

ENTWICKLUNG VON ABSCHIEDERGITTERN FÜR SCHIENENFAHRZEUGE MITTELS MODELLTECHNIK

M. HACKESCHMIDT und M. RÖSSLER

Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« Dresden
Sektion Fahrzeugtechnik

Eingegangen am 15 April 1986

Abstrakt

Mittels Modelltechnik entwickelte Abscheidergitter für Schienenfahrzeuge, die in bezug auf Abscheiderleistung und Energiebedarf dem konventionellen Düsenlüftungsgitter überlegen sind. Wirkungsweise des Flichkraft-Sedimentations-Abscheiders (FSA) und des konventionellen Düsenlüftungsabscheiders (DLA) und deren entscheidende Einflußgröße für den Gesamtdruckverlust. Universelle Arbeitsdiagramme ermöglichen eine Optimierung zwischen Abscheidegrad und Energiebedarf des jeweiligen Abscheiders.

1. Einleitung

In Schienenfahrzeugen werden große Außenluftmengen zur Bauteilkühlung, Lüftung, Klimatisierung und für Verbrennungsmotoren angesaugt. Diese Luftströme sollen von mitgeführten Staubteilchen, Flüssigkeitströpfchen, Insekten und Schnee durch Abscheidergitter so gründlich gereinigt werden, daß die nachfolgenden Feinfilter nicht zu schnell verschmutzen. Der Druckverlust derartiger Abscheider muß verkleinert werden, um den geförderten Luftstrom zu erhöhen. Der eingesetzte Lüfter arbeitet am günstigsten im Saugbetrieb, um den Verschleiß durch Staubpartikel und die Lärmbelastigung zu vermindern.

Ein wichtiges Anliegen der sich als Wissenschaftsdisziplin erst konstituierenden Modelltechnik ist es, schnell und mit geringstem Aufwand praxisrelevante Forschungsergebnisse zu erzielen. In diesem Sinne liegt es nahe, die ersten diesbezüglichen Untersuchungen mit Hilfe physikalisch teilähnlicher Modelle durchzuführen, um die Funktionstüchtigkeit eines auf einem neuen Wirkprinzip beruhenden Abscheiders nachzuweisen. Die anschließende Untersuchung am physikalisch ähnlichen Modell verlangt zwar einen experimentell höheren Aufwand, man kann sich aber bei der Variation relevanter Einflußgrößen auf gleichsam voroptimierte Bereiche beschränken.

Wie im folgenden dargelegt wird, lassen sich unter Nutzung der Modelltechnik, also unter Verwendung von verschiedenartigen Modellen, zielgerichtet neuartige Abscheidergitter mit Eigenschaften für Schienenfahrzeuge entwickeln, die in bezug auf Abscheideleistung und Energiebedarf dem konventionellen Düsenlüftungsgitter überlegen sind.

2. Ähnlichkeitstheoretische Bewertung der verwendeten physikalischen Modelle

Die konsequente Anwendung der Ähnlichkeitstheorie bei der Konstruktion physikalischer Modelle führt durch systematische Erfassung aller wesentlichen Einflußgrößen, die universelle Darstellung von Versuchsergebnissen zur Aufdeckung physikalischer Gesetzmäßigkeiten und zur Reduzierung des Versuchsaufwandes [1]. In einer Bewertungsliste (Tabelle 1) werden die Ähnlichkeitskennzahlen (Simplexe S , Komplexe π [1]) zur Beschreibung der strukturellen Eigenschaften des Ausgangssystems (Original) und der physikalischen Modelle zusammengefaßt. Ein Abschätzen der Übertragbarkeit der an den Modellen gewonnenen Ergebnisse auf die Abscheidergitter der Schienenfahrzeuge kann mit dem Ähnlichkeitsmaß m_A vorgenommen werden, nachdem die einzelnen Ähnlichkeitskennzahlen entsprechend ihrer Bedeutung mit Gewichten μ belegt worden sind. Das Ähnlichkeitsmaß gibt an, welcher ungefähre Anteil der gewichteten Ähnlichkeitskennzahlen in den Modellen realisiert wird und dient zur Bewertung der Modellgüte [2]. Dabei genügt es, die Bewertung dieser Gewichte μ , deren Werte zwischen 0 und 1 liegen, nach Erfahrungen aus vergleichbaren Modelluntersuchungen in recht grober Weise vorzunehmen. Diese Erkenntnis gilt vor allem für Systeme mit relativ großer Anzahl von Einflußgrößen.

