

# Über Luftfilterentwicklungen für Fahrzeug- und Schleppermotoren

Von Obering. K. RICHTER, Dresden

DK 629.1-42:621.436

Mitteilung aus dem Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Technische Hochschule Dresden.  
Direktor: o. Prof. Alfred Jante, o. Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Berlin

Die Mängel am Luftfilter des Raupenschleppers KS 07/62 haben die Initiative aller Forschungs- und Entwicklungsstellen auf diesem Gebiet ausgelöst, um einwandfrei arbeitende Luftfilter mit hohen Standzeiten zu schaffen. Der Verfasser berichtet über die Arbeiten des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrzeuge an der Technischen Hochschule Dresden. Die Praktiker werden es begrüßen, daß so ernsthaft an dieser Frage gearbeitet wird. Sie erwarten nun aber auch den baldigen Beginn der Serienproduktion arbeitstüchtiger Luftfilter. Die Redaktion

Je nach geographischer Lage, Bodenart, Straßenzustand, Jahreszeit, den Wind- und Wetterverhältnissen, Fahrzeugart – ob Rad- oder Kettenschlepper, langsame oder schnelle Fahrzeuge – Einzel- oder Kolonnenfahrt, ist die Höhe des Staubgehaltes der Luft und die Korngröße des aufgewirbelten Staubes stark unterschiedlich.

Bei den möglichen hohen Staubgehalten der angesaugten Verbrennungsluft, besonders in der Landwirtschaft, wird mit den allgemein verwendeten

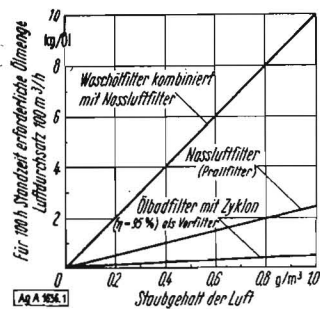


Bild 1. Vergleich der zur Staubbindung erforderlichen Ölmenge bei den Wäschel-, Naßluftfiltern und einer Filterkombination Zyklon-Ölbadfilter

Naßluft-Wirbelöl- oder Wäschefiltern wohl kurzfristig ein ausreichender Wirkungsgrad [1], [2] erreicht, aber die Staubkapazität und damit die Standzeit der Filter ist zu klein.

Um zu einem geringen Wartungsaufwand zu kommen, ist zu fordern, daß die Luftfilter bei Staubgehalten der Luft von 1 g/m<sup>3</sup> eine Standzeit von mindestens 100 h haben. Mit Erfüllung dieser Forderung werden auch bei höheren Staubgehalten Standzeiten erreicht, die unter diesen schwierigen Verhältnissen als tragbar zu bezeichnen sind. Grundsätzlich ist es möglich, allein mit den Ölbad- oder Naßluftfiltern die geforderten Standzeiten zu erreichen, wenn keine Rücksicht auf die

Wirtschaftlichkeit (Bild 1) (Ölverbrauch) und die Größe des Filters genommen werden muß. So ist z. B. bei einem Luftverbrauch des Motors von 100 m<sup>3</sup>/h und einer Staubbelastung der Luft mit 1 g/m<sup>3</sup> für 100stündigen wartungsfreien Betrieb eines Ölbadfilters ein Ölverrat von 10 kg erforderlich. Um mit einem Naßluftfilter die gleiche Menge Staub binden zu können, sind 2,5 kg Öl und 25 m<sup>2</sup> Prallfläche erforderlich. Diese Voraussetzungen sind aber bei Fahrzeugen niemals gegeben, so daß einmal durch möglichst hochliegende Luftentnahmestellen oder durch Vorabscheider eine Entlastung der als Feinfilter verwendeten Ölbadfilter erreicht werden muß.

