

Ruscheweyh Consult GmbH Aachen	Vortrag	
--------------------------------------	---------	---

Zur Fachauschusssitzung „Glasschmelztechnologie“ und „Umweltschutz“
am 14.Nov. 2017 in Merseburg

Modellierung und Abgasreinigung

Experimentelle Untersuchungen zu Strömungs- und Mischungsvorgängen bei der Rauchgasreinigung

Prof. Dr.-Ing. Hans Ruscheweyh
Ruscheweyh Consult GmbH
Aachen/Würselen
info@ruscheweyh.de
www.ruscheweyh.de

1. Einleitung

Strömungen in Industrieanlagen sind geprägt durch lokale Strömungsablösungen, die zu starken Turbulenzen, Schiefklagen der Strömungsgeschwindigkeit, lokale Rückströmungen und zu Strömungsspitzen führen können. Numerische Berechnungen dieser sehr komplexen Strömung führen oft zu unbefriedigenden Ergebnissen. Experimentelle Untersuchungen führen hingegen in der Regel zu weit verlässlicheren Ergebnissen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Ähnlichkeitsbedingungen weitgehend eingehalten werden. Wo das nicht in ausreichendem Maße gelingt, ist auch dem Experiment Grenzen gesetzt.

Es soll hier auf die wichtigsten Ähnlichkeitsbedingungen eingegangen werden, die für die Rauchgasreinigung bedeutsam sind.

2. Ähnlichkeitsbedingungen

2.1 geometrische Ähnlichkeit

Zwingend notwendig ist die geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und Original im gewählten

Maßstab $1 : \lambda$,

wobei alle strömungstechnisch relevanten Elemente nachgebildet werden müssen.

2.2 Reynoldszahl Re

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

mit

v	=	Strömungsgeschwindigkeit in m/s
d	=	typische Abmessung in m
ν	=	kinematische Zähigkeit des Strömungsmediums in m ² /s

Die Reynoldszahl stellt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften dar. Ihre Einhaltung im Modellversuch würde erfordern, die Strömungsgeschwindigkeit in den Überschallbereich zu führen, was sich von selbst verbietet.

Da jedoch die Strömung durch die Ablösungen an Kanten geprägt wird und diese Ablösungen praktisch von der Reynoldszahl unabhängig sind, kann auch mit kleinerer Reynoldszahl im Modellversuch ein übertragbares Ergebnis erzielt werden. Es muss nur dafür gesorgt werden, dass keine laminare Strömung, sondern turbulente Strömung vorliegt. Dies wird erreicht, indem eine Mindest-Reynoldszahl von $\min Re = 10^4$ erreicht oder überschritten wird.

2.3 Eulerzahl Eu

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2} \quad (2)$$

mit

Δp	=	Druckdifferenz in Pa (proportional zum ζ-Wert)
ρ	=	Dichte des Strömungsmediums in kg/m ³
v	=	Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Die Eulerzahl verknüpft die Druckkraft mit der Trägheitskraft. Ihre Einhaltung erfordert gleiche ζ-Werte für Modell und Prototyp sowie die geometrische Ähnlichkeit.

Im Modell werden die Widerstandsbeiwerte der Wärmetauscher und/oder der Katalysatoren oft durch Drahtgitter simuliert.

2.3 Barth-Zahl

$$Ba = c_D \frac{\rho_{gas}}{\rho_m} \frac{l}{d_m} \quad (3)$$

beschreibt das Verhältnis des aerodynamischen Widerstandes der Staubpartikel zur Trägheitskraft dieser Staubpartikel im Gasstrom. Diese Ähnlichkeitszahl ist für die Simulation der Staubströmung maßgebend insbesondere in Strömungen mit starken Richtungsänderungen. Wird die Barth-Zahl erfüllt, sind die Strömungstrajektorien im Modell und Original gleich.

