decreased by 40%.

With regard to the study of the four filters the use of CFD were also very successful. An optimised case with special plates led to a homogeneous flow field. Therefore all filters showed nearly the same separation of dust particles. No damages at the front filters were determined in the real plant and no renewals were necessary after the modifications.

### **Kurzfassung**

Insbesondere wegen starker Erosions- und Verschleißerscheinungen an den Heizflächenrohren sollte das CURRENTA-Kraftwerk L57 (Wirbelschichtkessel) im CHEMPARK Krefeld-Uerdingen saniert werden. Hierfür wurden Ist-Zustände der verschiedenen Bauteilkomponenten (Heizpakete, Sekundär- und Tertiärlufteindüsung sowie Gewebefilter) durch eine numerische Strömungsberechnung abgebildet und anschließend optimiert.

Die Hauptströmung konnte durch eine Modifikation der vorderen Sekundärlufdüsen (Anzahl und Durchmesser) vergleichmäßig werden, wodurch auch die Anströmung der Heizflächenrohre verbessert werden konnte. Nach dem Umbau und einer 7-monatigen Betriebszeit konnten keine Verschleißerscheinungen an den Rohren festgestellt werden. Ebenfalls wurden deutlich geringere CO-Werte im Nennlastbetrieb nach dem Umbau gemessen (Abnahme um ca. 40%).

Mit Hilfe von Leitblechen vor den 4 Gewebefiltern konnten die Staubemissionen auf das Niveau der Nachweisgrenze reduziert werden. Im Vergleich zu der ursprünglichen Konfiguration ist ein Erneuern der Filter nun seltener notwendig.

## Einleitung

Die Firma CURRENTA, Manager und Betreiber des CHEMPARK, versorgt den Standort Krefeld-Uerdingen mit Prozessdampf (Druckstufen: 6, 16 und 110 bar) aus zwei Kraftwerken nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung, d.h. mit einer Brennstoffausnutzung von fast 85 % (Bild 1).

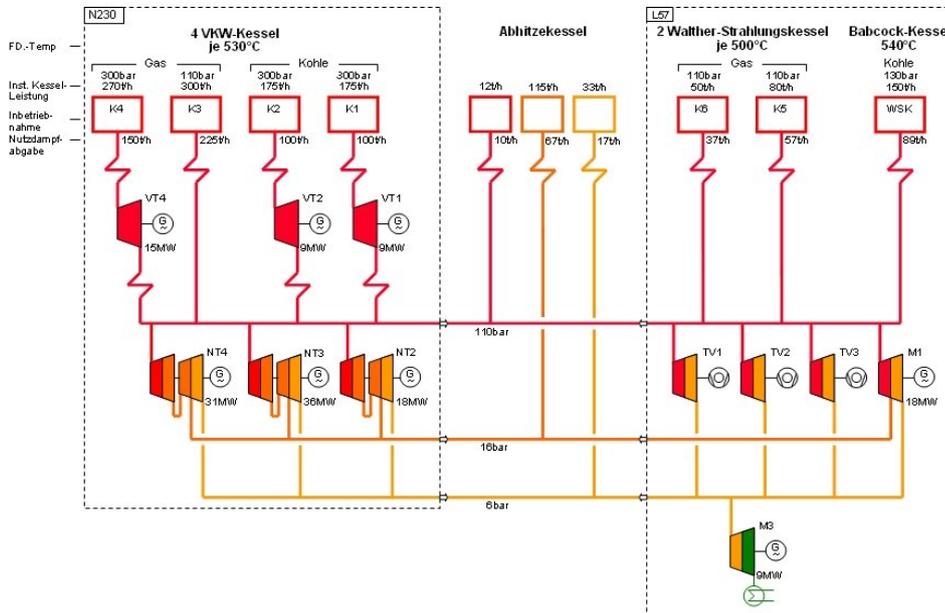


Bild 1: Kraftwerk der CURRENTA im CHEMPARK Krefeld-Uerdingen

Die Gesamtfeuerungsleistung beider Kraftwerke beträgt dabei  $845 \text{ MW}_{\text{therm}}$ . Als Brennstoffe werden hauptsächlich Steinkohle und Erdgas eingesetzt, wobei die steinkohlebefeueten Kessel den Grundlastbetrieb abdecken. Nach 15 Jahren Betrieb und 108.000 Betriebsstunden sollte der Wirbelschichtkessel (Steinkohlefeuerung) im Kraftwerk L57 der CURRENTA zum ersten Mal umfangreich wie folgt saniert sowie gleichzeitig optimiert werden:

- Erneuerung der Rohrbündel-Heizflächen ECO II, Verdampfer (Tragrohrschirm), Ueberhitzer I, II und III
- Wärmetechnische Optimierung der Heizflächen (Vergrößerung Verdampfer)
- Verbesserung der Zugänglichkeit für Reparaturen im Bereich der Ueberhitzerrohre

Da in der Vergangenheit starker Erosions-Verschleiß an den Heizflächenrohren zu hohen Reparaturkosten und Ausfällen geführt hatte und die Erosionsrate vor allem von der dritten Potenz der Partikelgeschwindigkeit abhängig ist, sollten die kompletten Umbaumaßnahmen unter Berücksichtigung des Strömungsverhaltens der stark staubbeladenen Rauchgase erfolgen.

16 Monate vor dem geplanten Stillstandstermin wurden daher strömungstechnische Untersuchungen mittels CFD-Rechnungen (Computational Fluid Dynamics) in mehreren Schritten durchgeführt:

1. Darstellung des Ist-Zustandes, Vergleich der Ergebnisse mit Betriebserfahrungen (Schadensstatistiken, Temperatur- und Strömungsmessungen)
2. Darstellung und Vergleich mit geplantem Umbau
3. Optimierungen mit verschiedenen Designstudien / Strömungsmodellen

## Theorie

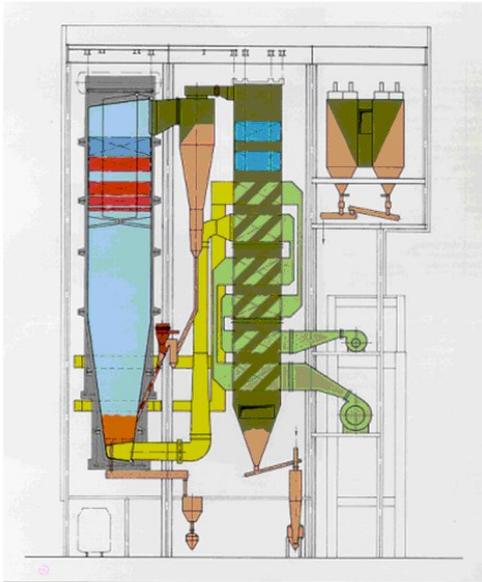
Anlagen- und Prozessoptimierungen wurden traditionell mit Hilfe von kostspieligen sowie zeitintensiven Messkampagnen durchgeführt. Das Werkzeug „CFD“ stellt seit einigen Jahren eine echte Alternative hierzu dar. „CFD“ steht für „Computational Fluid Dynamics“, was mit „Numerischer Strömungsberechnung“ übersetzt werden kann. Numerisch deshalb, weil die Gleichungssysteme, welche die chemischen und physikalischen Vorgänge abbilden, so komplex sind, dass sie nicht analytisch, sondern auf numerischem Weg mittels eines PC gelöst werden. Weil die Rechnerleistungen in den vergangenen Jahren deutlich angestiegen sind, wurden solche CFD-Simulationen zunehmend wirtschaftlicher. Es können IST- oder Soll-Zustände in kürzester Zeit berechnet und analysiert werden. Messungen entfallen zwar nicht gänzlich, da die Validierung der Simulationsmodelle anhand von Messwerten erfolgt. Wird die Eignung dieser Ansätze aber erfolgreich überprüft, so können sie innerhalb ihres Gültigkeitsbereichs dazu eingesetzt werden, experimentelle Messungen auf Grund von Zeit- und Kostenersparnissen zu ersetzen. Eine Optimierung auf Basis von „CFD“ kann sich infolgedessen schon nach wenigen Wochen amortisieren.

Gas-, Öl- und Kohlenstaubbrenner lassen sich wegen einer vergleichsweise geringen Partikelbelastung relativ problemlos abbilden und sind daher bereits seit vielen Jahren Stand der Technik. Bei Rostverbrennungssystemen können die entwickelten Modelle für die Gasphase erfolgreich im Feuer- und Strahlraum angewendet werden. Für die heterogene Verbrennung auf dem Rost lassen sich diese Ansätze nicht anwenden. In [1] kann ein eindimensionales Submodell gefunden werden, mit dem Temperatur-, Konzentrations- und Geschwindigkeitsprofile oberhalb des Rostes durch eine integrale Bilanzierung näherungsweise bestimmt und somit die üblichen CFD-Codes angewendet werden können.