Wirtschaftlichkeit (Bild 1) (Ölverbrauch) und die Größe des Filters genommen werden muß. So ist z. B. bei einem Luftverbrauch des Motors von 100 m<sup>3</sup>/h und einer Staubbelastung der Luft mit 1 g/m<sup>3</sup> für 100stündigen wartungsfreien Betrieb eines Ölbadfilters ein Ölverrat von 10 kg erforderlich. Um mit einem Naßluftfilter die gleiche Menge Staub binden zu können, sind 2,5 kg Öl und 25 m<sup>2</sup> Prallfläche erforderlich. Diese Voraussetzungen sind aber bei Fahrzeugen niemals gegeben, so daß einmal durch möglichst hochliegende Luftentnahmestellen oder durch Vorabscheider eine Entlastung der als Feinfilter verwendeten Ölbadfilter erreicht werden muß.

## 1 Zyklone als Luftreiniger für Fahrzeugmotoren

Geeignete Vorfilter hohen Wirkungsgrades sind die Zyklone. In ihren mechanischem Aufbau sind die Zyklone sehr einfach (Bild 2) und bestehen aus dem Lufterlauf *a*, der Schleuderkammer *b*, dem Reingasentnahmerohr *c* und den Staubauswurfschlitz, bzw. Staubaustrag *d*.

Aus dem über den Einlauf *a* tangential in die Schleuderkammer *b* eintretenden Staubluftgemisch soll bei dem Umlauf in der Schleuderkammer durch Fliehkraftwirkung der Staub ausgeschleudert und nach Erreichen der Wand beim Vorübergang an dem Staubauswurf durch die Schlitzkante *d* abgeschält werden und nach außen gelangen. Die Reingluft wird über das Reingasrohr *c* entnommen. Die Zyklone können als Saugzyklone oder als aufgeladene (Druck-)Zyklone ausgeführt werden. Für Fahrzeuge sind die Saugzyklone durch Wegfall des Bauaufwandes für die Aufladung vorteilhafter.

### 1.1 Anforderungen an die Zyklone der Fahrzeuge

- Hoher Wirkungsgrad,
- geringer Abfall des Wirkungsgrades bei Teilbelastungen,
- geringer Platzbedarf,
- niedriger Druckverlust,
- geringe Wartungsansprüche.

Diese Forderungen stehen teilweise im Widerspruch miteinander. So können sehr geringe Druckverluste nur durch größere Abmessung und höchste Wirkungsgrade nur durch kleine Abmessungen mit entsprechend hohem Druckverlust erreicht werden.

Auf Grund der sich entgegenstehenden Forderungen war die Entwicklung von 3 Zyklontypen für den Fahrzeugbau zweckmäßig.

### 1.11 Zyklone größerer Abmessung mit niedrigem Druckverlust und freiem Austrag des Staubes

Diese Zyklone sollen bei der Nennbelastung Wirkungsgrade von mindestens 95% (die Bedingungen für die Wirkungsgradangabe werden später in dem Abschnitt Prüftechnik erörtert) haben; der Staub wird über Auswurfschlitz frei ausgetragen. Durch den freien Austrag ist es erforderlich, die Geschwindigkeit am Zyklonmantel, die sich als Unterdruck an den Austragschlitz auswirkt, gering zu halten. Dieses Ziel kann erreicht werden durch geringe Umlaufgeschwindigkeiten am Außenmantel der Zyklone (~ 10 m/s) und Druckverluste, die nicht höher als 250 bis 280 mm WS sind.

