

Einfluss von Kondensationseffekten auf die Staubabscheidung

M. Lemann* und F. Widmer**, Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH Zürich



M. Lemann

Abstract

By the separation of aerosols from air an improved separation efficiency can be obtained by condensation effects in wet scrubbers. The investigations carried out in a test plant show that in the air-vapour-aerosol-mixture supersaturated by injection of vapour (mean diameter of the aerosol particles $0,84\mu\text{m}$) in the venturi separator above all an essential increased separation of the smallest aerosol particles can be obtained. This effect is especially because of the grow-up of the particles by extension of the condensed vapour and partly by turbulent agglomeration.

1. Einleitung

Obschon der Staubbiederschlag auf die Erde zurückgeht – seit 1964 um 40% – nimmt der in der Luft schwebende Staubanteil zu [1]. Langfristige Immissionsmessungen zeigen eine Verschiebung zu Feinstäuben $< 10\mu\text{m}$. Feinstäube $< 2\mu\text{m}$ rufen verschiedene unerwünschte Erscheinungen hervor. Dazu gehören unter anderem folgende Nachteile:

- Teilchen mit Durchmesser zwischen $0,1$ und $1,0\mu\text{m}$ dringen bis in die feinsten Lugenwege, die sogenannten Alveolen (hier findet der Stoffaustausch statt), vor.
- Feinstaub reduziert die Sicht im Freien sehr stark.
- Feinstaub bleibt sehr lange als Schwebstaub in der Atmosphäre.

* Dipl. Ing. M. Lemann, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH, CH-8092 Zürich

** Prof. Dr. F. Widmer, Vorsteher des Institutes für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH, CH-8092 Zürich

Diese Feststellungen rufen nach einer wesentlichen Verbesserung der Abscheideleistung von Staubabscheidern bezüglich dem Feinstaubanteil. Feinstäube werden durch Nasswäscher relativ gut zurückgehalten und daher sollen die weiteren Ausführungen auf Nasswäscher beschränkt bleiben.

In einem Nasswäscher führen folgende drei Vorgänge zum Kontakt zwischen Staub und Waschflüssigkeit:

a. Der direkte Zusammenstoss zwischen Staubpartikel und Wassertropfen.

b. Die Brownsche Molekularbewegung der Staubpartikel (Teilchen mit einem Durchmesser $d_p < 0,1\mu\text{m}$ werden in ihren Bewegungen durch die Zusammenstösse mit Gasmolekülen beeinflusst und bewegen sich daher wie die Gasmoleküle sehr unregelmässig, wobei sie mit dieser Eigenbewegung bis auf die Tropfenoberfläche diffundieren können.)

c. Die Kondensationseffekte (Schleppdiffusion, turbulente Agglomeration und Teilchenwachstum durch Kondensatanlagerung).

Betrachtet man die Feinstäube, so zeigt es sich, dass durch die Kondensationsvorgänge bei Nasswäschern eine Abscheidegradverbesserung herbeigeführt werden kann [2-6].

2. Kondensationseffekte

Die Kondensationseffekte kann man durch verschiedene Mechanismen hervorrufen. Das Ziel dabei ist immer, den Wasserdampf zum Auskondensieren zu bringen, wozu eine Wasserdampfübersättigung notwendig ist.

Bei der Mischkondensation werden entweder zwei mit Wasserdampf gesättigte Gasströme mit unterschiedlichen Temperaturen zusammengebracht, wodurch sich eine Wasserdampfübersättigung einstellt oder man mischt einem warmen, gesättigten Luftstrom einen kalten, ungesättigten Luftstrom bei. Am häufigsten aber wird das Aerosol-Luft-Gemisch direkt durch Wasserdampfzugabe übersättigt.

Die adiabate Expansion als auslösender Mechanismus der Wasserdampfkondensation ist beim Venturiabscheider vorhanden. Im Diffusor, vor der Venturikehle, steigt die Strömungsgeschwindigkeit mit ab-

nehmendem Strömungsquerschnitt an und bewirkt dadurch eine Temperatur- und Druckabnahme, sofern der Vorgang als adiabat angenommen werden kann. Damit eine Wasserdampfkondensation eintritt, muss die Abkühlung die Verschiebung der Taulinie aufgrund der Druckänderung überwiegen. Im Konfusor, welcher der Venturikehle folgt, verdampft das Kondensat aber grösstenteils wieder, was durch Eindüsen von Kaltwasser verhindert werden kann.

