

## Alternative zum Zyklon

*Wirbelrohr-Staubabscheider mit integriertem Staubsammelbehälter arbeitet wirtschaftlich mit niedrigem Druckverlust*

Aufgrund der relativ einfachen Bauweise und der vergleichsweise geringen Beschaffungs- und Betriebskosten ist der Wirbelrohr-Staubabscheider (WRS) ein hervorragender Abscheider oder Vorabscheider. Der WRS kann bei jeder technisch relevanten Temperatur in jeder Atmosphäre mit wenigen Millibar Über- oder Unterdruck betrieben werden. Bei ausreichender Dichte und Korngröße der Partikel lässt sich der Drosselstrom durch einen im WRS integrierten oder angeflanschten Staubbänger bis auf Werte, die der Gesetzgeber zulässt, bei geringen Wartungs- und Reparaturkosten reinigen. Bei extrem hoher Eingangskonzentration kann durch geschickte Anordnung eines oder mehrerer WRS zu einer Kaskade im ersten Schritt die Eingangskonzentration so stark reduziert werden, dass im zweiten Schritt die zulässigen Grenzwerte erreicht werden.

Die weltweit wachsende Industrialisierung und der zunehmende Verkehr führen zu einer immer stärker werdenden Umweltbelastung durch Staub. Dieser Staub ist lungengängig und krebserregend. Die Industrienationen können durch geeignete Maßnahmen den Ausstoß von Stäuben, Ruß, Aerosolen, Dämpfen und schädlicher Gasen trotz hoher Kosten relativ gering halten.

Anders bei Ländern der dritten Welt und Schwellenländern. Der Zwang zur Industrialisierung und das mangelnde Umweltbewusstsein führen zu einer starken Belastung der Menschen und der Umwelt durch ungereinigte Abgase von Industrie und Verkehr, die aus Kostengründen nicht gemindert werden kann. Die Entwicklung von Geräten, die eine Separation von etwa 99% der schädlichen Partikel in Abgasen erreichen, lässt sich mit relativ geringem technischen und finanziellen Aufwand durchführen.

Untersuchungen zeigen, dass ein Fliehkraft-Staubabscheider nach dem Wirbelrohrprinzip (WRS) mit hoher Effizienz zu vertretbaren Kosten hergestellt werden kann. Diese Geräte können in Kooperation mit Firmen in Deutschland in den betroffenen Ländern selbst gebaut, gewartet und repariert werden. Dadurch würden vor Ort Arbeitsplätze geschaffen werden, was

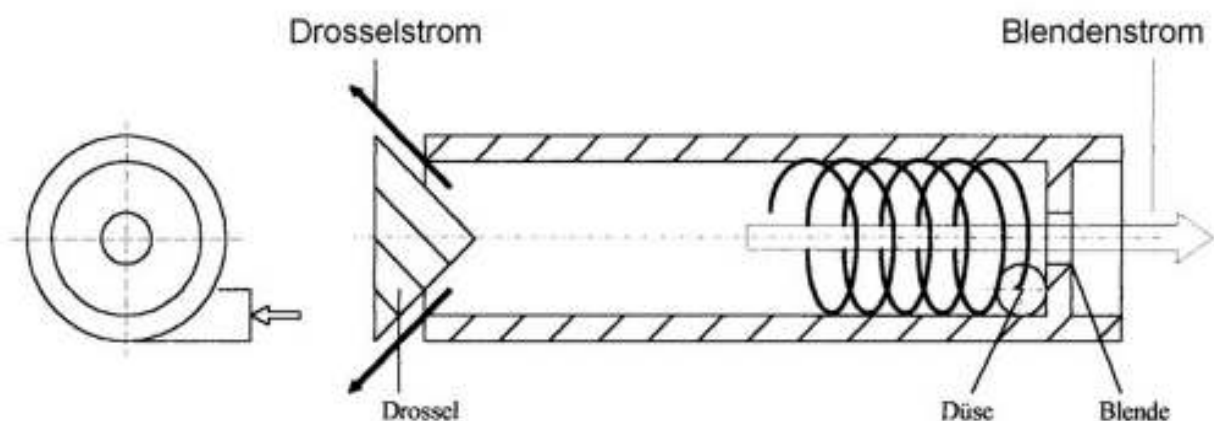
---

<sup>1</sup> *Walter Sibbertsen war Physikprofessor an der Fachhochschule Hamburg. Weitere Informationen: Walter Sibbertsen, Am Isfeld 19, 22589 Hamburg*

die Akzeptanz für Umweltschutzmaßnahmen vergrößert und den Abfluss von Kapital ins Ausland vermindert. Eine Referenzanlage mit Durchsatz von 65 000 m<sup>3</sup>/h existiert und arbeitet seit Jahren in der Holzverarbeitenden Industrie.