Es werden verschiedene Modelltypen verwendet, um einerseits verschiedene Abscheiderelemente und andererseits das gesamte Abscheidergitter zu erforschen. Die Teilähnlichkeit bei den Untersuchungen am Abscheiderelement der Teilung t (Abb. 1) entsteht durch die geringe relative Modellhöhe z/t im Staubkanal, die die äußere geometrische Ähnlichkeit $(1/2.4)^*$ zum Ausgangssystem verletzt und zu Sekundärströmungen im Modell führt. Hier ist daher das Gewicht $\mu = 0$. Das Abscheidergitter hingegen stellt ein geometrisch ähnliches Modell dar.

Die Ähnlichkeit der inneren Systemgeometrie [1] (1/3.4 und 1/3.6) wird durch einen für eine Vielzahl von Stäuben repräsentativen Probestaub (Abb. 2) und durch ein für Sprühregen repräsentatives Tröpfchenspektrum (dominierende Tröpfchengröße $\bar{d} = 2 \cdot 10^{-5}$ m) gewährleistet. Hier ist $\mu = 1$ gewählt worden.

Die Ähnlichkeitskennzahlen für die Dynamik der als Trägermittel dienenden Fluidströmung werden im Modell des Abscheiderelements (1/4.4, 1/5.4, 1/6.4) weitgehend eingehalten ($\mu = 1$). Reynoldszahl (1/4.2) und Machzahl (1/5.1) bildet man mit der charakteristischen Spaltgeschwindigkeit u_p (a . . . Schallgeschwindigkeit). Die Turbulenzstruktur wird durch die Grenzschichten und Wirbelgebiete im Modell geprägt. Sie wird durch die kinetische

* Die Zahl vor dem Schrägstrich verweist auf die Tabelle, die Zahlen danach auf Zeile und Spalte der Tabelle.

Tabelle 1

Bewertungsliste zur Erfassung bzw. Wichtung μ der Ähnlichkeitskennzahlen und zur Ermittlung des Ähnlichkeitsmaßes m_{Λ}

Original »Schienenfahrzeug«			Physikalische Strömungsmodelle				
			»Abscheiderelement«		»Abscheidergitter«		
S	π	μ_{Λ}	Staubmodell $\mu_{M, B}$	Fließmodell $\mu_{M, F}$	Tropfenmodell $\mu_{M, T}$	Fließmodell $\mu_{M, F}$	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
(1) $x/t, y/t$		1	1	1	1	1	Geometrie
(2) Z/t		1	0	1	1	1	
(3) \bar{d}		1	1	0	1	0	
(4) $Ma_b = U_b/a$	$Re_b = (U_b \cdot t)/\nu$	1	1	0	1	0	Dynamik Trägermittel
(5) I, L	$Sr = (f \cdot L)/u$	1	1	1 $Fr_F \approx Ma$	1	1	
(6) $U_{\infty}/U_b, V_{\infty}/U_b$		0,5	0	0	} 0,5 (Stillstand) } 0 (Fahrt)	} 0,5 } 0,5	
(7) W_{∞}/U_b							
(8) I_{∞}, L_{∞}	$Sr_{\infty} = (f_{\infty} \cdot L_{\infty})/u_{\infty}$	0,5	0	0	0	0	
(9) $Ba = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \frac{C_{iw}}{\bar{d}} \frac{b}{t}$		1	1	0	1	0	
(10) $Fr = U_b/\sqrt{g \cdot b}$		1	1	0	1	0	
(11) $Re_d = (U_b \cdot \bar{d})/\nu$		1	1	0	1	0	
(12)		10 $= \mu_{\Lambda}$	8	4	} 9,5 } 9,0	5	Ähnlichkeits- maß
(13)	$m_{\bar{\Lambda}} = \frac{\sum \mu_M}{\mu_{\Lambda}}$		$m_{\bar{\Lambda}} = \frac{8}{10} = 0,8_{\bar{\Lambda}}$	$m = \frac{4}{8} = 0,5$		$m_{\bar{\Lambda}} = \frac{9,5}{10} = 0,95$	
					$m_{\bar{\Lambda}} = \frac{9,0}{10} = 0,9$	$m_{\bar{\Lambda}} = \frac{5}{9} = 0,6$	