Aus Gleichung (3) folgt die Gleichung (4):

$$\frac{\rho_{m,M}}{\rho_{m,P}} = \frac{c_{D,M}}{c_{D,P}} \cdot \frac{\rho_{gas,M}}{\rho_{gas,P}} \cdot \frac{l_M}{l_P} \cdot \frac{d_{m,P}}{d_{m,M}} \quad (4)$$

mit

c_D	=	aerodynamischer Widerstandsbeiwert des Staubpartikels
ρ_{gas}	=	Gasdichte
ρ_m	=	Dichte des Staubpartikels (Material)
l	=	charakteristische Länge des Kanals
d_m	=	Durchmesser des Staubpartikels
Index $_m$	=	Material
Index $_M$	=	Modell
Index $_P$	=	Prototyp

Aus der Gleichung (4) sieht man, dass das Massenverhältnis der Staubteilchen im Wesentlichen durch den Modellmaßstab l_M/l_P geprägt wird. Das bedeutet, dass sehr leichte Staubteilchen im Modellversuch verwendet werden müssen, wenn man große Modelle vermeiden möchte. Das war in früheren Zeiten nicht möglich, daher werden in der Literatur für Staubversuche oft Modellmaßstäbe um die 1:6 gefordert. Heute stehen Staubpartikel mit sehr kleiner Dichte zur Verfügung. In jedem Fall ist es falsch, Originalstaub zu verwenden.

2.4 Das spezifische Impulsverhältnis

Für die Nachbildung zweier oder mehrerer Strömungen, die zusammengeführt werden, ist das spezifische Impulsverhältnis von Bedeutung, z.B. für das Eindringen eines Seitenstrahls in eine Hauptströmung. Das spezifische Impulsverhältnis κ ist:

$$\kappa = \frac{\rho_1 \cdot v_1^2 \cdot A_1}{\rho_2 \cdot v_2^2 \cdot A_2} \quad (5)$$

mit

$\rho_{1,2}$ = Gasdichte der Medien 1 und 2

$v_{1,2}$ = Strömungsgeschwindigkeit der Medien 1 und 2

$A_{1,2}$ = Strömungsquerschnitt der Medien 1 und 2

2.5 Die densiometrische Froudezahl

Sind thermische Auftriebskräfte von Bedeutung, ist die densiometrische Froudezahl einzuhalten. Sie ist wie folgt definiert:

$$\text{dens Froude} = g \cdot \frac{\Delta T \cdot l}{T \cdot v^2} \quad (6)$$

Daraus ergibt sich für die Temperaturdifferenz im Modell (bei gleicher Erdbeschleunigung g):

$$\Delta T_M = \Delta T_P \frac{l_P \cdot T_M \cdot v_M^2}{l_M \cdot T_P \cdot v_P^2} \quad (7)$$

mit

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen dem Medium 1 und dem Medium 2

l = charakteristische Länge des Objektes (kann beliebig gewählt werden, sollte aber der Strömung zugehörig sein, z.B. ein Durchmesser)

T = absolute Temperatur

v = Strömungsgeschwindigkeit

g = Erdbeschleunigung

Die Einhaltung der densiometrischen Froudezahl erfordert im Modellversuch, dass bei größeren Modellmaßstäben sehr hohe Temperaturdifferenzen realisiert werden müssen. Das ist sehr schwierig oder gar unmöglich. Daher wird die Temperaturdifferenz (die sich in der Dichtedifferenz manifestiert), durch Hinzufügen von Helium realisiert. Dieses Vorgehen hat sich bei zahlreichen Anwendungen bewährt (bei Naturzugkühltürmen, bei Ausbreitungsvorgängen von Rauchgasen, bei Rezirkulationsströmungen, bei thermischer Belüftung).

3. Beispiele

3.1 SCR – Anlagen

Bei Brennvorgängen mit hoher Temperatur entsteht das giftige NO_x . Die Vorgaben zur Reinhaltung der Luft erfordern, dass das NO_x weitgehend entfernt werden muss. Das erfolgt in nachgeschalteten De NO_x -Anlagen, wobei das SCR-Verfahren (Selektive katalytische Reduktion) favorisiert ist. In diesen Anlagen wird NH_3 in Form von gasförmigem Ammoniak (NH_3), flüssigem Ammoniak (NH_4OH), Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) oder wässriger Harnstoff, bekannt bei Dieselmotoren als AdBlue dem Abgas hinzugefügt. Um eine gute chemische Reaktion im Katalysator zu erreichen, muss das Ammoniak möglichst gut mit dem Rauchgas vermischt werden. Dazu werden verschiedene Mischsysteme eingesetzt. Besonders bewährt hat sich der sog. „Delta-Wing-Mischer“[®], der von Prof. Ruscheweyh entwickelt und mit der Firma Balcke-Dürr GmbH, Ratingen, erfolgreich national und international vermarktet wird. Der Mischvorgang basiert auf sog. Vorderkantenwirbeln, die an flachen Scheiben generiert werden. Die Mischerscheiben werden in Modellversuchen dem jeweiligen Anwendungsfall optimiert. Es wurden damit Abscheidegrade bis zu 97% ohne Ammoniak-Slip im sog. Reingas erzielt. Dieser Wert wurde an einem 800 MW-Kohlekraftwerk in den USA gemessen.