Beim dritten und letzten Mechanismus handelt es sich um die Kühlung an einer kalten Oberfläche oder um die Einspritzkühlung. Dabei bewirkt die kalte Stelle (Oberfläche, Wassertropfen) ein Auskondensieren von Wasserdampf an ihrer Oberfläche. Dieser Mechanismus findet meistens bei sehr heissen und feuchten Gasen seine Anwendung.

Die beschriebenen drei Mechanismen rufen ein Auskondensieren von Wasserdampf hervor, wodurch folgende Effekte auf das abzuschneidende Aerosol erzielt werden:

a) Die Schleppdiffusion: In der Dampf-Licht-Umgebung einer kalten Oberfläche, an welcher Wasserdampf auskondensiert, entsteht ein Dampfkonzentrationsgefälle. Dampfmoleküle, die aufgrund dieses Gradienten zur Oberfläche hin diffundieren, schleppen dabei Aerosolteilchen mit und erzeugen einen entgegengesetzten konvektiven Verdrängungsstrom der Luft. Daneben bewirkt der Temperaturgradient, der zwischen der Oberfläche und den Aerosolteilchen herrscht, eine Thermodiffusion der grösseren Aerosolteilchen gegen die kalte Oberfläche. Bisher durchgeführte Messungen zeigen allerdings, dass die Schleppdiffusion keinen wesentlichen Einfluss auf die Staubabscheidung hat [2-4].

b) Die turbulente Agglomeration: Die in einem Aerosol-Luft-Strom vorhandenen Turbulenzen begünstigen das Agglomerieren von Aerosolteilchen. Dabei wird die Agglomerierfähigkeit durch Wasserdampf, der an den Aerosolteilchen auskondensiert, noch erhöht, da bei den oberflächenbenetzten Teilchen das Wasser zusätzliche Bindungskräfte hervorruft.

c) Das Teilchenwachstum durch Kondensatanlagerung: Der an der Oberfläche von Aerosolpartikeln auskondensierende Wasserdampf vergrössert diese, wodurch sie besser abscheidbar sind. Dabei spielen die Teilchengrösse und die Natur der Teilchen (Benetzbarkeit, Form) eine wesentliche Rolle. Aus der Druckformel von Thomson-Gibbs geht hervor, dass der Wasserdampf vor allem an den grösseren Teilchen auskondensieren muss. Die Formel von Thomson-Gibbs gibt den Dampfdruck an der Tropfenoberfläche in Funktion des Tropfenradius r_{Tr} an (Gl. 1):

$$p_{Tr} = p_{\infty} \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \sigma_{Tr} \cdot M_{Tr}}{R_r \cdot T \cdot \rho_{Tr} \cdot r_{Tr}}\right) \quad (1)$$

Die Messungen von Prakash [6] bestätigen diese Aussage bei nicht hygroskopischen Partikeln. Dagegen zei-

gen hygroskopische oder wasserlösliche Teilchen ein konformes Wachstumsverhalten aller Tropfenfraktionen. Yoshida [5] wiederum zeigt theoretisch, dass die Wachstumsgeschwindigkeit unter Dampfkondensation bei kleineren Tropfen grösser sein muss als bei grösseren Tropfen. Die dabei verwendete Gleichung für die Wachstumsgeschwindigkeit in Funktion des Tropfenradius r_{Tr} lautet (Gl. 2):

$$\frac{dr_{Tr}}{dt} = \frac{D \cdot M_{Tr}}{R_r \cdot T \cdot \rho_{Tr} \cdot r_{Tr}} (p_{\infty} - p_{Tr}) \left(1 + \frac{p_{Tr} + p_{\infty}}{2 \cdot p_0}\right) \quad (2)$$

Auch Yoshida kann diese Behauptung experimentell nicht nachweisen. Er misst ebenfalls ein konformes Wachstumsverhalten aller Fraktionen, wobei er Versuche mit hydrophoben wie auch mit hydrophilen Aerosolen durchführt.

3. Die Versuchsanlage

Das Ziel der durchgeführten Arbeit bestand darin, die Abscheidung von Feinstäuben in einem Venturiabscheider unter dem Einfluss von kondensierendem Wasserdampf zu untersuchen. Der benützte Venturiabscheider war ein halbertechnischer Apparat mit einem mittleren Gasdurchsatz von 500 m³/h. Der Aufbau der Versuchsanlage ist aus Abb. 1 ersichtlich.