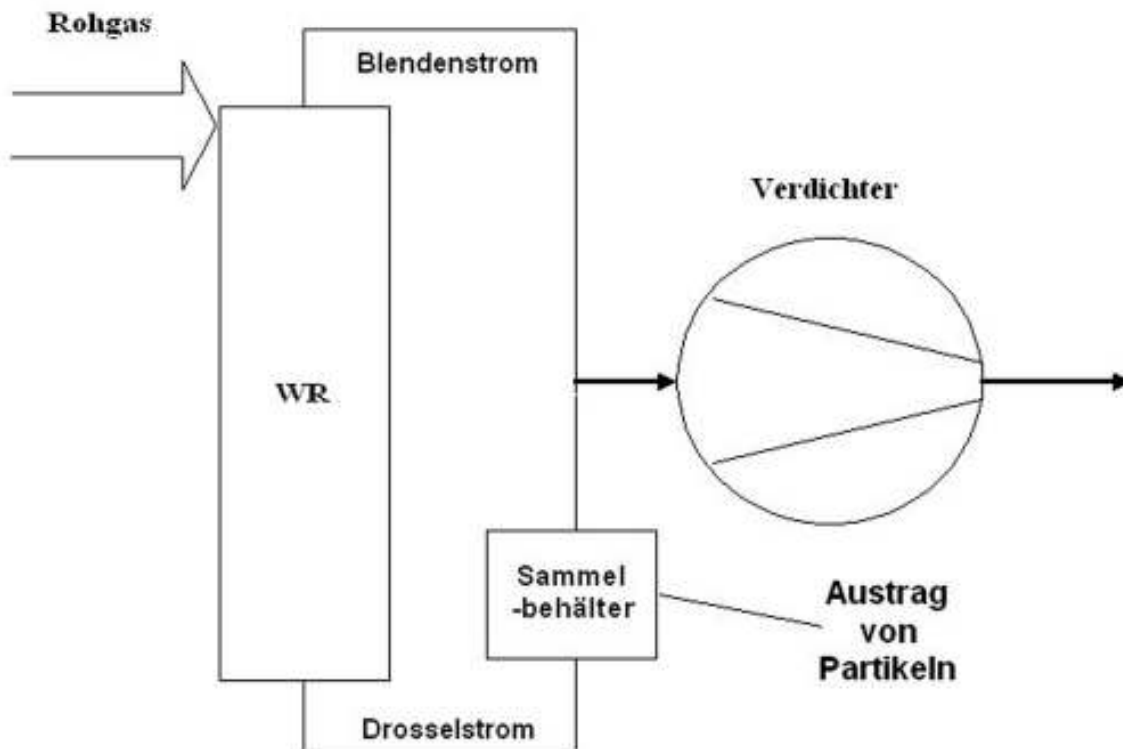
### ***Wirbelrohre erzeugen zwei Luftströme***

Ein Wirbelrohr besteht im Wesentlichen aus einem Rohr, in das vom Rohrmantel her durch eine oder mehrere Düsen ein Gas tangential eingeblasen (Überdruckrohr, Bild 1) oder über Blende oder Drossel abgesaugt (Unterdruckrohr, Bild 2) wird. Hierbei entsteht um die Rohrachse ein Wirbel, der im Kern kälter und außen wärmer ist als das eingeblasene Gas. Dieses Phänomen wird zu Ehren seines Entdeckers Ranque-Effekt genannt [1].



**Bild 1: Prinzipskizze eines Wirbelrohres**

Untersuchungen der Druckdifferenzen zwischen Rohrrinnerem und Umgebung und der Strömungsverhältnisse im Wirbelrohr zeigen, dass bei Überdruckrohren in der Rohrachse Umgebungsdruck herrscht, während unmittelbar neben der Eintrittsdüse an der Rohrwand gemessen eine Radialbeschleunigung von mehr als 105 g vorliegen kann, die in Richtung der Drossel sehr schnell kleiner wird. Bei Saugwirbelrohren liegen ähnliche Strömungsverhältnisse vor.