### 1.12 Zyklone mit kleinen Abmessungen, niedrigem Druckverlust und geschlossenem Austrag oder Absaugen des Staubes

Bei diesen Zyklonen sind bei der Nennbelastung Wirkungsgrade von mindestens 98% zu fordern. Infolge der hohen Um-

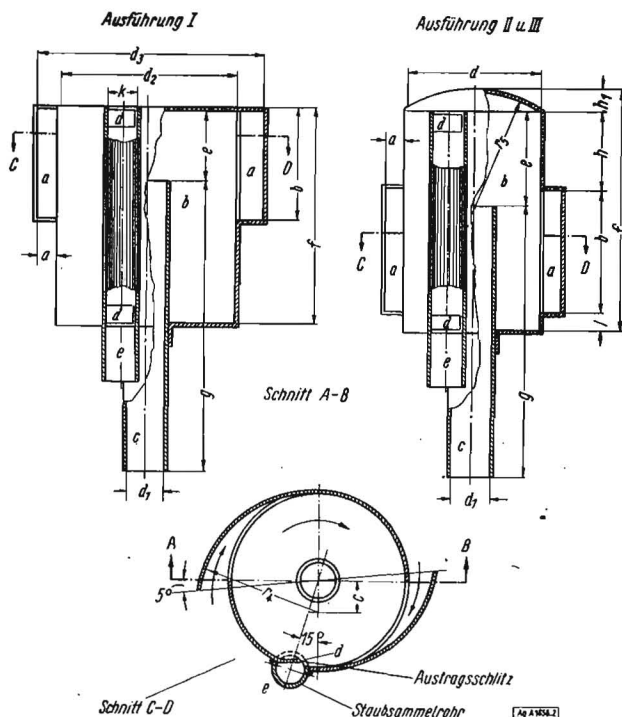


Bild 2. Zyklon-Luftfilter. a Lufterlauf, b Schleuderkammer, c Reingasrohr, d Austragsschlitz, e Staubsammlerrohr

laufgeschwindigkeit an dem kleineren Durchmesser des Außenmantels dieser Zyklone ist der Druckverbrauch durch die Geschwindigkeitshöhe so hoch, daß die Geschwindigkeit der über die Auswurfslitze bei freiem Austrag einströmenden Luft größer ist als die Auswurfgeschwindigkeit des Staubes. Aus diesem Grunde muß der Staub entweder in druckgleichem Raum ausgetragen oder abgesaugt werden. Die Druckverluste brauchen nicht höher als 250 bis 280 mm WS zu sein.

1.13 Zyklone mit Wirkungsgraden über 99%

Dies sind Zyklone kleiner Abmessung mit höherem Druckbedarf und geschlossenem Austrag bzw. Absaugen des Staubes. Der Druckbedarf liegt bei diesen Zyklonen zwischen 400 und 500 mm WS.

1.2 Strömungsverlauf in Zyklonen

- $c_m$  Radialgeschwindigkeit in der Senke [m/s],
- $c_u$  Tangentialgeschwindigkeit im Wirbel [m/s],
- $c_k$  Drehgeschwindigkeit des Kernes [m/s],
- $K$  Drallkonstante [m<sup>2</sup>/s],
- $v_{st}$  Fallgeschwindigkeit des Staubes [m/s],
- $\eta$  Kinematische Zähigkeit der Luft  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$ ,
- $\gamma_{st}$  Wichte der Staubteilchen [kg/m<sup>3</sup>],
- $\gamma_L$  Wichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>],
- $g$  Erdbeschleunigung  $\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$ ,
- $m$  Masse  $\left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \right]$ ,
- $k$  Widerstand des Stokesschen Reibungsgesetzes [kg],
- $C$  Zentrifugalkraft [kg],
- $\rho_s$  Krümmungshalbmesser der logarithmischen Spirale.

Trotz Einfachheit im Aufbau ist die Bewegung der Staubteilchen und der Verlauf der drei-dimensionalen Strömung im Zyklon äußerst verwickelt. Eine genaue rechnerische Erfassung der Strömungsvorgänge in den Zyklonen ist bisher noch nicht gelungen. Die Entwicklung der Zyklone mit maximalen Wirkungsgraden ist nur durch Versuch möglich.