ABSCHIEDERGITTER FÜR SCHIENENFAHRZEUGE

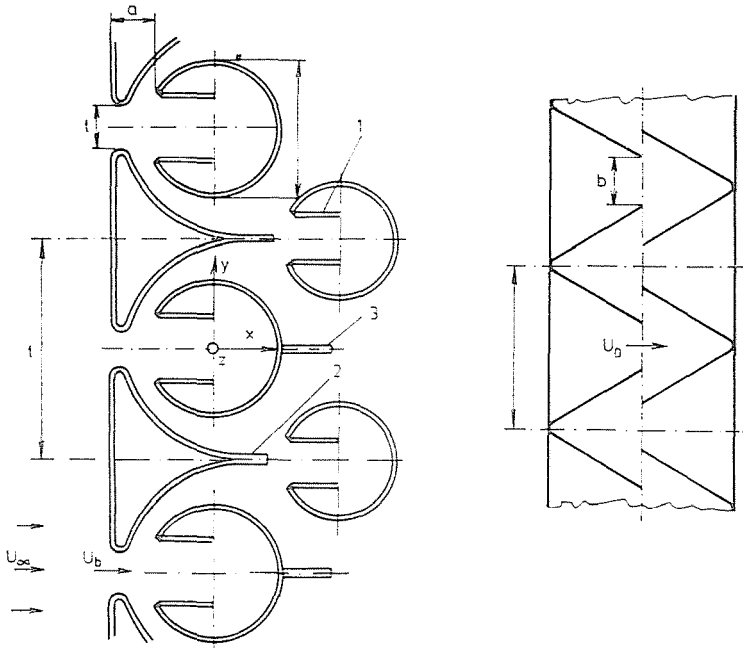


Abb. 1. Schematische Darstellung des Fliehkraft-Sedimentations-Abscheidergitters (links) und Düsenlüftungsgitters (rechts). (1) Staubführungskanal, (2) Diffusor, (3) Stabilisierungsblech, (4) Hohlprofil

Energie der Turbulenz I (1/6.1) und den Makromaßstab L als charakteristisches Wirbelmaß beschrieben [3]. Als charakteristischer Ähnlichkeitskomplex π kann die Strouhalzahl Sr (1/6.2) mit der Wirbelfrequenz f gebildet werden. Die Geschwindigkeitskomponenten (1/7.1) und die Turbulenzstruktur (1/8.1) der Fahrzeugumströmung bestimmen die Ansaugbedingungen am Original. Die starke Beschleunigung in den Ansaugschlitzern beider Abscheidertypen (Abb. 1) führt zu einer Vergleichmäßigung der Strömung und Dämpfung der Anströmturbulenz. Das erklärt das verminderte Gewicht (1/7.3, 1/8.3) dieser Einflußgrößen. Durch die eindimensionale Rohrströmung im Staubkanal können die Anströmverhältnisse am Abscheiderelement (1/7.4, 1/8.4) gar nicht und durch die eindimensionale Kanalströmung am Abscheidergitter nur teilweise (Stillstand des Fahrzeuges) (1/7.6) modelliert werden.

Die die Dynamik des Fördermittels kennzeichnenden Ähnlichkeitskennzahlen wie die Barthzahl (1/9.2), die Froudezahl (1/10.2) und die Reynoldszahl (1/11.2) werden weitgehend eingehalten. Der Widerstandsbeiwert c_w (1/9.2) ist abhängig von der Reynoldszahl Re_d (1/11.2) [4]. Die Dichte ρ und Viskosität ν des Trägermittels, die Dichte ρ_m des Fördermittels und die Erdbeschleunigung g sind konstante Größen. Die Umströmung der Staubpartikel (Abscheider-element) bzw. der Flüssigkeitspartikel (Abscheidergitter) ist mechanisch und die Teilchenbahn geometrisch ähnlich [4].