In einer Wirbelschicht ist die Partikelbelastung der Gasphase allerdings um ein Vielfaches höher als bei den gerade beschriebenen Verbrennungssystemen. Infolge dessen lässt sich der eigentliche Prozess im Bereich des Wirbelschichtbodens mit reinen Strömungsberechnungen praktisch nicht abbilden. Des Weiteren müssten auch Turbulenz- und Strahlungsmodelle auf Grund der hohen Partikelbelastung modifiziert werden. In vielen Fällen reicht es aber schon aus, den Strömungsbereich oberhalb der eigentlichen Wirbelschicht zu analysieren und z.B. die Eindüsung von Sekundär- oder Tertiärluft zu optimieren. Durch eine "falsche" Strömungsführung können Teile der nachfolgenden Heizflächen besonders stark beansprucht werden, unabhängig davon, wie gut die Verbrennungsreaktionen in der Wirbelschicht ablaufen.

## Anlagenbeschreibung

Der CIRCOFLUID Wirbelschichtkessel ist durch zwei Kesselzüge gekennzeichnet, zwischen denen zwei Zyklone angeordnet sind, wie Bild 2 zeigt.

**Trommelkessel im Naturumlauf**

atmosphärische Wirbelschichtfeuerung

System: CIRCOFLUID

**Baujahr:** 1992**Betriebsstunden:** 108.750 (bis Umbau)**Leistung:** 105 MW<sub>therm</sub>**Dampfleistung:** 150 t/h (bei 130bar, 540°C)**Brennstoffe:**

Steinkohle / Braunkohle / Erdgas

flüssige und gasförmige Produktionsrückstände

Bild 2: Wirbelschichtkessel des Kraftwerkes L57

Der 1. Zug wird aus Membranwänden gebildet, die im unteren Bereich mit einer SiC-Stampfmasse sowie im oberen Bereich unterhalb der Heizflächenbündel mit einem wärmedämmenden Feuerbeton abgedeckt sind. Der 2. Zug ist als Blechkanal gestaltet. Im 1. Zug wird der größte Teil des zugeführten Brennstoffes in einem hochexpandierten Wirbelbett zusammen mit der für die Fluidisierung benötigten Wirbelluft verbrannt. Die Temperaturregelung (ca. 850 °C) erfolgt durch die umlaufende (zirkulierende) Asche. Das stark staubbeladene Rauchgas (etwa 2 kg Asche / m<sup>3</sup><sub>i.N.</sub> Rauchgas) durchströmt anschließend den oberhalb des Wirbelbettes angeordneten Feuerraum, in den die weitere Verbrennungsluft (ca. 60%) zugemischt wird. Der restliche Brennstoff verbrennt dabei mit Temperaturen von ca. 1.000 °C. In den Heizflächen wird die Wärme an den Wasser/Dampf-Kreislauf übertragen, so dass die Temperatur des Rauchgases bei Austritt aus dem 1. Zug etwa 470 °C beträgt. Nachdem in den Zyklonen der Hauptanteil der Asche aus dem Rauchgas abgetrennt wurde, wird im 2. Zug die restliche Wärme an weitere wasserführende Heizflächen (Economiser) sowie an Wärmetauscher zur Luftvorwärmung abgegeben. Die Rauchgase werden dabei auf eine Resttemperatur von 120 - 130°C abgekühlt. Die in den Zyklonen abgetrennte Umlaufasche wird in das Wirbelbett zur Kühlung zurückgeführt. Folgende Emissionsminderungsmaßnahmen sind integriert:

- Entschwefelung: mit dem Brennstoff wird Kalk direkt vor Eintritt in den Kessel zugegeben, der sich mit dem Schwefel bildende Gips wird über die Verbrennungasche entfernt
- NO<sub>x</sub>-Minderung: durch eine gestufte Zugabe von Verbrennungsluft (Primär-, Sekundär- und Tertiärluft) werden relativ niedrige Verbrennungstemperaturen erzielt, thermisches NO<sub>x</sub> kann nicht entstehen
- Staub: ein aus 8 Kammern bestehender Gewebefilter trennt die restlichen Feinstaubanteile im Rauchgas nach Austritt aus dem 2. Zug ab

