

Maßgeschneiderte Anlagen durch Strömungssimulation

# Optimierung der Rauchgasreinigung

Die Rauchgasreinigung in Kraftwerksanlagen ist heute ein etabliertes Verfahren. Um dem Kundenwunsch nach einer maßgeschneiderten Anlage nachzukommen, setzt Sulzer Innotec Strömungssimulation ein. Zur Validierung der Computermodelle wurden intensive Messungen an Testständen durchgeführt. Dank diesem Mittel ist Sulzer Innotec in der Lage, den Kunden eine schnelle und hochwertige Beratung zur Auslegung oder Verbesserung ihrer Anlagen zur Verfügung zu stellen.

In Kohlekraftwerken und Müllverbrennungsanlagen wird Kohle bzw. Abfall zur Gewinnung von Wärmeenergie und Strom verbrannt <sup>1</sup>. Bei der Verbrennung entsteht Rauchgas, das neben gasförmigen Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) auch feste Aschepartikel enthält. Im Allgemeinen besteht die Rauchgasreinigung aus den folgenden 3 Schritten:

- DeNO<sub>x</sub>-Anlage (SCR – *Selective Catalytic Reduction*)
- Staubabscheidung
- Entschwefelung.

## Rauchgasreinigung

Zur Entfernung der Stickoxide aus dem Rauchgas hat sich das SCR-Verfahren durchgesetzt. Hier werden die Stickoxide in einem Wabenkatalysator mithilfe von gasförmigem Ammoniak oder einer wässrigen Ammoniaklösung zu Luftstickstoff und Wasser reduziert. Sowohl das Ammoniak als auch die Ammoniaklösung muss in geeigneter Form dem Rauchgas zugeführt werden und mit Mixern homogen vermischt werden. Für beides, die Eindüsung des Additivs als auch die Vermischung,

stellt Sulzer Chemtech Lösungen zur Verfügung.

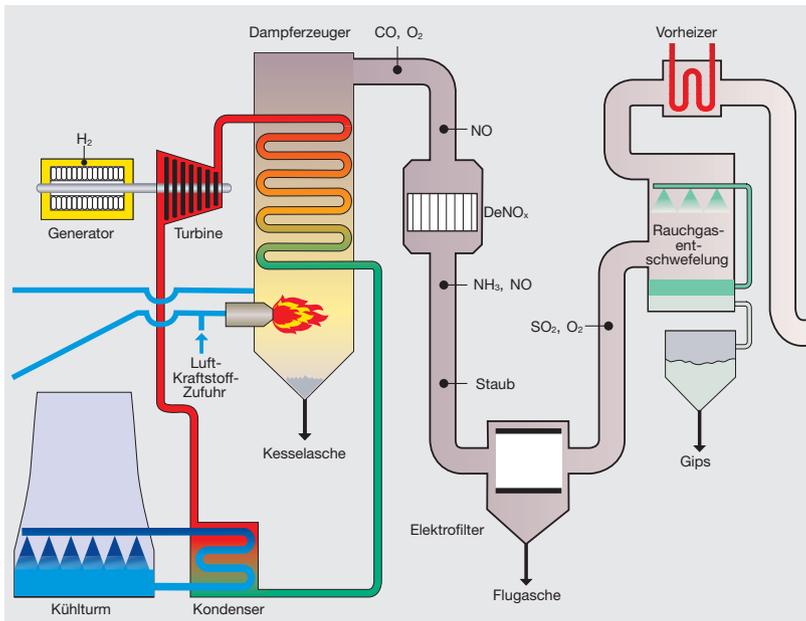
Zur Staubabscheidung werden Elektrofilter eingesetzt. In einem ersten Schritt werden die Staubpartikel in einem elektrischen Feld stark aufgeladen. Die aufgeladenen Staubpartikel wandern dann durch die einwirkende elektrische Kraft quer zur Strömungsrichtung des Gases zur Niederschlagselektrode, wo sie ihre Ladung abgeben. Von dort werden sie in regelmäßigen Abständen abgeführt und in Sammelbunker aufgefangen.