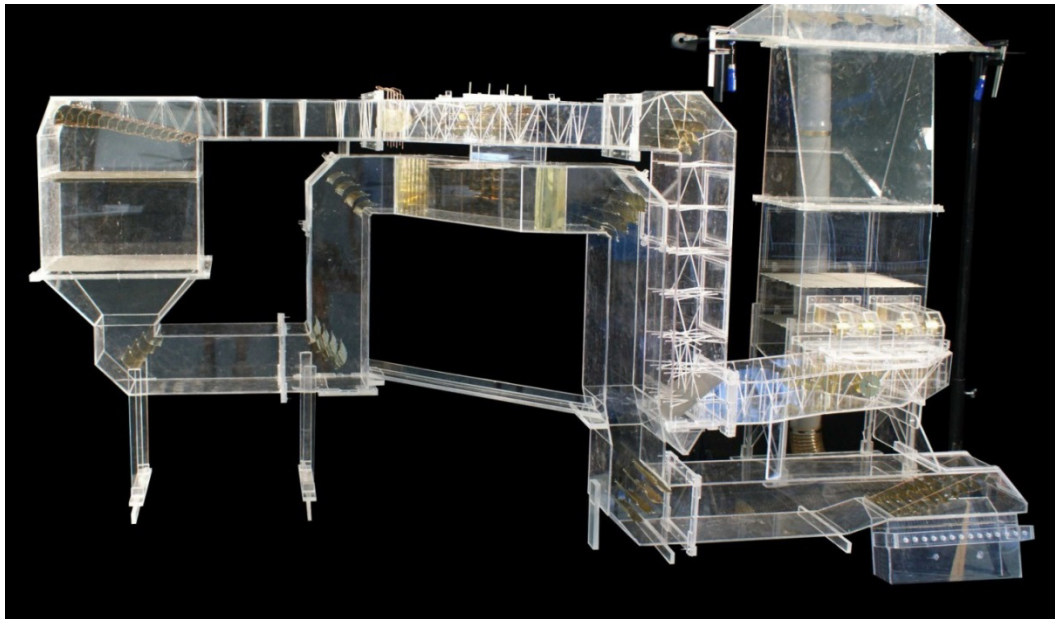


Bild 1: SCR-Anlage für ein 800 MW-Kohlekraftwerk in den USA

Das Bild 1 zeigt ein Modell einer SCR-Anlage. Der Modellmaßstab beträgt 1:40. Rechter Hand ist der Kesselausgang. Dort ist der erste Mischer (Quermischer) eingebaut. Er dient der Vergleichmäßigung der NO_x -Verteilung. Dies ist erforderlich, weil der Kessel je nach Betriebspunkt unterschiedliche NO_x -Verteilungen am Kesselausgang aufweisen kann, die bis zu Abweichungen von bis zu 20% betragen können. Der nachgeschaltete Ammoniakmischer im horizontalen Kanal benötigt aber eine konstante NO_x -Verteilung für alle Betriebszustände.

Nur dann ist nämlich gewährleistet, dass die Vermischung stets gleich ist, und somit ist der Abscheidegrad für alle Betriebszustände gleich gut.

Die Reynoldszahl ist im Modell zwangsweise wesentlich kleiner als in der Originalanlage, muss aber lediglich einen Mindestwert überschreiten, damit turbulente Strömung vorliegt. Da die Strömung durch die Wirbelbildung an den scharfkantigen Mischerscheiben geprägt ist und diese unabhängig von der Reynoldszahl erfolgt, können die Mischungswerte direkt auf das Original übertragen werden.