Aus der Vielfalt der Strömungsvorgänge sollen die bei der Wirbelsenke vorhandenen Bedingungen, die bereits eine erste Grundlage für die Bemessung der Zyklone ergeben, und die Bedingungen für die Ausscheidung der Staubteilchen betrachtet werden. Durch den tangentialen Lufteinlauf bildet sich ein Potentialwirbel, dem durch den zentralen Reingasabzug eine Senke überlagert wird.

Für die tatsächliche Geschwindigkeitsverteilung im Wirbel gilt bis auf den Wirbelkern das Gesetz vom unveränderlichen Drall (Bild 3). Der Kern selbst ist nicht drehungsfrei, er dreht sich wie ein fester Körper. Die Geschwindigkeitsverteilung ergibt also im Kern ( $r_0$ ) eine Gerade, die bei  $r = r_0$  in eine Hyperbel übergeht. Der bei endlicher Höhe des Wirbels sich ausbildende Hohlwirbel (Bild 4) hat bei Luft im Kern einen Druck, der noch tiefer als der Gesamtdruck liegt. Bei Wasser ist der Kern mit Luft oder Dampf gefüllt. Sowohl bei den Saug- als auch bei den Druckzyklonen ist im Kern Unterdruck vorhanden. Die sich hierbei unter dem Einfluß der Schwere ausbildende Form der Oberfläche entspricht dem Druckverlauf. Die zentrale Flüssigkeitsentnahme ergibt eine Senke (Bild 5) mit radialen Geschwindigkeiten ( $c_m$ ).

Bei der im Zyklon durch die Überlagerung von Wirbel und Senke entstehenden Wirbelsenke (Bild 6) hat die aus den beiden senkrecht aufeinanderstehenden Geschwindigkeiten

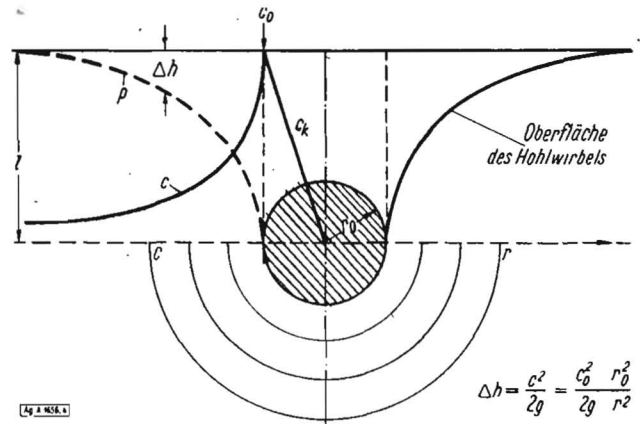


Bild 4. Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Hohlwirbel

$c_m$  und  $c_u$  resultierte Geschwindigkeit  $c_s$  den Winkel  $\alpha$  gegen den Umfang des Wirbels. Dieser ergibt sich zu:

$$\text{tg } \alpha = \frac{c_m}{c_u} = \frac{\frac{c_{m0} r_0}{r}}{\frac{c_{u0} r_0}{r}} = \frac{c_{m0}}{c_{u0}} = \text{konst.}$$

Auf Grund der Gleichheit der Geschwindigkeitsrichtung mit der Richtung der Stromlinie kann weiterhin geschrieben werden

$$\text{tg } \alpha = \frac{dr}{r d\varphi} = \frac{c_{m0}}{c_{u0}} \quad \text{oder} \quad \frac{dr}{r} = \frac{c_{m0}}{c_{u0}} \cdot d\varphi,$$

integriert ergibt sich

$$\ln \frac{r}{r_0} = \varphi \frac{c_{m0}}{c_{u0}} \quad \text{oder} \quad r = r_0 \cdot e^{\frac{c_{m0}}{c_{u0}} \varphi}$$

als Gleichung der logarithmischen Spirale.

Im Zyklon werden also die Stromlinien und damit auch die Strömung der logarithmischen Spirale folgen.