## Simulationsergebnisse

Im Rahmen der gesamten Studie wurden zwei Bereiche des Wirbelschichtkessels (A) sowie die Gewebefilter (B) näher untersucht:

- A1. Strömungszustand im Kessel mit Hauptaugenmerk auf Erosionserscheinungen (Schadensanalyse)
- A2. Strömungsfeld des heißen Rauchgases zwischen Wirbelschicht und Heizflächen, inklusive der Eindüsung von Sekundärluft (SL) und Tertiärluft (TL) (Ist- und Soll-Zustand)
- B. Strömungszustand vor den vier Gewebefiltern (Ist- und Soll-Zustand)

### Wirbelschichtkessel

Zunächst wurde der Ist-Zustand des Wirbelschichtkessels abgebildet. In Bild 3 sind Geschwindigkeitsverteilungen unterhalb des Kessels sowie daraus resultierende Rohrschädigungen dargestellt.

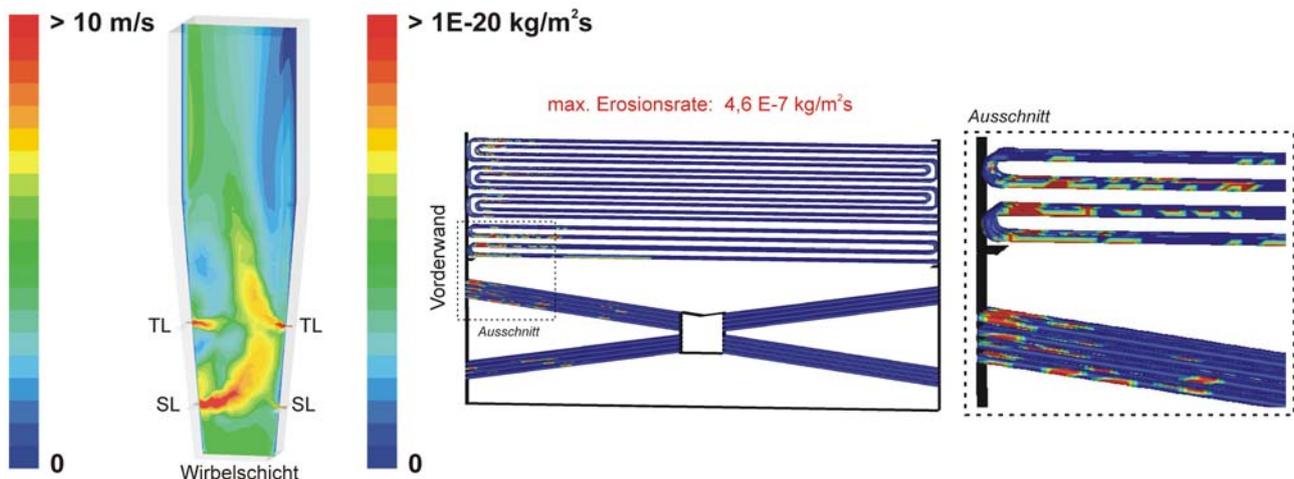


Bild 3: Abbildung des Ist-Zustandes (links: Geschwindigkeit in m/s, rechts: Erosionsrate in kg/m²s)

Den Grafiken ist deutlich zu entnehmen, dass nur im Bereich der Vorderwand Schädigungen vorhergesagt wurden. Dies entspricht genau den Betriebserfahrungen aus den letzten Jahren. Immer wieder mussten nach kurzen Fahrweisen Rohre oder Rohrbögen auf Grund von Erosionen erneuert werden. Üblicherweise basieren diese hohen Verschleißerscheinungen an lokalen Stellen auf dem Eindüsungskonzept der Sekundär- bzw. Tertiärluft. Eine ungleichmäßige Verteilung der Verbrennungsluft auf die einzelnen Düsen sowie eine unsymmetrische Düsenkonfiguration zwischen Vorder- und Rückwand lassen die heißen Rauchgase zur Vorderwand kippen. Die Hauptströmung wird somit signifikant von der Verbrennungslufteindüsung oberhalb der Sekundär- und Tertiärluftdüsen dominiert. Durch das Anlegen der Hauptströmung an die Vorderwand werden die Heizflächen an dieser Stelle durch eine große Anzahl an heißen Partikeln mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten besonders stark beansprucht. Sowohl große Partikel, die auf Grund ihrer Trägheit nicht gänzlich der Umströmung der einzelnen Rohre folgen und somit teilweise auf die Heizflächen aufprallen, als auch kleinste Stäube, die sich beispielsweise in Wirbelzonen im Bereich von Rohrbögen ansammeln, führen zu den genannten Schädigungen.