Für die Anlage wurden auch Staubversuche durchgeführt. Als Modellmaßstab wurde 1:15 verwendet, damit die Barth-Zahl erfüllt werden konnte. Ziel war, die Staubverteilung am Katalysator zu vergleichmäßigen und um zu prüfen, ob sich im Kanalsystem Staubablagerungen bilden. Der Versuch wird näherungsweise mit Originalgeschwindigkeit gefahren. Kritisch ist immer der Schwachlastfall. Es muss darauf geachtet werden, dass in horizontalen Kanalteilen die Strömungsgeschwindigkeit größer als 6 m/s ist. Ist sie kleiner, beginnt sich Staub auf dem Kanalboden abzusetzen.

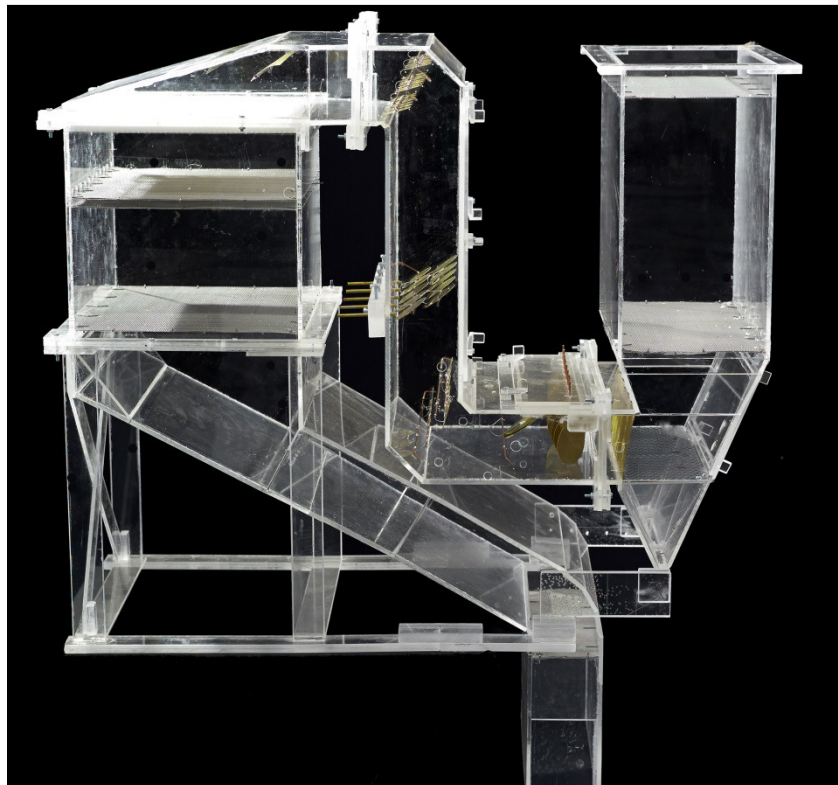


Bild 2: SCR-Anlage in Finnland

Das Bild 2 zeigt eine weitere SCR-Anlage. Hier ist die Kanalführung einfacher, dafür ist die Mischlänge zwischen der Ammoniakkeindüsung und dem Katalysator kürzer. Der Quermischer zur Vergleichmäßigung der NO_x-Verteilung ist unmittelbar am Kesselausgang platziert. Im 90°-Krümmer zum vertikalen Mischerkanal sind Mischerscheiben eingebaut, die sowohl die Strömungsumlenkung als auch die Aufrechterhaltung der Mischströmung bewirken. Im vertikalen Kanal befindet sich der Ammoniakmischer. Vor der Reaktorhaube befindet sich ein weiteres Umlenk-Mischsystem. Es dient dazu, die Strömung zur Reaktorhaube zu führen und gleichzeitig den Staub gleichmäßig zu verteilen.