Bei der Entschwefelung ist es die Kalkwäsche, die sich weltweit am meisten durchgesetzt hat. Hierbei wird unter Zugabe von Kalk Gips produziert. Dies geschieht meist in einem Gegenstromwäscher, dem Absorber. Hier durchströmt das Rauchgas einen Behälter von unten nach oben. Im Gegenstrom wird in mehreren Ebenen eine flüssige kalkhaltige Waschsuspension eingesprüht. Das Spray rieselt fein verteilt nach unten und reagiert dabei mit den im Rauchgas enthaltenen Schwefelverbindungen.

## Beschädigung durch Abrasion

Je nach Betrieb der Anlage können obige Schritte auch in anderer Reihenfolge durchgeführt werden. Wenn sich – wie in der hier beschriebenen Reihenfolge – die Staubabscheidung hinter der DeNO<sub>x</sub>-

<sup>1</sup> Fließschema eines thermischen Kraftwerks inklusive Abgasreinigungsanlage.





2 Schäden durch Abrasion an einem Flansch.

Anlage befindet, ist der Staubanteil in der DeNO<sub>x</sub>-Anlage hoch. Die hohe Staubbelastung kann durch Abrasion der Staubpartikel am Katalysator die Standzeit des Katalysators merklich verringern.

Um die Umweltauflagen zu erfüllen, muss der teure Katalysator in diesem Fall öfters ersetzt werden. Aber auch die übrigen Einbauten wie die Ammoniak-Zudosierung, die statischen Mischer oder auch Umlenkbleche und die Kanalwände, können dadurch beschädigt und im Extremfall zerstört werden 2.

### Maßgeschneiderte Anlagen durch Simulationen

Zur Auslegung und Optimierung einer DeNO<sub>x</sub>-Anlage führt Sulzer Innotec CFD-Simulationen (*Computational Fluid Dynamics*) durch. Dies hat den Vorteil, dass schon in einer frühen Projektphase verschiedene mögliche Konfigurationen der Einbauten simuliert werden. Dadurch können die Ammoniak-Zudosierung, der statische Mischer und weitere zusätzliche Einbauten – wie zum Beispiel Umlenkbleche – zur Strömungshomogenisierung so ausgewählt werden, dass für jede Anlage eine maßgeschneiderte Lösung gefunden wird.

Maßgeschneidert bedeutet in diesem Zusammenhang ein optimal eingemischtes Ammoniak und eine homogene, senkrecht zum Katalysator gerichtete Strömung bei einem möglichst kleinen Druckverlust der Einbauten.

### Validierung der Simulationen

Bei der Simulation ist die geeignete Wahl des Simulationsgebietes, der physikalischen Modelle und des numerischen Solvers von großer Bedeutung. Sulzer

Innotec ist schon seit über 20 Jahren auf dem Gebiet der CFD-Simulationen tätig. Ein Schwerpunkt ist dabei schon immer die Simulation von Rauchgasreinigungsanlagen gewesen.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse führte Sulzer Innotec in Zusammenarbeit mit Sulzer Chemtech intensive Messungen durch. Da es oft nur schwer möglich ist, Messungen an in Betrieb befindlichen Anlagen durchzuführen, wurden diese Messungen bevorzugt an Modellen durchgeführt. Dort wurden die Strömungsbedingungen so eingestellt, dass sie denen der realen Anlage entsprechen. Dank dieser aufwendigen Vergleichsmessungen kann heute nun gewährleistet werden, dass für jede Problemstellung die geeigneten Modelle und Simulationsverfahren verwendet werden 3.

### Verfahren in einer DeNO<sub>x</sub>-Anlage

Am Beispiel der Simulation der Strömungsverhältnisse im DeNO<sub>x</sub>-Teil einer Rauchgasreinigungsanlage soll hier gezeigt werden, welche vielfältigen Einflussfaktoren und Modelle bei der Simulation berücksichtigt werden müssen.