Ansatzpunkt für eine mögliche Optimierung war die Eindüsung der Verbrennungsluft. Wie z.B. in [2] beschrieben, kann durch eine optimale Luftverteilung in Kombination mit einer günstigen Anlagengeometrie (z.B. symmetrisch) eine homogene Strömungsführung erzielt werden. Die Kesselgeometrie weist bis auf Durchmesser und Anzahl der vorderen SL-Düsen ein symmetrisches Bild auf. Daher wurden folglich nur die Sekundärluftdüsen an der Vorderwand verändert. Die Anströmung der Heizflächen auf Basis einer Gleichverteilung (SL- und TL-Düsen alle gleich beaufschlagt) ist in Bild 4 dargestellt.

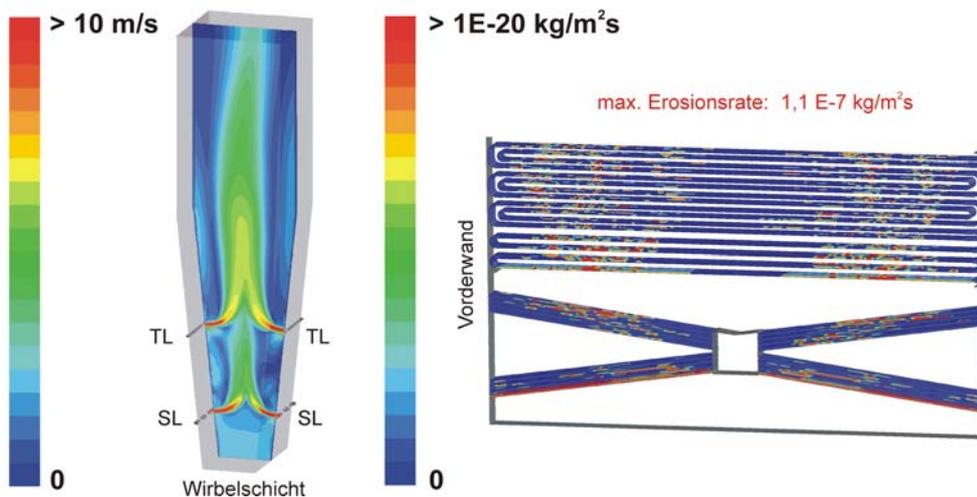


Bild 4: Umbau-Zustand (links: Geschwindigkeit in m/s, rechts: Erosionsrate in kg/m<sup>2</sup>s)

Es ist deutlich zu beobachten, dass die Anströmung der ersten Wärmetauscherrohre viel homogener ist. Die Hauptströmung befindet sich in der Kesselmitte, wodurch die Heizflächen zwar über den gesamten Querschnitt beansprucht werden (gekennzeichnet durch mehr "rote Bereiche" in Bild 4), allerdings ist die Beanspruchung viel gleichmäßiger und demnach lokal auch nicht so ausgeprägt. Entscheidend ist die maximale Erosionsrate, die somit von  $4,6E-7$  auf  $1,1E-7$  kg/m<sup>2</sup>s, also um den Faktor "4", minimiert werden konnte. Ebenso kann hierdurch ein geringerer Geschwindigkeitsgradient sowie eine homogene Temperaturverteilung vor der 1. Heizfläche erzielt werden, was sicherlich auch positiv zu bewerten ist.