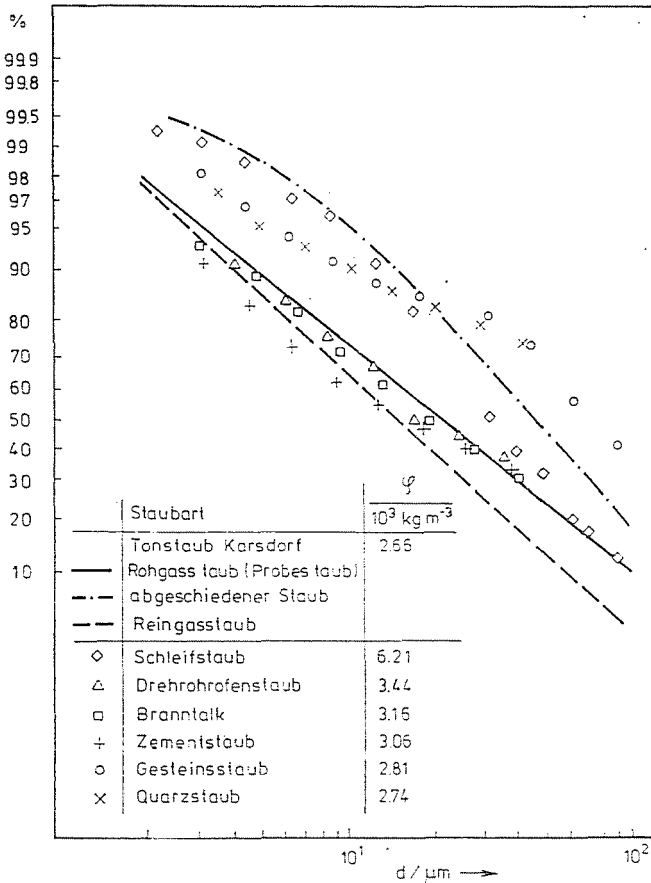


Abb. 2. Korngrößenverteilung des verwendeten Probestaubes im Vergleich mit Industriestauben

Das abgeschätzte Ähnlichkeitsmaß von $m_A = 0,8$ (1/13.4) ordnet die Untersuchungen im Staubkanal (Abscheiderelement) in die Gruppe der Näherungsmodelle ein. Als hinreichend genau für die physikalisch ähnliche Modellierung (korrektes Modell) der Tröpfchenabscheidung erweisen sich hingegen die Experimente am Abscheidergitter (1/13.6) [3] bei stationärer Anströmung (Stillstand des Fahrzeuges). Dieses Modell reduziert sich auf ein Näherungsmodell, wenn vom Stillstand zur Fahrtbewegung übergegangen wird.

Dem »Staubmodell« und dem »Tropfenmodelle sind jeweils Fließmodelle zugeordnet, die dem ebenen Schnitt (Abb. 1) geometrisch ähnlich sind. Der räumliche Charakter der Modelle wird durch die Wasserhöhe begrenzt. Die Stromlinien und Wirbelgebiete (1/6.5, 1/6.7) im Trägermittel können unter Einhaltung der der Machzahl analogen Froudezahl Fr_F (1/5.5) der Flachwasserströmung sichtbar gemacht werden und ermöglichen auf sehr einfache Weise



Abb. 3. Stromlinienbilder in den Abscheidergittern (links: Fließmodell »Fliehkraft-Sedimentations-Abscheidergitter«, rechts: Fließmodell »Düsenlüftungsgitter«)

eine gezielte Beeinflussung der Strömung [6]. Dabei müssen die im Gegensatz zum Original laminaren Strömungsverhältnisse wegen Nichteinhaltung der Reynoldszahl ($1/4.5$, $1/4.7$) berücksichtigt werden. Deshalb hat der Verlauf der verzögerten Strömung in den gekrümmten Diffusoren nur orientierenden Charakter (Abb. 3, rechts). Obgleich die Umströmung der Staub- bzw. Flüssigkeitspartikel in der Fließrinne nicht modelliert worden ist, erscheint die Bewertung als Orientierungsmodell [2] gerechtfertigt. Es liefert brauchbare Aussagen über die Strömungsverhältnisse des Trägermittels.

3. Versuchsergebnisse von physikalischen Strömungsmodellen

3.1. Näherungsmodell »Abscheiderelement«

Das neuentwickelte und patentierte Wirkprinzip wird zuerst am physikalisch teilähnlichen Modell »Abscheiderelement« im Staubkanal** erprobt und optimiert. Es beruht auf der Kombination von Stauumlenkung und strömungstotem Raum (Abb. 3, rechts). Der im Eintrittsspalt eingeschnürte partikelhafte Luftstrom wird vor einem geschlitzten Hohlprofil aufgestaut und scharf umgelenkt. Die Partikel gelangen infolge der Trägheitswirkung in das Hohlprofil, in welchem durch einen Staubführungschanal die Sekundärströmungen [5], [6] unterbunden werden und so ein »strömungstoter« Raum

** Dem Bereich Strömungstechnik der TU Dresden unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Vollheim und Dr.-Ing. K. Michael (VEB Kombinat für Luft- und Kältetechnik Dresden) wird für großzügige Unterstützung gedankt.