*Bild 2: Prinzipieller Aufbau eines Saugwirbelrohres*

In vielen technischen Anlagen, wie Müllverbrennungsanlagen oder Kohle- und Ölkraftwerken, wird die Verbrennungsluft durch die Anlage gesaugt und nicht gedrückt. In solchen Fällen bietet sich die Unterdruckversion (Bild 2) des Wirbelrohres als Fliehkraftabscheider an. Das zu reinigende Gas wird mittels eines Lüfters durch die Düse ins Wirbelrohr eingesaugt und über Blende und Drossel abtransportiert. Schon bei einem Druckverlust von 2 mbar und auch weniger werden hohe Abscheideraten erreicht.

### ***Grundidee des Wirbelrohrs***

Die Grundidee des Wirbelrohrs zeigt Bild 3. Der ins Wirbelrohr (WR) eintretende Schmutzgasstrom (a) wird im Wirbelrohr in zwei Teilströme, den Blendenstrom (b) und den Drosselstrom (c), zerlegt. Das Massenstromverhältnis im Ein- und Ausströmbereich kann mit Hilfe der Drossel in einem weiten Bereich eingestellt werden.

Aufgrund der hohen Radialbeschleunigung im Eintritt des Gasstromes ins Wirbelrohr werden die Teilchen an die Rohrwand, das heißt in den Drosselstrom (c) gezwungen und mit ihm aus dem Wirbelrohr getragen. In den meisten Fällen ist der Blendenstrom (b), der unter Laborbedingungen auf 98 bis 99% des Gesamtstromes (a) eingestellt werden kann, innerhalb der ge-

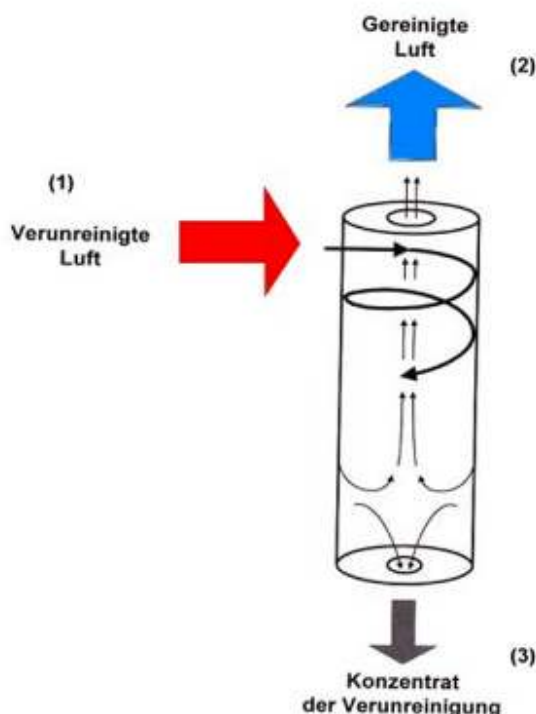
setzunglichen Auflagen staubfrei und kann in die Umgebung abgegeben werden. Nur der kleine Drosselstrom (c) mit hoher Staubkonzentration muss mit anderen Staubfiltern, zum Beispiel elektrischen Filtern oder Gewebefiltern, gereinigt werden.

Weil die Kosten dieser Staubabscheider im Wesentlichen vom Durchsatz abhängen, erschließt der WRS ein beachtliches Sparpotential und gute Marktchancen, besonders in der dritten Welt. In Ländern ohne eine langjährige Umweltschutztradition sinken die Akzeptanzprobleme für Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft.

### *Funktionsweise des Wirbelrohr-Staubabscheiders*

Direkt neben der Blende am Eintritt des Gases ins Wirbelrohr sind drei Phänomene zu beobachten:

- Fliehkraft  $F_F = m v^2 r^{-1}$ , mit  $v = f(D_p)$ , der Druckunterschied  $D_p$  bezeichnet die Differenz zwischen Umgebungsdruck und Druck im Rohrrinneren;
- Reibungskraft  $F_R$  ist durch die Oberflächenbeschaffenheit und die Dichte der Partikel gegeben, sie ist unabhängig von  $D_p$ ;
- Turbulenzen, sie sind abhängig von der Gasgeschwindigkeit, das heißt von  $D_p$  und von der Rohrbeschaffenheit.