Die Simulation von DeNO<sub>x</sub>-Anlagen kann grundsätzlich in 3 verschiedene Varianten unterteilt werden, die sich hinsichtlich Komplexität und Modellierungstiefe unterscheiden:

- DeNO<sub>x</sub> → gasförmige Zudosierung
- DeNO<sub>x</sub> → flüssige Zudosierung (Spray)
- Abrasion durch Staubpartikel.

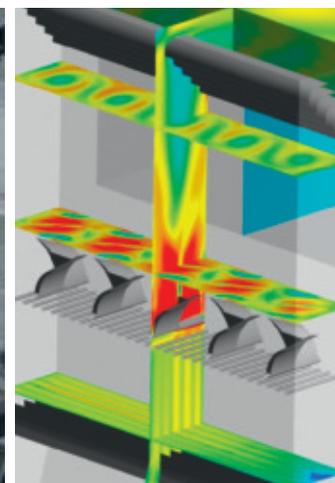
### Gasförmige Ammoniak-Zudosierung

Die aus der Sicht der Modellierung einfachste Variante ist die Zudosierung von gasförmigem Ammoniak-Wasserdampf-Gemisch (Ammoniakwasser wird in diesem Fall extern verdampft) in eine staubfreie Abgasströmung. Hier kann man das zugegebene Ammoniak als *Tracer-Gas* behandeln. Das heißt, es hat in diesem Fall die gleichen Stoffeigenschaften und das gleiche hydraulische Verhalten wie der Abgasstrom. Dieser Ansatz ist hier gerechtfertigt, da die Konzentration des Ammoniaks im Abgasstrom nur sehr gering ist. Das gasförmige Ammoniak wird mithilfe eines sogenannten AIG-Verteilers (*Ammonia Injection Grid*) punktuell über den Querschnitt verteilt zugegeben.

Entscheidend für eine hohe Katalysatoreffizienz, d.h. hohe Konversionsrate und geringen Ammoniakverlust, ist, dass das lokale Verhältnis Ammoniak zu NO<sub>x</sub> überall möglichst nahe am stöchiometrischen Verhältnis liegt. Hier kommen die statischen Mischer von Sulzer Chemtech ins Spiel. Diese führen nicht nur zu einer qualitativ guten Einmischung des Ammoniaks in den Rauchgasstrom auf einer kurzen Wegstrecke, sondern gleichzeitig zu einem Ausgleich lokaler Temperatur- und NO<sub>x</sub>-Spitzen.

Dies ist wichtig, da das Temperaturprofil und die NO<sub>x</sub>-Verteilung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen variieren kann. Dadurch gewährleisten die statischen Mischer für einen breiten Last-

3 Validierung der Simulationsergebnisse an Modellanlagen – links: Testanlage, rechts: Simulationsmodell (eingefärbt mit Geschwindigkeitsverteilung).



fallbereich ein homogenes NO<sub>x</sub>/NH<sub>3</sub>-Verhältnis vor dem Katalysator und damit einen effizienten Katalysatorbetrieb. Dies geschieht oft sogar mit niedrigerem Druckverlust als bei Anlagen ohne Mischer, da auf eine komplexe Zudosiergeometrie verzichtet wird. Die wichtigsten Ergebnisse aus der Simulation einer solchen Anlage sind der Druckverlust und die erreichte Mischgüte.

**Flüssige Zudosierung (Spray) von wässriger Harnstofflösung**

Da gasförmiges Ammoniak giftig ist, geht man in dichtbesiedelten Gegenden immer mehr dazu über, anstatt gasförmiges Ammoniak eine wässrige Ammoniaklösung zuzugeben. Die wässrige Lösung wird dabei in Düsen zerstäubt. Die eingedühten Tropfen verdampfen im heißen Rauchgasstrom, und gasförmiges Ammoniak entsteht.