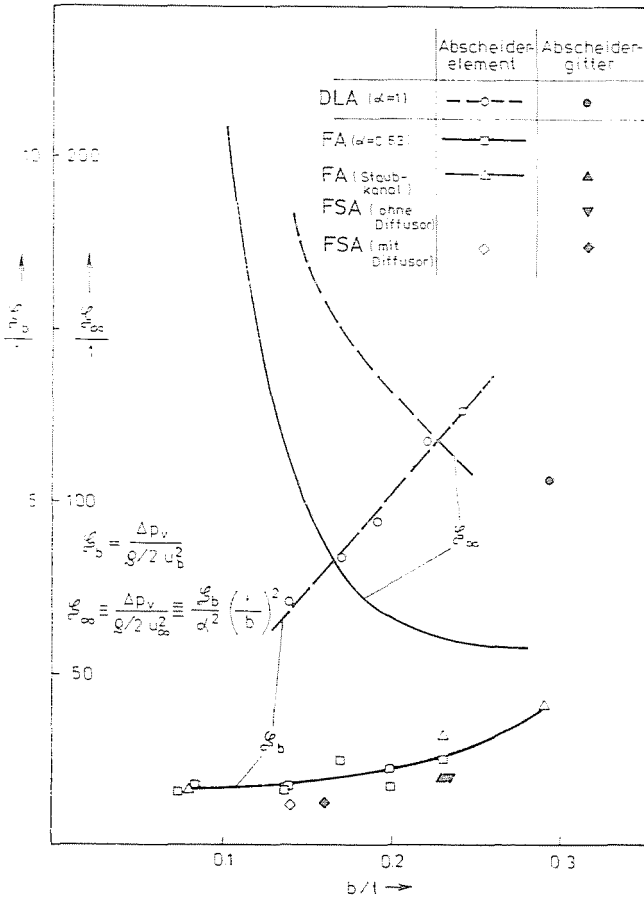


Abb. 4. Gesamtdruckverlustbeiwerte ζ in Abhängigkeit von der relativen Spaltweite b/l

entsteht. Diese einfache Kombination von Eintrittsspalt und Hohlprofil wird als Fliehkraftabscheider (FA) bezeichnet. Eine Sedimentation feinerer Staubpartikel erfolgt durch Verzögerung der Strömung nach der Stauumlenkung in gekrümmten Diffusoren, hinter denen kleinere Hohlprofile angeordnet sind (Abb. 1).

Der so entstehende Fliehkraft-Sedimentations-Abscheider (FSA) rechtfertigt den erhöhten technologischen Aufwand sowohl durch höheren Abscheidegrad als auch durch seinen energetisch günstigen Druckrückgewinn.

Das Wirkprinzip des konventionellen Düsenlüftungsabscheiders (DLA) beruht auf einer zweifachen Stauumlenkung. Der DLA besitzt keinen »strömungstoten« Raum, in dem sich die Partikel ungehindert abscheiden können (Abb. 3, rechts).

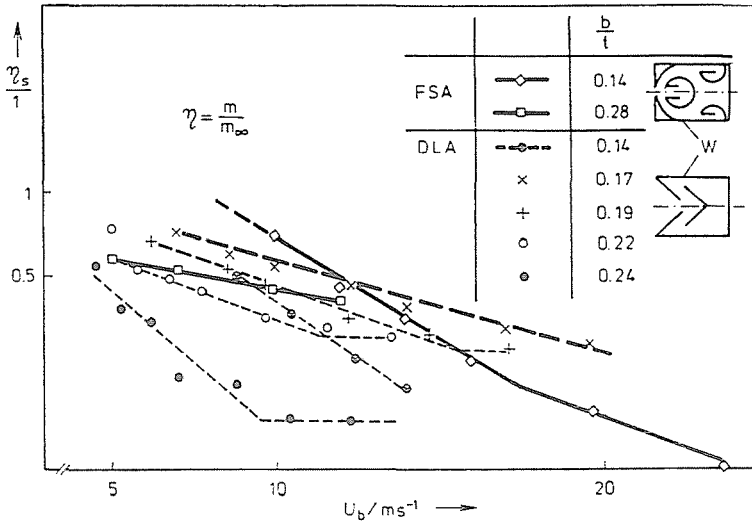


Abb. 5. Abhängigkeit des Staubabscheidegrades η_s von der Geschwindigkeit u_b und relativer Spaltbreite b/t am Abscheiderelement