*Bild 3: Strömungsablauf in einem Wirbelrohr (Quelle: Ingenieurbüro Meede)*

Die Fliehkraft und die Turbulenzen hängen von der Gaseintrittsgeschwindigkeit und damit von der Druckdifferenz zwischen Umgebung und dem Rohrrinneren ab. Untersuchungen zeigen, dass die Partikel schon bei extrem kleinen Druckdifferenzen von einigen Millibar unmittelbar nach Eintritt in das Rohr in den Drosselstrom gelangen. Teilchen, die auf dem kürzesten Weg in den Blendenstrom (Reingasstrom) gelangten, wurden nicht beobachtet. Bei sorgfältigem Bau des Rohres und den Zuleitungen (Vermeidung von Ecken, scharfen Abrisskanten) lassen sich bei geringen Druckdifferenzen bei ausrei-

chender Fliehkraft die Turbulenzen gering halten. Es zeigt sich also, dass der Wirbelrohr-Fliehkraftabscheider schon bei geringen Druckdifferenzen, das heißt bei geringen laufenden Kosten, ein effizient arbeitendes Gerät ist.

### *Leistungsspektrum reicht vom Labor bis zur Großanlage*



*Bild 4: Wirbelrohr-Staubabscheider für einen Durchsatz von 5000 m<sup>3</sup>/h*

Im Labor und im Bypass in einem spanplattenherstellenden Industrieunternehmen wurden Wirbelrohr-Fliehkraftabscheider bis zu einem Durchsatz von 5000 m<sup>3</sup>/h (Bild 4) getestet. In Zusammenarbeit mit einem großen industriellen Partner wurde ein Abscheider mit einem Durchsatz von 65 000 m<sup>3</sup>/h entwickelt und in einem Werk der Holzindustrie eingesetzt. Dort arbeitet das Gerät seit Oktober 1998 einwandfrei mit erheblich besserem Abscheidegrad als die bis dahin eingesetzten Zyklone.

- Die Leistungsdaten der bisher eingesetzten Wirbelrohre sind beachtlich:
- Die Volumenströme von 5 bis 65 000 m<sup>3</sup>/h sind schon erprobt, Werte von 100 000 bis 200 000 m<sup>3</sup>/h sind sicher möglich.
- Die gemessenen Druckverluste liegen bei Werten von 2 bis 8 mbar.
- Je nach Staubart werden Abscheidegrade von 95 bis 99,8% erzielt.
- Die Baugrößen der Wirbelrohrabscheider reichen von 20 bis 2500 mm im Durchmesser und Höhen zwischen 80 und 11 000 mm.
- Die Arbeitstemperaturen können im Bereich von 0 bis 700°C variieren. Der Einfluss höherer Temperaturen wird in absehbarer Zeit untersucht.

Eine Verdoppelung oder Verdreifachung des Volumenstromes ist schon jetzt möglich. Für eine darüber hinausgehende Vergrößerung sind einige

Versuche zur Abklärung der optimalen Baugrößen nötig. Die außen um die Wirbelrohre angebrachte Wärmeisolierung soll verhindern, dass es bei feuchter Abluft zu einer Taupunktunterschreitung kommt. In einem solchen Fall könnte Korrosion das Wirbelrohr beschädigen.

### ***Grenzen des Wirbelrohrs als Fliehkraftabscheiders***

Bei der geringen Druckdifferenz für den Betrieb des Wirbelrohr-Fliehkraftabscheiders ist die umgesetzte Leistung für eine Gastrennung nach dem Molekulargewicht viel zu gering, das heißt Geruchsstoffe lassen sich nicht ohne weiteres abtrennen.

Zurzeit laufen Versuche an einem speziell entwickelten Sprühabsorber, der einen sehr feinen Wassernebel erzeugt, an dem die gasförmigen Geruchsstoffe gebunden und in einem nachgeschalteten Wirbelrohr abgeschieden werden.