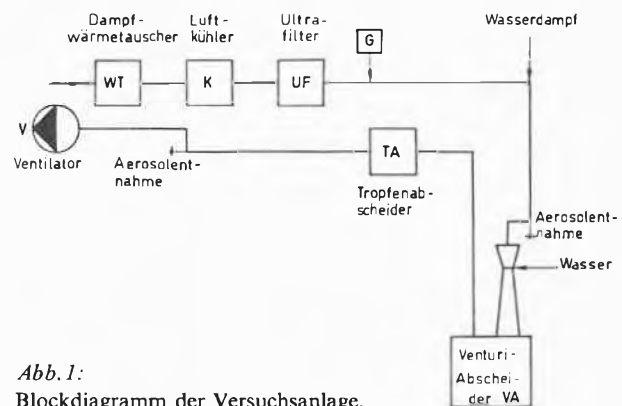


Abb. 1:
Blockdiagramm der Versuchsanlage.

Die Luft durchströmte den Dampf-Wärmetauscher WT, den Luftkühler K und den Ultrafilter UF, damit nun der vorkonditionierten und gereinigten Luft das Aerosol beigegeben werden konnte, welches ein im Eigenbau hergestellter Zerstäubungsgenerator G lieferte. Zerstäubt wurde der Kunststoffweichmacher DOP (Di-2-Aethylhexylphthalat). Nach der Dampfzugabe erfolgte die erste isokinetische Aerosolprobenentnahme (Einbau einer BC-Öffnung mit nachgeschaltetem Konfusor), worauf das beladene Gas den Venturiabscheider VA mit einem nachgeschalteten Tropfenabscheider TA, welchem die zweite Aerosolmessstelle folgte, durchströmte.

Der Aerosolgenerator lieferte ein Aerosol, das einen mittleren Durchmesser von $\bar{d}_p = 0,84 \mu\text{m}$ (Standardabweichung $\sigma = \pm 0,53 \mu\text{m}$) aufwies, und die Korngrössenanalyse zeigte, dass 75 Gew.% des erzeugten Aerosols einen Teilchendurchmesser hatte, der unter

Tabelle 1: Betriebsdaten für den Venturi bei Dampfzugabe ($V_{G\alpha}^*$ bei 22°C)

T_6 [°C]	$V_{G\alpha}^*$ [m³/h]	m_L^* [kg/h]	m_{WD}^* [kg/h]	L [l/m³]	$V_{G,K}^*$ [m³/h]	$m_{WD,kon}^*$ [kg/h]	$w_{G,K}$ [m/s]	L_K [l/m³]
68	500	564	160	3,0	799	22,1	65,1	1,87
65	500	564	129	3,0	756	13,8	61,4	1,98
60	500	564	95	3,0	702	10,3	56,9	2,14
58	500	564	83	3,0	680	7,5	55,1	2,21
57	500	564	77	3,0	673	6,3	54,7	2,23
56	500	564	74	3,0	662	6,9	53,8	2,26
55	500	564	70	3,0	652	6,6	53,1	2,30
50	500	564	52	3,0	619	7,2	50,1	2,43
40	500	564	24	3,0	569	2,7	46,2	2,64
30	500	564	8	3,0	529	1,1	43,0	2,83
22	500	564	–	3,0	504	–	40,9	2,98
70	500	564	178	1,5	832	19,1	67,5	0,90
60	500	564	96	1,5	698	10,4	56,7	1,07
50	500	564	53	1,5	619	6,7	50,3	1,21
50	425	482	43	3,0	526	3,4	42,7	2,43
50	575	656	61	3,0	713	8,3	57,9	2,42

einem Mikrometer lag. Gemessen wurde das Aerosol mit einem graphimetrischen (Kasaden-Impaktor) und mit einem lichtoptischen (Sigrist-Photometer) Messgerät. Die Anfangsbeladung in der Anlage lag bei 210 mg/Nm³ (Andersen-Sampler) resp. 180 mg/Nm³ (Sigrist-Photometer) Staub pro Luftvolumen. Es wurden Abscheideversuche mit und ohne Dampfzugabe durchgeführt.

Tabelle 2: Betriebsdaten für den Venturi ohne Dampfzugabe ($V_{G\alpha}^*$ bei 22°C)

T_6 [°C]	$V_{G\alpha}^*$ [m³/h]	m_L^* [kg/h]	L [l/m³]	$V_{G,K}^*$ [m³/h]	$w_{G,K}$ [m/s]	L_K [l/m³]
68	500	564	3,0	580	46,8	2,60
65	500	564	3,0	572	46,5	2,62
60	500	564	3,0	565	45,9	2,65
58	500	564	3,0	562	45,6	2,67
55	500	564	3,0	558	45,3	2,69
50	500	564	3,0	547	44,4	2,74
40	500	564	3,0	529	43,0	2,83
30	500	564	3,0	515	41,8	2,91
69	500	564	1,5	580	47,1	1,29
60	500	564	1,5	565	45,9	1,33
50	500	564	1,5	547	44,4	1,37
50	425	482	3,0	464	37,7	2,75
50	575	656	3,0	634	51,4	2,72