Als entscheidende Einflußgröße für den Gesamtdruckverlust Δp_v erweist sich die relative Spaltbreite b/t , Abb. 4. Das wird insbesondere bei dem auf die Anströmgeschwindigkeit u bezogenen Druckverlustbeiwert ζ_u deutlich, der für beide Abscheider mit abnehmender Spaltbreite progressiv ansteigt. Der auf die Spaltgeschwindigkeit u_b bezogene Beiwert ζ_b dient der universellen Darstellung der Versuchsergebnisse, wobei bei FA bzw. FSA der Kontraktionskoeffizient α beachtet werden muß.

Die teilähnlichen Modelle zeigen im direkten Vergleich einen niedrigeren Druckverlust von FA und FSA als der DLA. Wegen der durch die Begrenzungswände verursachten zusätzlichen Strömungsverluste sind die Druckverlustbeiwerte nicht direkt auf das Original übertragbar, d. h. sie sind in Wirklichkeit noch etwas geringer (vgl. die Hohlzeichen mit den entsprechenden Vollzeichen in Abb. 4 miteinander).

Theoretisch wird ein hoher Abscheidegrad erreicht, wenn die Bahnlinien der Staubteilchen durch große Fliehkräfte von den Stromlinien abweichen und diesen Vorgang beschreibende Barthzahl $Ba \sim \frac{b}{t} \cdot \frac{1}{u_b}$ möglichst klein ist [4].

In Abb. 5 sind die Abscheidegrade η_s der Staubpartikel als Verhältnis der abgeschiedenen Staubmenge m zur Anströmmenge m_∞ aufgetragen. Beim FSA zeigt sich eine Erhöhung des Abscheidegrades η_s durch eine mit der Verringerung der Spaltbreite verbundene stärkere Stromlinienkrümmung des eingeschnürten Luftstromes. Für das DLG ergibt sich ein optimale Bereich $b/t = 0,17 \dots 0,22$. Ein höherer Abscheidegrad η_s wird hierbei vom FSA

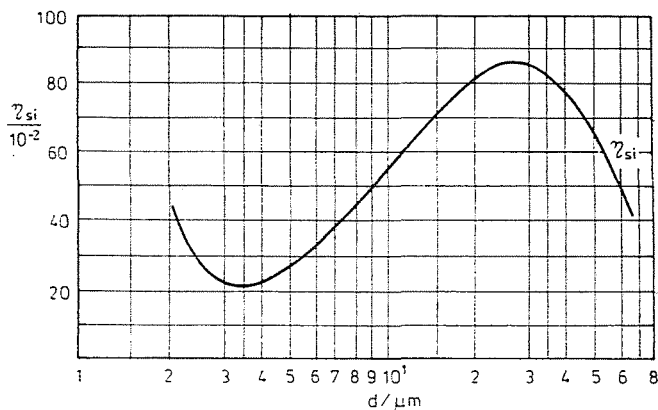


Abb. 6. Fraktionsabscheidegrad $\eta_{s,i}$ des Abscheiderelements eines Düsenlüftungsabscheiders

nur bei niedrigeren Geschwindigkeiten $\bar{W}_b \leq 12 \text{ ms}^{-1}$ realisiert. Eine zunehmende Spaltgeschwindigkeit u_b müßte durch höhere Fliehkräfte theoretisch zu größeren Abscheidegraden führen. Zur Erklärung des abnehmenden Abscheidegrades η_s (Abb. 5) für beide Abscheidertypen muß u. a. der physikalische Grundvorgang des Partikel-Wand-Kontaktes [7] berücksichtigt werden. Bei großen Geschwindigkeiten u_b vergrößert sich der Impuls der auf die Wände des Abscheiders auftreffenden Staubpartikel. Diese prallen vor allem von den Wänden (W) ins Strömungsfeld zurück und reißen bereits anhaftenden Staub mit sich. Diese Hypothese wird von der Korngrößenanalyse des abgeschiedenen Staubes im DLA bestätigt, die oberhalb eines bestimmten Korndurchmessers $d = 30 \mu\text{m}$ (Abb. 6) einen starken Abfall des Fraktionsabscheidegrades $\eta_{s,i}$ zeigt. Die für staubbeladene Gasströme so charakteristische Barthzahl ($1/10.2$) erfährt diese physikalische Gesetzmäßigkeit nicht, und sie ist in diesem Fall für die Auftragung der Versuchsergebnisse ungeeignet. Einen weiteren Wandeinfluß stellen Sekundärströmungen dar, die ebenfalls mit Barthzahl nicht erfaßt wird.