Eine zusätzliche Studie sollte die Oxidation von CO untersuchen. Hierfür wurde eine komplette Verbrennungsrechnung durchgeführt. Durch die neue Düsenkonfiguration in Kombination mit einer optimierten Luftaufteilung wurden signifikant geringere CO-Werte am Ende des Berechnungsgebietes vorausgesagt. Wird die Luft beispielsweise nur durch die Sekundärluftdüsen zugeführt, erhöht sich die Austrittsgeschwindigkeit sowie hierdurch auch die Vermischung. Die CO-Werte als Indikator für den Ausbrand konnten allein durch die erhöhte Eindringtiefe der Luftstrahlen um den Faktor "10" abgesenkt werden.

### Gewebefilter

Eine ungünstige Anströmung der vier Gewebefilter hatte in den letzten Jahren zur Folge, dass vor allem die vorderen Filter 1 und 2 sehr stark beansprucht wurden. Eine hohe Anzahl an abgeschiedenen Partikel bzw. Erosionserscheinungen führten schließlich zu Schäden an den Gewebefiltern und infolgedessen zu geringen Standzeiten. Dies wurde durch eine CFD-Simulation bestätigt, wie Bild 5 zeigt.

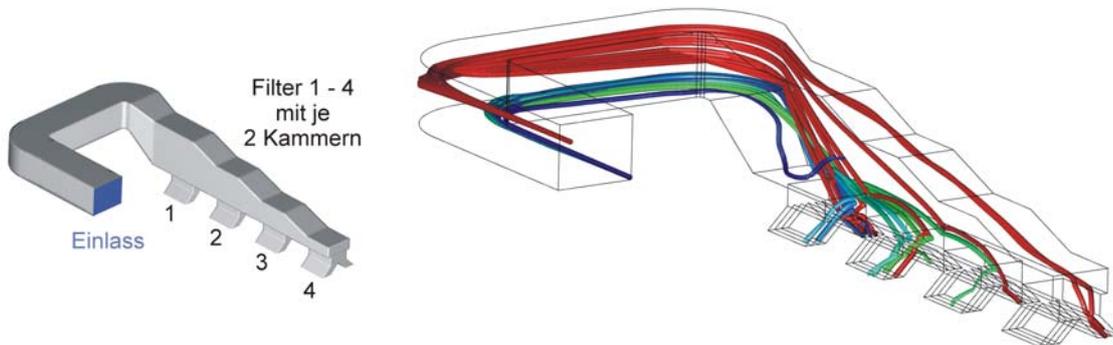


Bild 5: Partikelbahnen im Kanal vor den Gewebefiltern (Ist-Zustand)

Anhand von 20 dargestellten Partikelbahnen (2 Startpunkte mit je 10 Partikelbahnen in Abhängigkeit des Durchmessers) mit Korngrößen zwischen  $0,05$  und  $877 \mu\text{m}$  kann schon erkannt werden, dass die vorderen Filter deutlich mehr Staub abscheiden müssen als die Filter 3 und 4. Grund hierfür sind die vielen Umlenkungen vor den Gewebefiltern, die u.a. zu großen Wirbelzonen führen. Gerade vor Filter 1 entsteht eine große Totzone, die die Partikelbahnen der kleinen und großen Partikel deutlich beeinflusst. Vor allem die großen Partikel, die auch bei der Massenbilanz eine wichtige Rolle spielen, durchströmen praktisch ausnahmslos die Filter 1 und 2.

Mit Hilfe von Leitblechen können die Anströmungsverhältnisse nach größeren Umlenkungen grundsätzlich deutlich verbessert werden. Auch hierbei wurden Simulationsberechnungen für verschiedene Leitblech-Konfigurationen (Anzahl, Länge, Form, ...) durchgeführt. Bild 6 zeigt einen optimierten Zustand.