### ***Märkte für das Wirbelrohr als Staubabscheider***

Mit den bekannten Vorzügen und den Anwendungen des Wirbelrohres als Fliehkraftabscheider mit hoher Abscheiderate zu vergleichsweise niedrigen Kosten ergeben sich Märkte in den Industriestaaten, aber auch in den Ländern der dritten Welt, die dem Menschen und der Umwelt dienen:

- Entstaubung im gesamten Leistungsbereich von sehr kleinen bis sehr großen Abgasströmen, zum Beispiel Holzindustrie, Bäckereien, Mühlen, Kaffeeverarbeitung, Zementindustrie, Feuerverzinkereien oder Stahlindustrie.
- Entrußung gegebenenfalls Oxidierung der Abgase aus Dieselmotoren, Kesseln und Verbrennungsanlagen zum Beispiel Blockheizkraftwerk, LKW- und Baufahrzeug-Dieselmotoren oder (Dampf-)Kessel.
- Entstaubung von Abgasen aus Verbrennungsanlagen, zum Beispiel Müllverbrennung, Biomassefeuerung, Krematorien oder Öl- und Kohlekraftwerke.
- Entstaubung von Tunnelabluft, zum Beispiel vierte Röhre des Elbtunnels.

Die Umsetzung des Wirbelrohrprinzips auf praktische Anwendungen ermöglicht es, hocheffiziente, einfache und werkstoffarme Einrichtungen zu schaffen, die das Repertoire der konventionellen Techniken ergänzen oder weniger effiziente Verfahren ersetzen können.

## *Anwendungsarten des Wirbelrohrs*

Es gibt vier Anwendungsarten des Wirbelrohrs:

> Die abzuscheidenden Partikel sind oxidierbar (brennbar). Der Drosselstrom, dessen Größe sich ganz nach den Bedürfnissen des Anwenders richtet, wird der Ansaugluft eines Brenners beigemischt. Die Partikel verbrennen und werden zusammen mit den Brennerabgasen in die Atmosphäre abgegeben.

> Die abzuscheidenden Partikel liegen in Dieselmotorabgasen vor. Abgasrückführung: Ideale Bedingungen zur Rußverbrennung herrschen in den Brennräumen eines Motors. In den bisher eingesetzten Systemen wird ein Teil des Abgasstromes mit der Ansaugluft zur Abgasnachverbrennung in den Motor zurückgeführt, während der restliche Teil unbehandelt in die Umgebung abgegeben wird. Bei den im Motor herrschenden Temperaturen wird Ruß schnell verbrannt und als unschädliches Kohlendioxid mit den Motorabgasen freigesetzt. Bei Anwendung der Wirbelrohrtechnik wird ein Wirbelrohr direkt an den Auslassstutzen des Motors angeflanscht. Durch den Massentrenneffekt werden die Rußpartikel aus dem Motorabgas mit einem Abscheidegrad von 95 bis 99% abgeschieden und im Drosselstrom angereichert. Dieser Teilstrom, dessen Größe innerhalb weiter Grenzen frei gewählt werden kann, wird zur Nachverbrennung der Ansaugluft des Motors beigemischt, während der praktisch rußfreie Blendenstrom ohne weitere Behandlung in die Umgebung abgegeben wird.

Rußfilter: Rußfilter sind hocheffiziente Partikelabscheider, die aber in Pkw oder Lkw während der Fahrt wegen des hohen Abgasdurchsatzes nicht regeneriert werden können. Deshalb müssen für einen kontinuierlichen Betrieb zwei Systeme mitgeführt werden, von denen wechselweise das eine beladen und das andere regeneriert wird. Bei der Entrußung von Dieselmotorabgasen mit Hilfe der Wirbelrohrtechnik werden der Temperatur- und der Massentrenneffekt gleichzeitig genutzt. Wird aus motorspezifischen Gründen die am Wirbelrohr zur Verfügung stehende Druckdifferenz, gegen die der Motor arbeiten muss, auf wenige Millibar begrenzt, ist der Temperaturtrenneffekt vernachlässigbar.



*Wirbelrohr-Staubabscheider eignen sich auch für große Volumenströme. Diese Anlage ist für einen Durchsatz von  $65\,000\text{ m}^3/\text{h}$  ausgelegt.*

Eine technisch elegante Lösung ist eine Kombination von Wirbelrohr und Filter. Zur besseren Wärmeisolierung und zur Verlängerung der Verweildauer der Rußpartikel in der heißen Zone des Wirbelrohres wird über das Warmgasrohr ein Mantelrohr gestülpt und mit dem Düsenkopf verschweißt. Der Zwischenraum zwischen Wirbelrohr und Mantelrohr wird mit einer elektrisch heizbaren, katalytisch beschichteten Siliziumkarbid-Keramik ausgefüllt. Diese Keramik übernimmt einerseits die Funktion eines thermischen Isolators, andererseits die Funktion eines herkömmlichen Rußfilters mit elektrischer Heizung. Durch den Katalysator wird die Zündtemperatur von Ruß gesenkt.