Die im Abb. 5 dargestellten Versuchsergebnisse haben folglich nur orientierenden Charakter. Sie können auf Abscheidergitter nicht unmittelbar übertragen werden.

3.2. Korrektes Modell »Abscheidergitter«

Der am physikalisch ähnlichen Modell im Aerosolkanal*** ermittelte Druckverlustbeiwert der Abscheidergitter kann direkt auf das Original übertragen werden. Die ermittelten Meßpunkte sind zum Vergleich in Bild 4 ein-

*** Dem Bereich Strömungstechnik der TU Dresden unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Vollheim und Dr.-Ing. K. Michael (VEB Kombinat für Luft- und Kältetechnik Dresden) wird für großzügige Unterstützung gedankt.

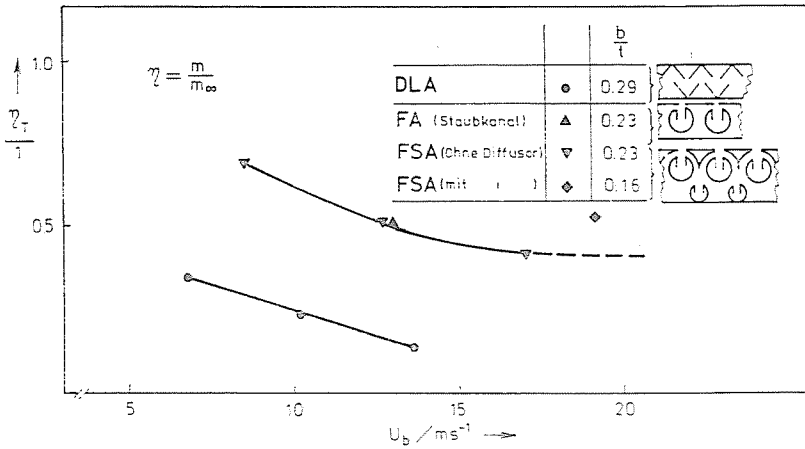


Abb. 7. Abhängigkeit des Tröpfchenabscheidegrades η_T von der Geschwindigkeit u_b und relativer Spaltbreite b/t

getragen. Für eine im Schienenfahrzeugbau verwendete Variante des DLA $b/t = 0,29$ wird ein Druckverlustbeiwert von $\zeta_b = 5,7$ (d. h. von $\zeta_\infty = 62$) ermittelt, der für den FA bzw. FSA um etwa 30% niedriger liegt. Bei kleineren relativen Spaltbreiten b/t wird dieser Unterschied zunehmend größer.

Die positive Wirkung der gekrümmten Diffusoren bei der gezielten Verzögerung der Strömung im FSA und der Vermeidung energieverzehrender Ablösegebiete waren leider nicht eindeutig quantifizierbar, da die Meßpunkte (Abb. 4) für verschiedene Spaltbreiten gelten.

Bei der Untersuchung der Abscheidergitter konnte nur der Abscheidegrad η_T für Flüssigkeitströpfchen bestimmt werden, der für FA und FSA