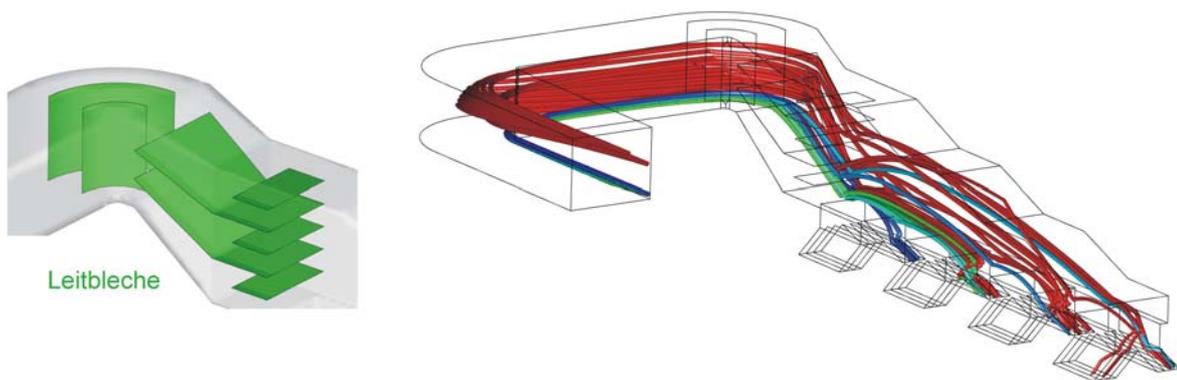


Bild 6: Partikelbahnen im Kanal vor den Gewebefiltern (Soll-Zustand)

Die Strömungsverhältnisse nach den ersten beiden  $90^\circ$ -Umlenkungen sowie die Anströmungszustände zu den einzelnen Gewebefiltern konnten deutlich verbessert werden, sodass auch die einzelnen Gewebefilter gleichmäßiger angeströmt werden. Im Vergleich zum Ist-Zustand sind nun etwa gleich viele Partikel am Eintritt der vier Filter zu erkennen.

Eine noch genauere Analyse ist mit Hilfe der prozentualen Verteilung auf die vier Filter möglich. In Tab. 1 sind Prozentzahlen für alle Staubpartikel mit Korngrößen zwischen 0,05 und 877 µm dargestellt.

	Filter 1	Filter 2	Filter 3	Filter 4
Ist-Zustand	44 %	32 %	12 %	12 %
Soll-Zustand	10 %	34 %	33 %	23 %

Tab. 1: Verteilung der Stäube auf die einzelnen Gewebefilter (Ist- und Soll-Zustand)

Den Werten ist zu entnehmen, dass die Beanspruchung der vorderen beiden Filter deutlich gesenkt werden konnte. Sowohl anhand der Partikelbahnen als auch aus den prozentualen Verteilungen kann also gefolgert werden, dass die Verfügbarkeit der Filter beim optimierten Zustand signifikant ansteigen sollte.

### Betriebserfahrungen

Die Gesamtanlage wurde auf Basis der CFD-Studie umgebaut. Anhand von diversen Indikatoren und Messwerten kann aktuell nach mehreren Monaten Fahrweise ein positiver Trend festgehalten werden. Die berechneten Vorhersagen konnten demnach bestätigt werden, was nachfolgend detailliert beschrieben ist.

### Wirbelschichtkessel

In den ersten 7 Monaten konnte kein Rohrschaden im 1. Zug festgestellt werden. Basis für diesen Trend ist eine gleichmäßige Anströmung der Heizpakete, was sich auch anhand der CO-Werte belegen lässt. Die Verbrennungsbedingungen haben sich dermaßen verbessert, dass die gemessenen CO-Werte um ca. 40% gesenkt werden konnten (Bild 7)

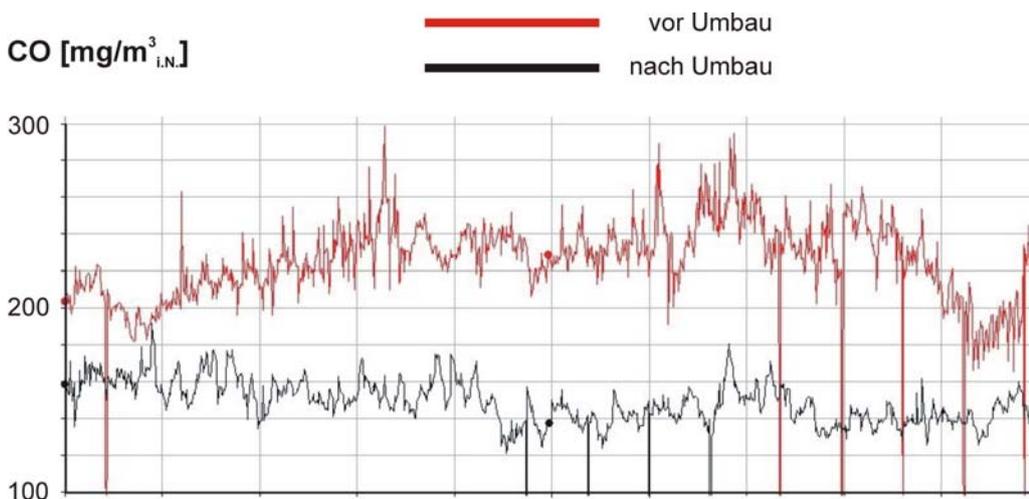


Bild 7: Gemessene CO-Werte vor und nach dem Umbau (Aufzeichnung über jeweils 5 Tage)