3.2 Rauchgaswäscher

In Rauchgaswäschern wird hauptsächlich Schwefel entfernt. Dazu wird eine Kalkemulsion eingedüst. Als Abscheideprodukt entsteht Gips. Dieser Gips kann sich in Teilen des Kanalsystems absetzen, wenn die Einströmung in den Wäscher nicht richtig geführt wird. Entstehen Rückströmungszonen und es können sich große Mengen an Gips anlagern. Es ist schon vorgekommen, dass sich fast der gesamte Einströmquerschnitt zum Wäscher zugesezt hat. Das Bild 3 zeigt einen häufig anzutreffenden Fall der Wäscherzuströmung. Die von unten kommende Rauchgasströmung reißt an der Innenkante des 90°-Krümmers ab und erzeugt ein großes Nachlaufgebiet mit Rückströmung. Diese Rückströmung fördert Gipsteilchen in den Zuströmkanal, die sich dort ablagern. Es ist vorgekommen, dass sich mehrere Tonnen von Gips abgelagert haben.

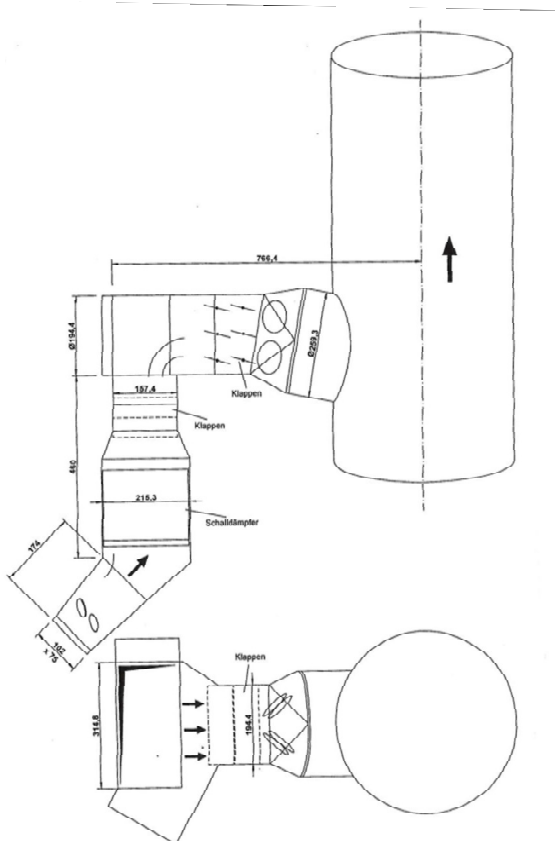


Bild 3: Skizze eines typischen Einlaufs in einen Rauchgaswäscher

3.3 Elektrofilter

Die Einströmung in einen Elektrofilter erfolgt in der Regel über eine Diffusorhaube. Diese Haube hat meistens einen sehr steilen Diffusorwinkel, an denen die Strömung abreißt. Man hilft sich durch den Einbau von Gitterwänden und hofft damit, eine einigermaßen gleichmäßige Durchströmung der Filterkammern zu erreichen und gleichzeitig den Staub gleichmäßig zu verteilen. Das gelingt nur mäßig. Entweder ist die Strömung an den Rändern hoch und in der Mitte sehr klein (es kann sogar Rückströmung auftreten) oder die Strömung schießt in der Mitte durch und hat an den Rändern sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten mit teilweiser Rückströmung. Dieses Strömungsverhalten wurde durch Modellversuche erkenntlich gemacht. Das Bild 4 zeigt ein solches Strömungsmodell eines Elektrofilters. Man erkennt rechts und links die Ein- und Abströmhauben.