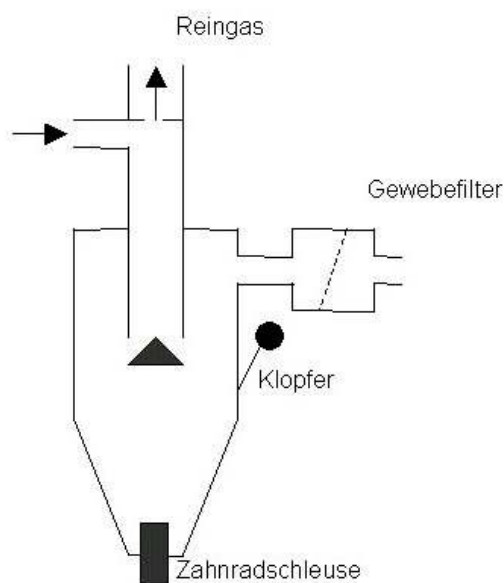
Hinter dem Rußfilter ist das Abgas rußfrei und vermischt sich nach Durchgang durch die Bohrung mit dem rußfreien Blendenstrom. Beide durchströmen dann einen Oxidationsfilter zur chemischen Nachbehandlung. Dieser Filter erfüllt die Aufgabe eines Katalysators ähnlich wie bei Ottomotoren und beseitigt NO, CO und HC. Eine Zerstörung durch Ruß ist nicht zu befürchten.

Das Kombinationsgerät vereint in idealer Weise die Eigenschaften beider Komponenten. Es wird etwa die Größe bisheriger Filter haben, kann in allen Betriebsarten des Motors den Ruß in Dieselmotorabgasen beseitigen und kann im Betrieb regeneriert werden. Für bestehende Anlagen (Fahrzeuge, Schiffe, Blockheizkraftwerke) kann es als Nachrüstatz konzipiert werden.

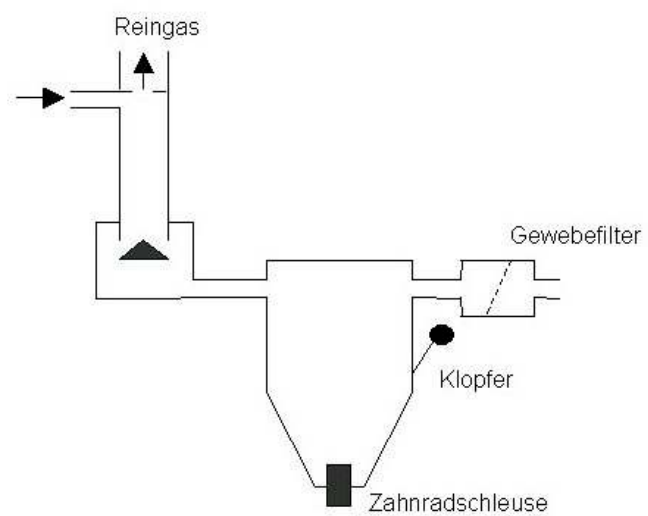
> Die abzuscheidenden Partikel sind ein Wertstoff.



> Die abzuscheidenden Partikel sind Abfall. In diesen Fällen muss der Drosselstrom von seiner Staubfracht befreit werden. Dieses geschieht gängigerweise mit Hilfe von Staubfiltern, wie Elektrofiltern, Gewebefiltern und ähnlichem oder mit einem ins Wirbelrohr integrierten oder nachgeschalteten Staubfänger (Bilder 5 und 6). Durch die Querschnittserweiterung im Staubfänger sinkt die Gasgeschwindigkeit und die Partikel sinken in die Zahnradschleuse und können aus dem System entfernt werden. Ein Gewebefilter am Ausgang des Staubfängers hält den Feinstaub zurück.