### Gewebefilter

Auch hierbei konnte die CFD-Studie erfolgreich eingesetzt werden, was anhand der Staubemissionen bestätigt wird. Vor dem Umbau mussten vor allem die Filterschläuche in den

ersten Kammern häufig erneuert werden. Übliche Messwerte lagen hierbei im Bereich um  $20 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.}}$ . Durch den Einsatz von Leitblechen konnte die Strömung so vergleichmäßigt werden, dass die neusten Messaufzeichnungen Staubemissionen anzeigen, die praktisch die gesamte Zeit unter der Nachweisgrenze ( $< 3 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.}}$ ) liegen. Ein Erneuern der Filter ist zur Zeit nicht erforderlich.

## Zusammenfassung

Das CURRENTA-Kraftwerk L57 im CHEMPARK Krefeld-Uerdingen sollte in erster Linie auf Grund von starken Erosions- und Verschleißerscheinungen an den Heizflächenrohren des kohlebefeuerten Wirbelschichtkessels saniert werden. Im Vorfeld wurden daher zunächst die Ist-Zustände der verschiedenen Bauteilkomponenten durch eine numerische Strömungsberechnung analysiert und anschließend optimiert. Neben der Simulation der Heizpakete wurde die Anströmung der 1. Rohrreihe auf Basis der Sekundär- und Tertiärlufteindüsung untersucht. Des Weiteren wurden auch die Anströmverhältnisse der Gewebefilter simulationstechnisch beschrieben, da zwei von vier Filtern stark beansprucht worden sind und dementsprechend häufig ausgetauscht werden mussten.

In allen drei Teilbereichen konnte die CFD-Simulation wichtige Resultate liefern und ungünstige Strömungsbereiche aufzeigen. Wichtiges Merkmal eines optimierten Zustandes ist üblicherweise eine homogene Strömung. Durch eine Veränderung der Sekundärluftdüsen (gleiche Anzahl und gleicher Durchmesser in Vorder- und Rückwand) konnte die Hauptströmung deutlich vergleichmäßigt werden, was zu einer verbesserten Anströmung der Heizflächenrohre führte. Nach 7-monatiger Betriebszeit, nach dem Umbau, konnten keine Verschleißerscheinungen an den Rohren festgestellt werden. Die Beanspruchung erfolgt nun zwar über den gesamten Querschnitt, allerdings konnten die lokalen Spitzen deutlich verringert werden. Beispielsweise wurde anhand der CFD-Simulation eine Abnahme der maximalen Erosionsrate um den Faktor "4" vorausgesagt. Diese Strömungsvergleichmäßigung hatte auch einen direkten Einfluss auf die Verbrennung. Nach dem Umbau wurden deutlich geringere CO-Werte im Nennlastbetrieb gemessen (Abnahme um ca. 40%).

Ebenfalls auf Basis der numerischen Berechnung wurden Leitbleche vor den 4 Gewebefiltern integriert. Hierbei sanken die Staubemissionen auf das Niveau der Nachweisgrenze. Ein Erneuern der Filter ist nun, im Gegensatz zu der ursprünglichen Konfiguration, seltener notwendig.

Es konnte demnach nachgewiesen werden, dass CFD-Simulationen ein wichtiges Werkzeug für die Schadensanalyse und nachfolgende Anlagenoptimierung sind.

## Literatur

- [1] Klasen, T.: Erstellung und Validierung eines mathematischen Modells zur Abbildung der heterogenen Verbrennung auf dem Müllrost und dessen Anwendung bei Realanlagen hinsichtlich einer optimierten Feuerungstechnik, Dissertation, Essen, 2003
- [2] Klasen, T., Görner, K., Auel, W., Sudau, B.: Optimierung des MHW Bremen auf Basis von CFD-Simulationen und Betriebserfahrungen nach dem Umbau, VGB-PowerTech-Zeitschrift, Heft 7/2006