4. Versuchsergebnisse

Die Abscheidegradmessungen zeigen, dass der Abscheidegrad eines Venturiabscheiders durch Dampfzugabe grundsätzlich verbessert werden kann (Abb. 2). Dabei ist der Abscheidegrad η folgendermassen definiert ($C_{N\alpha}$: Staubbeladung bei normierten Luftbedingungen):

$$\eta = \frac{C_{N\alpha} - C_{N\omega}}{C_{N\alpha}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Die Darstellung des Abscheidegrades in Funktion der Temperatur T_6 am Venturieintritt (Abb. 2) sagt aber nichts über den spezifischen Arbeitsaufwand P aus,

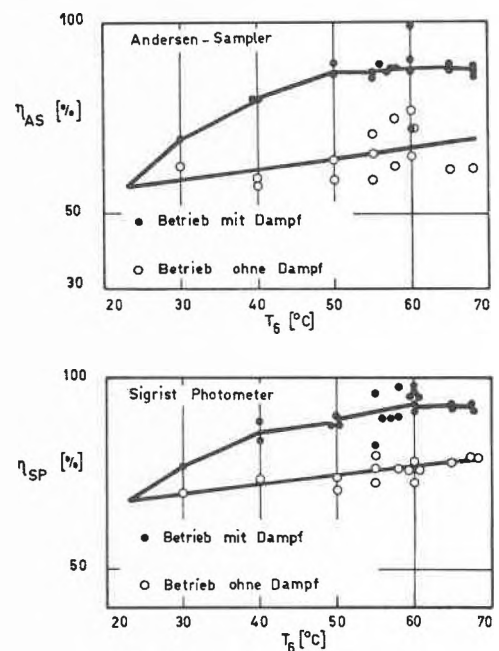


Abb. 2: Gesamtabscheidegrad η (η_{AS} aus den Messungen mit dem Andersen-Sampler; η_{SP} aus den Messungen mit dem Sigrist-Photometer) bei Betrieb der Anlage mit und ohne Dampf, in Funktion der Mischtemperatur T_6 .

der notwendig ist, um den entsprechenden Abscheidegrad zu erreichen. Die Definition des spezifischen Arbeitsaufwandes P lautet:

$$P = \frac{V_G^* (\Delta p_{VA} + \Delta p_{TA}) + V_W^* \cdot \Delta p_W}{V_G^*} \quad [N/m^3]$$

Abb. 3 zeigt den Abscheidegrad in Funktion von P . Auch hier ist eine Verbesserung des Abscheidegrades durch Dampfzugabe bei gleichbleibendem spezifischem Arbeitsaufwand zu beobachten. Stellt man den Abscheidegrad bei Dampfzugabe in Funktion der auskondensierenden Dampfmenge dar, ergibt sich ein linearer Zusammenhang (Abb. 4). Dabei handelt es sich bei der auskondensierenden Dampfmenge $m_{WD,kon}^*$

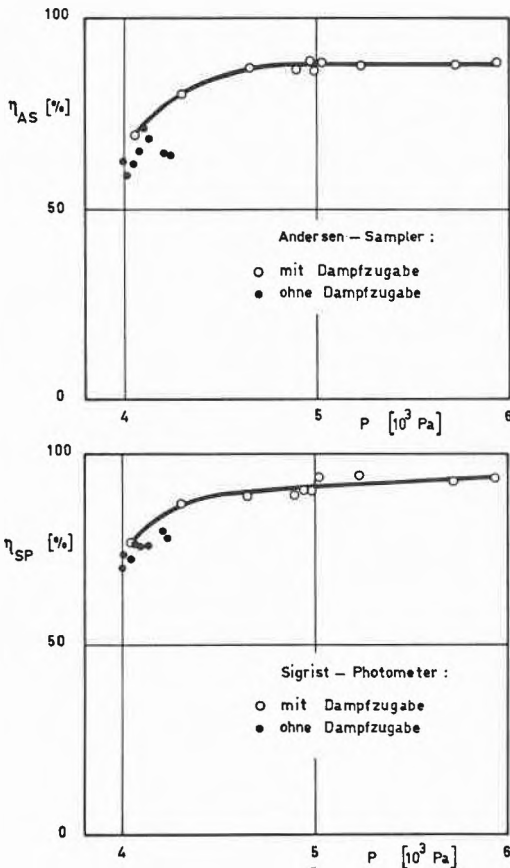


Abb. 3: Gesamtabscheidegrad η_{AS} und η_{SP} in Funktion des spezifischen Arbeitsaufwandes P .