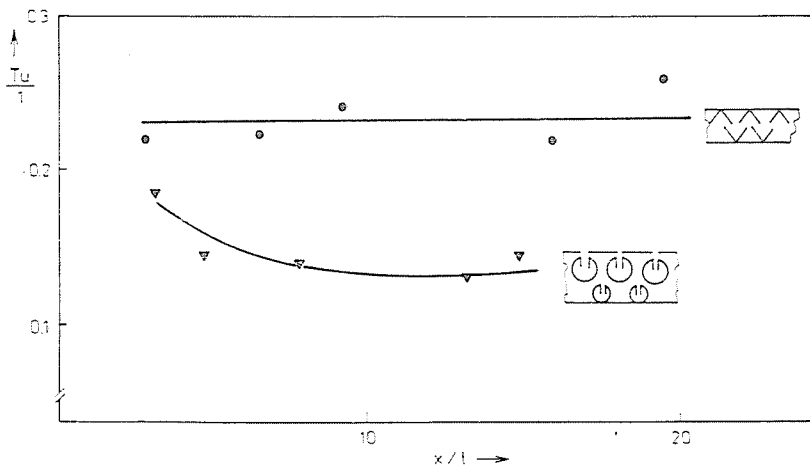


Abb. 8. Turbulenzgrad Tu im Nachlauf der Abscheidergitter

doppelt bis dreifach so hoch ist wie beim DLA (Abb. 7). Eine Abhängigkeit vom Tröpfchenspektrum des Aerosols ist nicht feststellbar. Bei den Abscheidertypen nimmt der Abscheidegrad η_T mit zunehmenden Spaltgeschwindigkeiten u_b ab. Bei hohen Geschwindigkeiten gewährleistet nur der FSA eine stabile Filterwirkung, während der DLA versagt.

Der in Abb. 3 aufgetragene Turbulenzgrad T_u im Nachlauf (Lee) der Abscheidergitter liegt beim FSA niedriger als beim DLA. Als Ursache dafür zeigt das Fließmodell (Abb. 3, rechts) eine Stabilisierung der Strömung im Abscheider durch Verminderung der Wirbelbildung, wobei der Einsatz der gekrümmten Diffusoren und der Stabilisierungsbleche an der Rückseite der vorderen Hohlprofilreihe (Abb. 1) zu noch gleichmäßigerer und »wirbelärmerer« Abströmung führt.

Zusammenfassung

Ein neuentwickeltes Wirkprinzip ist am physikalisch teilähnlichen Modell »Abscheider-element« erprobt und optimiert worden. Die experimentell bestimmten Staubabscheidegrade und Druckverlustbeiwerte können mit dem ebenfalls untersuchten Wirkprinzip des im europäischen Schienenfahrzeugbau weit verbreiteten Düsenlüftung-abscheiders (DLA) verglichen werden. Es ergibt sich ein wesentlich niedrigerer Druckverlust bei etwa gleicher Staubabscheidung für das Abscheiderelement »Fliehkraft-Sedimentations-Abscheider« (FSA).

Der wesentlich höhere experimentelle Aufwand der physikalisch ähnlichen Modellierung an den Abscheidergittern ist gerechtfertigt, da die Versuchsergebnisse direkt auf das Schienenfahrzeug übertragbar sind. Die niedrigeren Druckverluste und wesentlich höheren Abscheidegrade für Flüssigkeitströpfchen beweisen die Überlegenheit des alternativen Fliehkraft-Sedimentations-Abscheidergitter gegenüber dem konventionellen Düsenlüftungsgitter. Die universellen Arbeitsdiagramme ermöglichen dem Ingenieur in der Praxis eine Optimierung zwischen Abscheidegrad und Energiebedarf des jeweiligen Abscheiders.

Die zugeordneten Fließmodelle geben wichtige kausale Aufschlüsse über physikalische Ursachen der Meßergebnisse.

Literatur

1. HACKESCHMIDT, M.: Strömungstechnik: Ähnlichkeit, Analogie, Modell. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1972.
2. HACKESCHMIDT, M.: Zur Problematik der Übertragung von Modellergebnissen auf das Originalobjekt. Wissensch. Z. der HfV »Friedrich List« Dresden Sonderheft 4, 8. . . 21 (1983).
3. KLATT, F.: Experimentelle Untersuchung zur Struktur des turbulenten Strömungsfeldes im inhomogenen Gebiet hinter ebenen Stabgittern. in: Beiträge zur theoretischen und experimentellen Untersuchung der Turbulenz: Schriftenreihe des ZIMM Berlin, Akademie-Verlag (1976) 22.
4. VOLLHEIM, R.: Pneumatischer Transport. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1971.
5. RÖSSLER, M.—HACKESCHMIDT, M.: Mechanische Abscheider zur Rauchgasentstaubung. Energietechnik 35. Jg. Heft 1, Januar 1985.
6. HACKESCHMIDT, M.—RÖSSLER, M. u.a.: Strömungstechnische Optimierung eines mechanischen Staubabscheiders. Luft- und Kältetechnik 1985/4.
7. MICHAEL, K.: Physikalische Grundvorgänge in Entstaubungsanlagen. Luft- und Kältetechnik 1982/2.

Prof. Dr. Ing. habil Manfred HACKESCHMIDT	} DDR-8010 Dresden } Friedrich-List-Platz 1.
Dr. Ing. Matthias RÖSSLER	