Die Modellierung dieses Prozesses ist viel aufwendiger. Zusätzlich zur Modellierung der reinen Gasströmung muss hier noch die Flugbahn der Flüssigkeitstropfen berücksichtigt werden. Während des Fluges erwärmen sich die Tropfen und verdunsten. Dazu benötigt man geeignete Modelle zur Beschreibung des Wärmeübergangs vom Gas zum Tropfen und zum Stoffübergang vom Tropfen in das Gas. Wichtige Einflussgrößen für die Modellierung des Sprays sind die Tropfengrößenverteilung, die Tropfengeschwindigkeit und der Sprühwinkel der Düse.

Eine gute Kenntnis der Tropfengrößenverteilung ist wichtig, da kleine Tropfen

aufgrund ihres geringeren Impulses der Hauptströmung eher folgen als größere Tropfen und auch schneller verdunsten. Treffen Tropfen auf eine Wand, bildet sich dort ein flüssiger Film. Dies kann zu Problemen führen, da sich dadurch Ablagerungen an der Wand bilden können. Deshalb ist man bestrebt, die Düsen so anzubringen, daß alle Tropfen vor Erreichen einer Wand verdunstet sind. Zusätzlich zum Druckverlust und zur Mischgüte sind bei dieser Simulation auch die Tropfenflugbahnen von Interesse.

**Abrasion durch Staubpartikel**

Unabhängig von der Art der Zudosierung kann zusätzlich auch noch die Auswirkung von Asche- und Staubpartikel aus der Verbrennung auf die Anlage simuliert werden. Hier ist vor allem von Interesse, wo sich diese Partikel ablagern und in wiefern sie Schäden durch Abrasion an der Anlage hervorrufen können. In diesem Fall wird demnach auch noch die 3. Phase, der Feststoffanteil, mitsimuliert.

Eine Anlagerung von Partikeln geschieht in Regionen, wo die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases gering ist im Verhältnis zur schwerkraftgetriebenen Absinkgeschwindigkeit der Partikel. Wenn nach dem Absinken die Reibungs- und Adhäsionskräfte an der Wand zusätzlich noch höher sind als die Impulskraft der Strömung, bleiben die Partikel dort auch liegen und häufen sich an. Die Abrasion hängt ab von der lokalen Erosionsrate der Partikel an der Wand. Die

Erosionsrate ist eine Funktion der Partikelmasse, der Geschwindigkeit des Partikels, des Aufprallwinkels und der Häufigkeit, wie oft ein Partikel eine bestimmte Stelle an der Wand trifft. Daher ist es wichtig, die genaue Partikelgrößenverteilung des Staubes zu kennen und die Flugbahn der Partikel genau zu simulieren.

Bei Umlenkungen im Kanal z.B. erhöht sich infolge der Zentrifugalkraft die Konzentration von größeren Partikeln im äußeren Teil. Die kleineren Partikel, die der Strömung folgen, bleiben eher in der Mitte der Strömung. Hier sind daher geringere Schäden zu erwarten.

Hat man die erosionsgefährdeten Stellen mithilfe einer CFD-Simulation identifiziert, besteht die Möglichkeit, dort speziell entwickelte thermische Spritzbeschichtungen aufzutragen, die die Erosionsrate massiv reduzieren [4].

**Kundennutzen durch Simulationen**

Mittels Strömungssimulation und dank der intensiven Validierung der eingesetzten Tools ist Sulzer Innotec in der Lage, auch komplexe Prozesse in der Rauchgasreinigung zu simulieren und den Kunden eine hochwertige Beratung zur Auslegung oder Verbesserung ihrer Anlagen zur Verfügung zu stellen.

**Joachim Schoeck**  
 Sulzer Markets and Technology AG  
 Sulzer Innotec  
 Sulzer-Allee 25  
 8404 Winterthur  
 Schweiz  
 Telefon +41 52 262 82 30  
 joachim.schoeck@sulzer.com

[4] Partikelflugbahn – links: kleine Partikel folgen der Hauptströmung, rechts: große Partikel kumulieren sich am Boden eines Kanals.