1.3 Die Staubabsonderung

Durch Einführen der Zentrifugalkraft, der Fall- oder Sinkgeschwindigkeit des Staubes und des Stokesschen Widerstandes können die Bedingungen für die Staubabsonderung betrachtet bzw. näherungsweise berechnet werden.

Wie bereits eingangs erwähnt (Bild 2), wird die staubhaltige Luft über den Einlaufstutzen eingesaugt und bewegt sich in logarithmischen Spiralen nach dem Reingasrohr, wo die vom Staub befreite Luft entnommen wird. Auf dem Wege nach dem Reingasrohr werden auf die Staubteilchen Zentrifugalkräfte ausgeübt, die meistens um ein Vielfaches größer sind als die Fallgeschwindigkeit des Staubes. Unter dem Einfluß dieser Kräfte werden die Staubteilchen nach der Wand bzw. den Staubaustrittsöffnungen geführt. Bewegt sich ein Staubteilchen  $S$  mit der Luftgeschwindigkeit  $c_s$  auf der logarithmischen Spirale, so ergibt sich die Zentrifugalkraft zu

$$C = \frac{m c_s^2}{\rho_s} \quad [\text{kg}],$$

wobei

$$\rho_s = \frac{r}{\cos \alpha}.$$

Für  $m$  gilt unter der Annahme, daß die Staubteilchen als Kugel vorliegen

$$m = \frac{\gamma_{st} \pi d_{st}^3}{6 g} \quad \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \right].$$

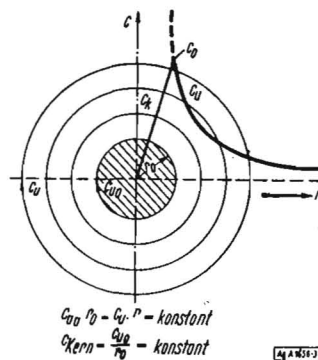


Bild 3. Potentialwirbel

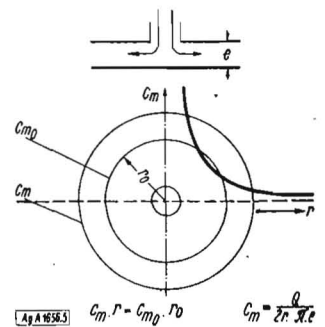


Bild 5. Geschwindigkeiten in der Senke

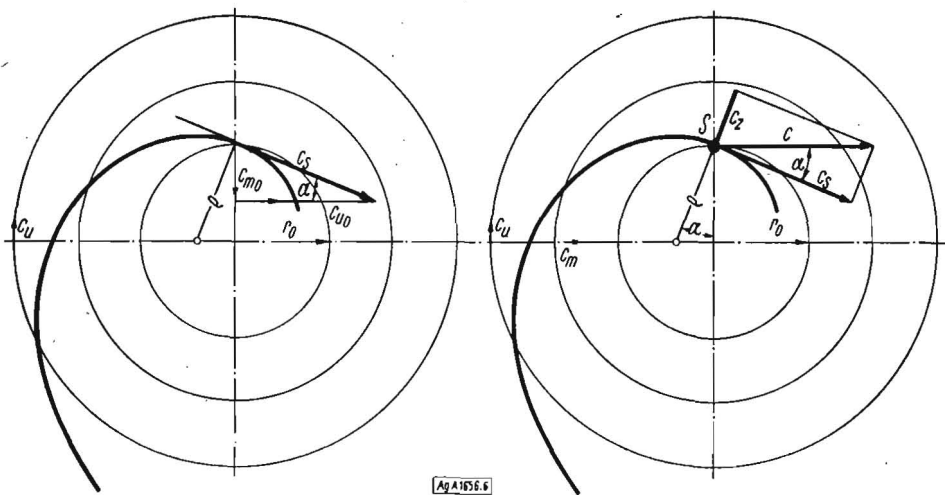


Bild 6. Links: Geschwindigkeiten in der Wirbelsenke Rechts: Zusätzliche Geschwindigkeiten der Staubteilchen

Die logarithmische Spirale ist als der Weg eines Staubteilchens berechnet. Auf ein Staubteilchen wirkt noch zusätzlich die Zentrifugalkraft und der Luftwiderstand, so daß dessen Bahn von der logarithmischen Spirale abweicht.