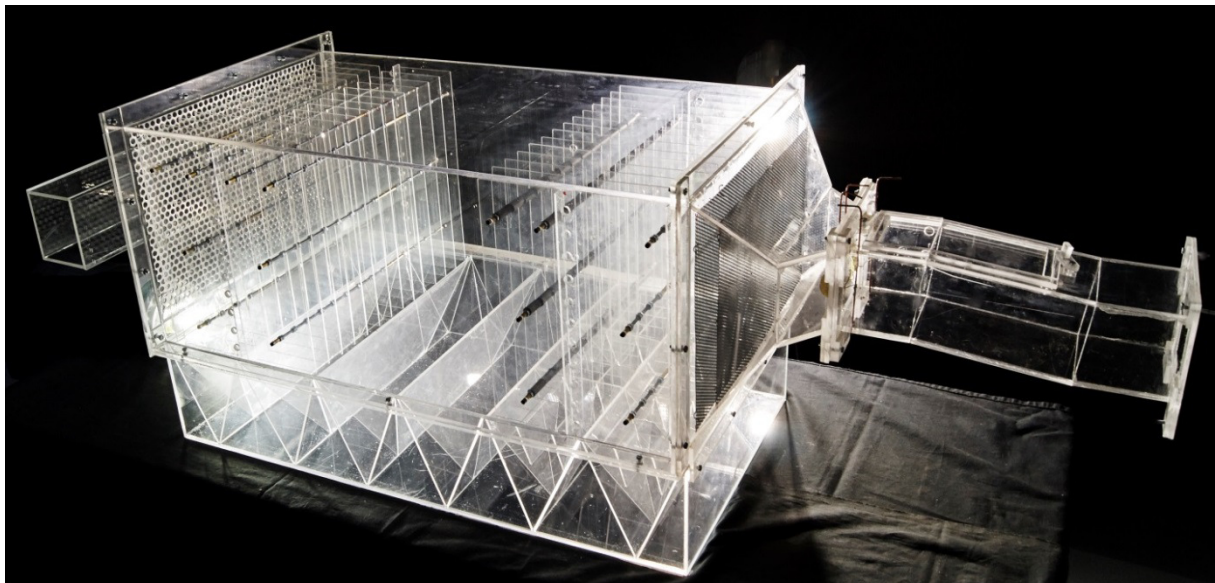


Bild 4: Strömungsmodell eines Elektrofilters

Um die Strömung und Staubverteilung zu verbessern, wurden Mischerscheiben eingesetzt. Die an den Scheiben erzeugten Wirbelsysteme verbessern den Strömungsfluss. Die Strömungsablösungen im Diffusor werden unterdrückt und der Durchfluss durch die Lochgitter wird stabilisiert. Die optimale Anordnung der Scheiben wird im Modellversuch ermittelt. Das Bild 5 zeigt ein Beispiel einer Anordnung von Mischerscheiben im Einströmdiffusor.