*Bild 5: Wirbelrohr mit integriertem Staubfänger*



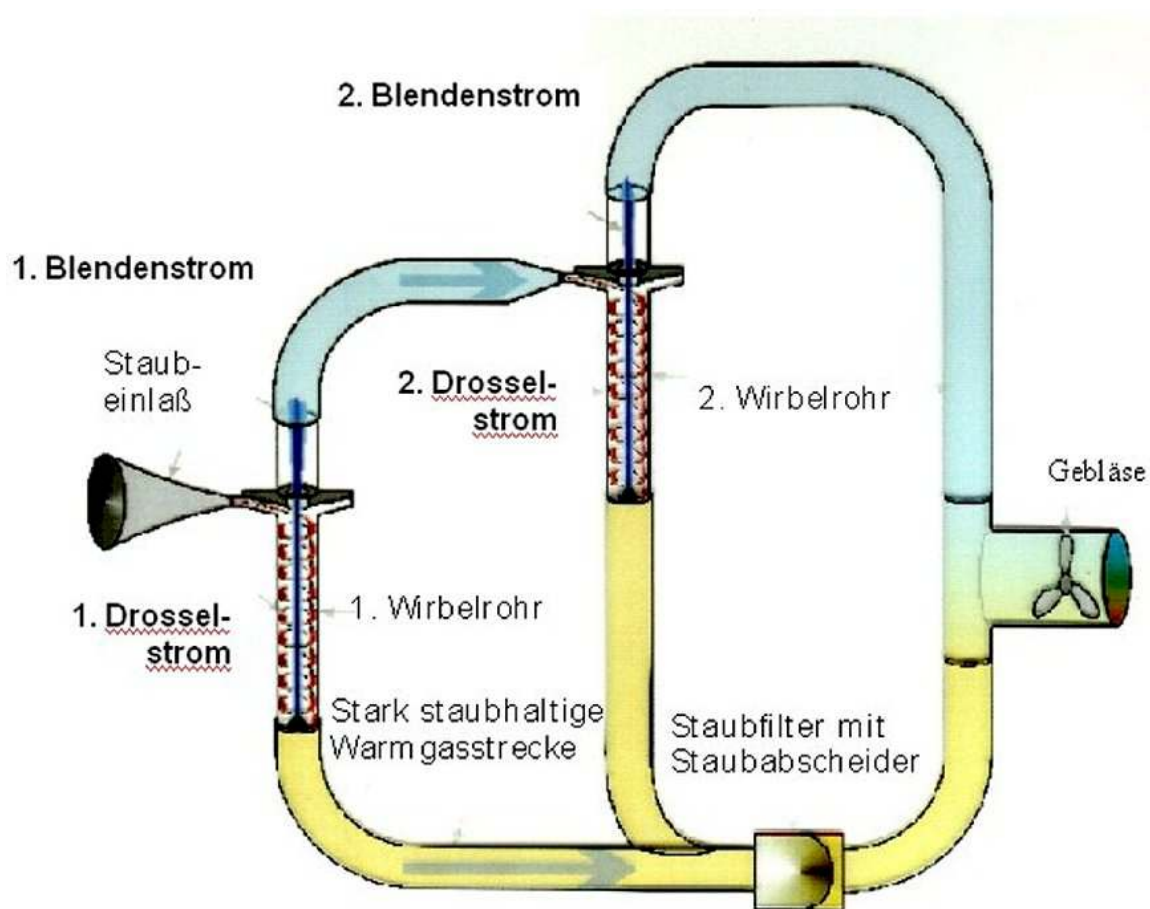
*Bild 6: Wirbelrohr mit nachgeschaltetem Staubfänger*

### ***Betriebssicherheit, Reparaturfreudigkeit, Wartung***

Der WRS arbeitet ohne bewegliche Teile, bei allen technisch relevanten Gastemperaturen, in liegender oder stehender Anordnung, was eine hohe Betriebssicherheit garantiert. Reparaturen am Rohrmantel lassen sich relativ einfach durchführen. So können Bleche auf schadhafte Stellen geschweißt werden, ohne dass die Funktion des WRS nennenswert beeinflusst wird. Größere Rohre sind durch ein Mannloch begehbar, was eine einfache Reparatur oder Wartung ermöglicht.

Für Wartungsarbeiten können Stillstandzeiten des Betriebes genutzt werden oder bei kleineren Einheiten kann man ein Rohr mehr als unbedingt nötig einsetzen. Bei Wartungsarbeiten oder Reparaturen kann dann ein Rohr abgeschaltet und repariert oder gewartet werden ohne die Produktion zu beeinflussen.