Von besonderem Interesse ist der Gleichgewichtsfall zwischen der nach außen gerichteten Zentrifugalkraft und der entgegengesetzt gerichteten Komponente des Widerstandes. Der Widerstand beträgt nach dem Gesetz von Stokes

$$k = 3 \pi \eta d_{St} c_z \quad [\text{kg}].$$

Dieser Widerstand kann nun der Zentrifugalkraft gleichgesetzt werden, und es ergibt sich

$$c_z = \frac{\partial^2 St \gamma St c^2 St}{18 \eta g \varrho_s} \quad [\text{m/s}],$$

wobei der Ausdruck

$$\frac{\partial^2 St \gamma St}{18 \eta} = v_{St} \quad [\text{m/s}]$$

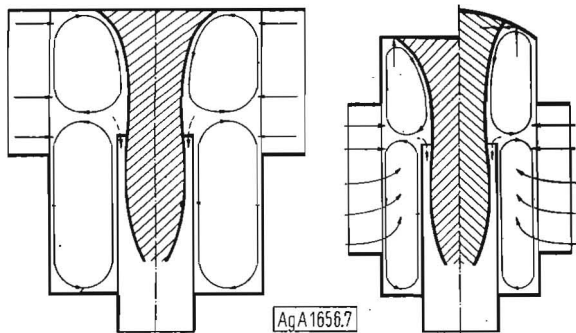


Bild 7. Sekundärströmung im Zyklon und deren Beeinflussung durch die Lage des Einlaufes (links und Mitte) und durch die Formgebung (rechts) des Deckels

der Fallgeschwindigkeit des Staubes in ruhender Luft entspricht. Beim Gleichgewicht zwischen Widerstand Zentrifugalkraft bewegt sich das Teilchen auf einem Kreise (Bild 6). Dieser Grenzfall ist offensichtlich für die Abscheidung der Staubteilchen wichtig. Mit  $\text{tg } \alpha = \frac{c_z}{c_s}$  ergibt sich nach entsprechender Umformung<sup>1)</sup> der Grenzradius ( $r_G$ ) auf dem sich ein Staubteilchen bestimmter Größe ( $d_{St}$ ) halten kann zu

$$r_G = d_{St} \sqrt{\frac{c_{u0} r_0 \gamma St}{\text{tg } \alpha 18 \eta g}}$$

<sup>1)</sup>  $\text{tg } \alpha = \frac{c_z}{c_s} = \frac{r St c_s}{g \varrho_s}$  und mit  $c_s = \frac{c_u}{\cos \alpha}$  und  $\varrho = \frac{r G}{\cos \alpha}$  gilt  $\text{tg } \alpha = \frac{r_s c_u}{g r G}$

wird der Drallsatz  $c_u = \frac{c_{u0} r_0}{r G}$  berücksichtigt, so ergibt sich bei gleichzeitigem Einsetzen der Fallgeschwindigkeit für den Staub

$$\text{tg } \alpha = \frac{\gamma St d^2 St c_{u0} r_0}{18 g \eta r G^2}$$

Für die Bestimmung der Größe des kleinsten Teilchens, das entfernt werden kann, gilt:

$$d_{St} = r_G \sqrt{\frac{\text{tg } \alpha 18 \eta g}{c_{u0} r_0 \gamma St}} \quad [\text{m}]$$

oder mit  $\text{tg } \alpha = \frac{c_{m0}}{c_{u0}}$  und  $r_0 = r_G$

$$d_{St} = 3 \sqrt{\frac{c_{m0} \eta g 2 r_G}{c_{u0}^2 \gamma St}} \quad [\text{m}].$$