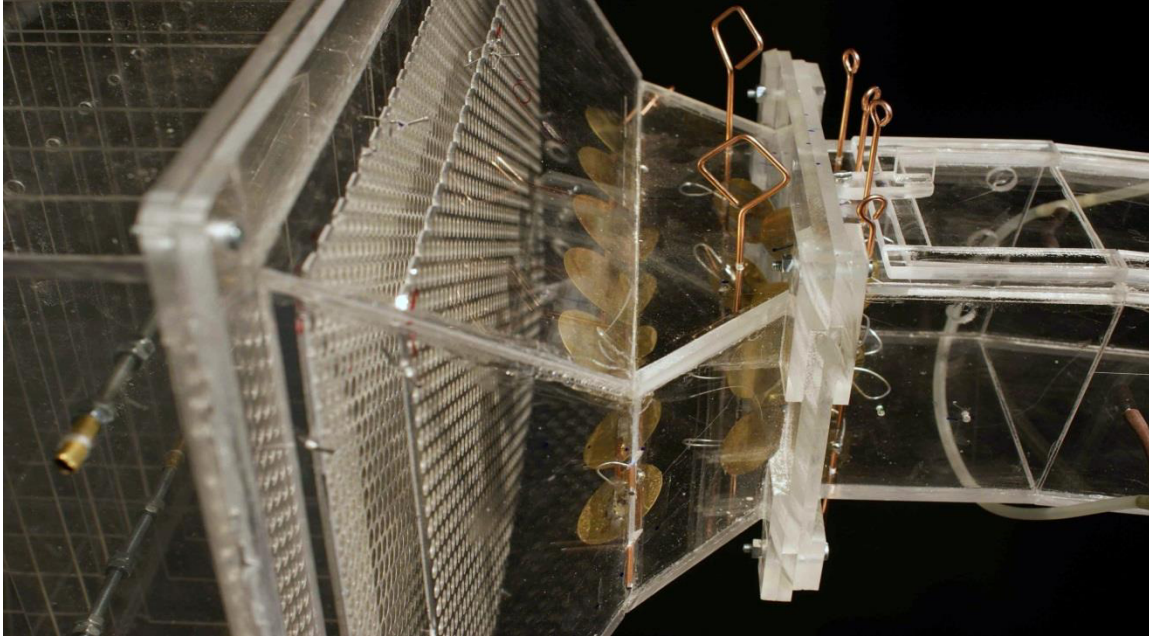


Bild 5: Mischerscheiben in der Einströmhaube eines Elektrofilters

3.4 Gasturbine

Ein weiteres Beispiel erfolgreicher Modellversuche zeigt das Bild 6. Es handelt sich um die Abströmung aus einer Gasturbine, Vermischung mit kalter Luft und Zuströmung zu einer SCR- Anlage. Sowohl das Einmischen der Kühlluft als auch die Strömungsführung in dem steilen einseitigen Diffusor gelingt mit einer Kombination aus Umlenkflächen und Mischerscheiben.

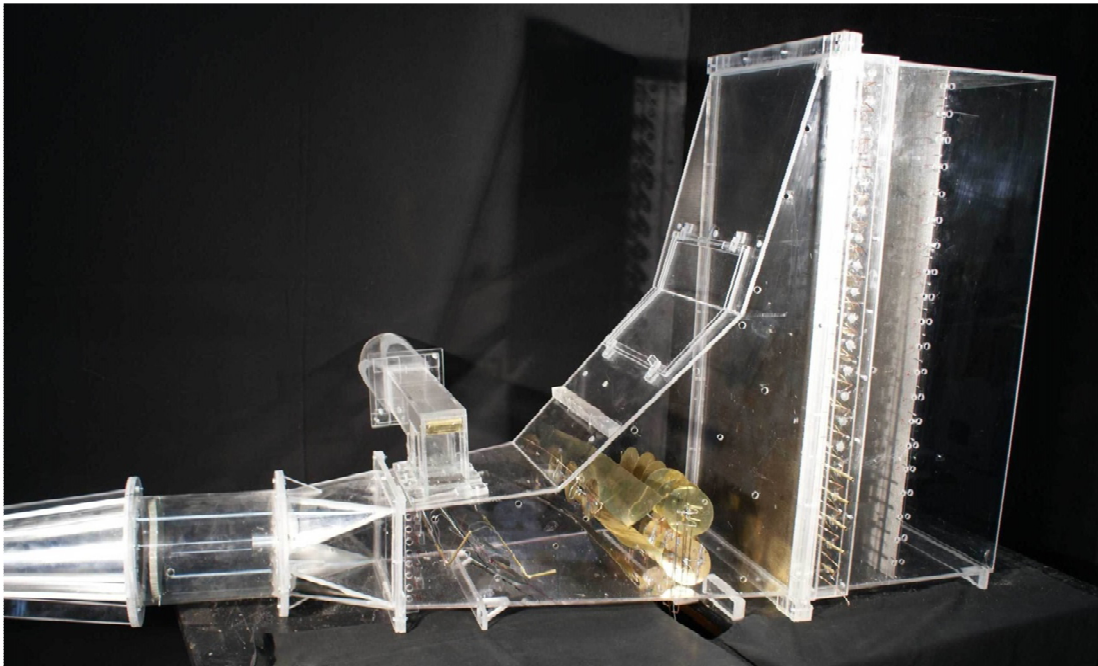


Bild 6: Modell des Misch- und Übergangskanals von einer Gasturbine zur SCR - Anlage

4. Schlussfolgerung

Eine Strömungsoptimierung in einer Industrieanlage führt zu deutlichen Verbesserungen in vieler Hinsicht. Als erstes sollte die Kanalführung so gestaltet werden, dass die Strömung möglichst störungsfrei fließen kann. Das ist aus Platzgründen oft nicht möglich. Daher sind im Kanal und in den angeschlossenen Aggregaten Strömungshilfen anzubringen. Das können Umlenflächen, Gleichrichter, Mischerscheiben o.ä. sein. Die optimale Gestaltung und Anordnung solcher Strömungshilfen können sehr effektiv in Modellversuchen ermittelt werden. Dazu ist auf die Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen zu achten. Die Vorteile einer optimalen Strömungsführung manifestieren sich in einem ruhigen Betrieb, geringere Vibrationen und Geräuschentwicklung, verringertem Druckverlust, gute Vermischung von Gaskomponenten und Temperaturen und letztendlich in einem verbesserten Prozess der Anlage.