Der WRS arbeitet bei allen Staubarten und Staubkonzentrationen. In Laborversuchen wurde in ein liegend angeordnetes Wirbelrohr Staub in hoher Konzentration hineingefüllt, ohne dass es zu Rohrverstopfung kam, oder dass sich das Rohr "verschluckte". Konnte das Rohr den hohen Staubeintrag nicht sofort verarbeiten, sammelte sich dieser in strömungsarmen Gebieten und wurde in den Pausen zwischen den Beladungen abgebaut. In stehender Anordnung, mit der Blende nach oben, fällt dieser Staub nach unten, gelangt in den Drosselstrom und wird aus dem Rohr befördert. Sollte ein Rohr eine gegebene Staubfracht nicht ausreichend beseitigen können, kann durch eine Kaskadenschaltung der Abscheidegrad verbessert werden (Bild 7).



*Bild 7: Kaskadenschaltung von zwei Wirbelrohr-Staubabscheidern.*

### **Investitionskosten**

Die Investitionskosten für einen WRS sind etwa vergleichbar mit denen für einen Zyklon bei besserem Reinigungsgrad des WRS. Für die Nachreinigung des Drosselstroms sind weitere Kosten zu veranschlagen, weil diese aber proportional zum Durchsatz sind, lassen sich nach eigenen Untersu-

chungen die Gesamtkosten (für WRS als Vorabscheider und Elektrofilter zur Reinigung des Drosselstromes) auf 20 bis 30% der Kosten für ein Elektrofilter, das für die Reinigung des Gesamtstromes ausgelegt wurde, senken. Bei Verwendung des beschriebenen Staubsammelbehälters sinken die Herstellungskosten noch einmal erheblich. Die Gesamtkosten für einen WRS sind dann vergleichbar mit den Kosten für einen Zyklon und betragen Bruchteile des eines Elektrofilters.

### ***Betriebskosten***

Die Leistung, die für den Betrieb des WRS benötigt wird, hängt direkt von der Druckdifferenz und dem Durchsatz ab und beträgt  $Q = D_p \cdot V$ . Dabei ist  $Q$  die elektrische Leistung, die benötigt wird, um den Durchsatz  $V$  durch das Rohr zu transportieren,  $D_p$  ist die Druckdifferenz. Werden nun noch der Wirkungsgrad der Anlage, die Betriebsdauer und die Kosten der elektrischen Energie angegeben, lassen sich die laufenden Kosten für jeden Einzelfall berechnen. Diese Kosten hängen direkt von der Druckdifferenz ab. Es ist also wichtig, diese niedrig zu halten. Eine Druckdifferenz von einigen Millibar garantiert niedrige laufende Kosten.

### ***Fazit***

- Wirbelrohr-Staubabscheider sind einfach aufgebaut und damit kostengünstig herzustellen.
- Aufgrund des geringen Druckverlustes im Apparat sind die Betriebskosten vergleichsweise niedrig.
- Wirbelrohre sind für den Labormaßstab gleichermaßen geeignet wie für sehr große Durchsätze.

### ***Literatur:***

[1] Ranque, G.: Experiencessur la d'entente giratoire avec productions simu lan'ces dum echappement d'air chaud et d'um e'chappement d'air froid. Journal Physik Radium 4 (1933) 7, S. 112-114.

[2] MM Das IndustrieMagazin, Ausgabe 12/2002;  
[www.maschinenmarkt.de](http://www.maschinenmarkt.de)

Dieser Beitrag wurde freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Redaktion der Zeitschrift MM Maschinenmarkt. Der Abdruck erfolgt mit Genehmigung des Verfassers.

### ***Zusatzinformationen im Internet***

- Theoretische Untersuchung und numerische Berechnung der Strömung und Energietrennung im Wirbelrohr nach Ranque und Hilsch  
<http://www.nes.ruhr-uni-bochum.de/for/p13.html>
- Untersuchung eines Wirbelrohres mit wärmegasseitigem Zusatzstrom.  
[http://www.mb.uni-siegen.de/d/iff3/Diplom\\_Stud.htm](http://www.mb.uni-siegen.de/d/iff3/Diplom_Stud.htm)
- Gastrocknung mit dem Wirbelrohrverfahren  
<http://www.gasanlagen.de/mundranlagen/vortex.htm>
- Ermittlung von Kennlinien eines Wirbelrohres nach Ranque-Hilsch mit den Arbeitsstoffen Luft, Wasserdampf und Kältemittel (R 22)  
<http://www.uni-siegen.de/research/berichte/text95/fb1167.htm>