Die Korngrößen, die abgeschieden werden können, sind vorwiegend von drei Faktoren abhängig:

- a) Von der Größe der radialen Geschwindigkeit ( $c_m$ ), der tangentialen Geschwindigkeit ( $c_u$ ) und der daraus resultierenden Richtung

$$c = \frac{c_u}{\cos \alpha} \quad \text{oder} \quad \text{tg } \alpha = \frac{c_{m0}}{c_{u0}} = \frac{c_m}{c_u}$$

- b) von den Krümmungshalbmessern,
- c) von der radialen Ausdehnung des Zyklons.

Ein Zyklon wird theoretisch um so besser sein, je größer bei bestimmter Einlaufgeschwindigkeit die Geschwindigkeitssteigerung der Umfangskomponente ( $c_u$ ) von außen nach innen, also je kleiner der Durchmesser des Reingasrohres ist. Die Steigerung der Geschwindigkeit und Verringerung des Durchmessers des Reingasrohres wird aber begrenzt durch den sich dann ergebenden hohen Druckverbrauch. Außerdem wird nach Überschreiten einer bestimmten Geschwindigkeitshöhe ein wesentlicher Gewinn an Wirkungsgrad durch die Randstörungen innerhalb des Zyklons nicht mehr eintreten.

Der vorstehend beschriebene Vorgang der Abscheidung hat aber nur volle Gültigkeit für ebene Strömung. Die stets vorhandene Reibung ergibt immer Sekundärströmungen (Bild 7). Die Umlaufrichtung der Sekundärwirbel am Boden und Deckel ist nach innen gerichtet. An den Berührungstellen der Doppelwirbel, die bei den Zyklonen im Bereich des Einlaufes liegen, verläuft die Richtung nach außen. Das Vorhandensein der Sekundärwirbel ist an den sich in den Ecken bildenden Staubringen und der Bewegung des am Mantel umlaufenden Staubes erkenntlich. Während die Sekundärwirbel bei den Windsichtern die Trennung der Korngrößen erschweren, begünstigen diese bei den Zyklonen bei richtiger Stellung des Endes des Reingasentnahmerohres zu den Trennstellen der Doppelwirbel die Staubabscheidung durch die zusätzliche, nach außen gerichtete Schleppwirkung für den Staub. Die günstigste Stellung des Reingasrohres muß durch Versuche ermittelt werden.

Um auch bei geringen Luftbelastungen der Zyklone für die Abscheidung ausreichende Umlaufgeschwindigkeiten bzw. einen geringen Durchmesser des Kernraumes zu erhalten, kann durch Ausbildung der Zyklondeckel als Kugelschale (Bild 7) oder Kegel dessen Ausdehnung beeinflusst werden.

Durch Auftreffen der Strömung des Sekundärwirbels auf den geformten Zyklondeckel (Bild 7 rechts) wird die Strömung des Sekundärwirbels nach innen umgelenkt und ist der, durch die Zentrifugalkraft entstehenden, nach außen verlaufenden Strömungskomponente entgegengerichtet. Hierdurch wird der Kernraumdurchmesser verringert und die Umlaufgeschwindigkeit erhöht. Damit wird die Abscheidung bei Teillast verbessert.

Die Primär- und Sekundärströmung im Zyklon bleibt bei jeder Lage des Zyklons erhalten und für die Abscheidung wirksam. (Fortsetzung im nächsten Heft) A 1656

### An unsere Leser!

Von der Unwetterkatastrophe sind auch eine Reihe von Papierfabriken betroffen worden. Der dadurch bedingte vorübergehende Produktionsausfall zwingt uns, in diesem Heft auf die Herausgabe der Referatkartei zu verzichten und im Textteil 4 Seiten einzusparen. Wir bitten unsere Leser um Verständnis für diese notwendige Maßnahme. AZ 1733 VEB Verlag Technik