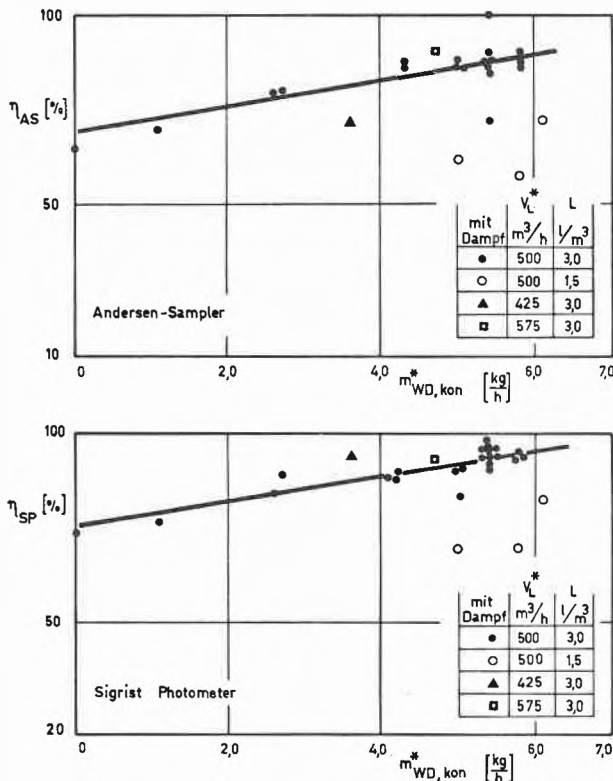


Abb. 4: Abscheidegrad bei Dampfbetrieb in Funktion der auskondensierten Dampfmenge $m_{WD, kon}^*$.

um denjenigen Dampf, der theoretisch auskondensieren muss, um eine gewünschte Temperatur T_6 vor dem Venturieintritt zu erreichen. In Abb. 5 wurden die Fraktionsabscheidegrade (ermittelt aus den Beladungsmessungen mit dem Andersen-Sampler) als Funktion der auskondensierenden Dampfmenge $m_{WD, kon}^*$ aufgezeichnet. Dabei weisen die einzelnen Aerosolfraktionen darauf hin, dass der Wasserdampf vermehrt an den kleineren Partikeln auskondensiert, denn die Zunahme des Fraktionsabscheidegrades mit steigender Dampfmenge, welche an den Aerosolpartikeln auskondensiert, ist bei der kleinsten Fraktion am grössten.

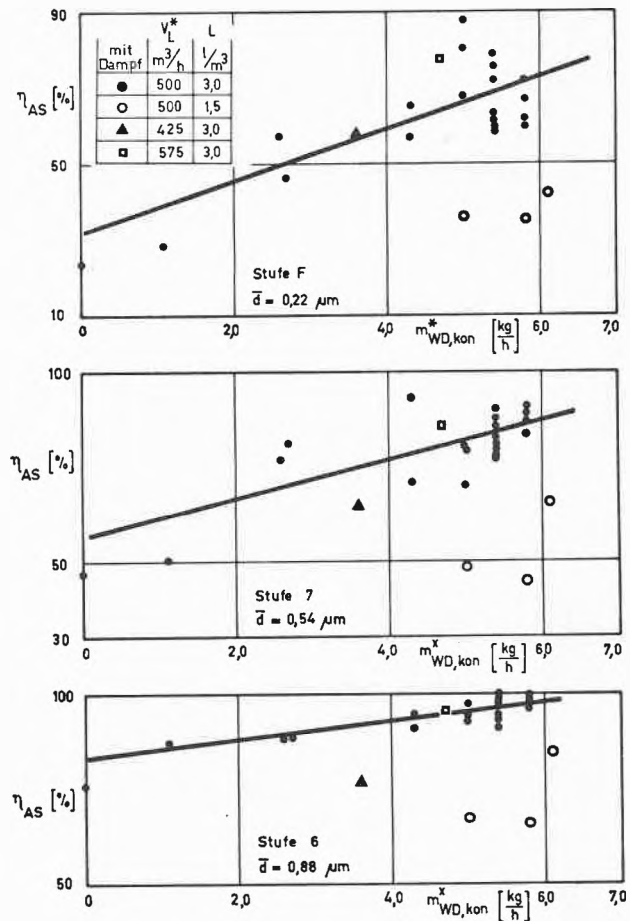


Abb. 5: Fraktionsabscheidegrad bei Dampfbetrieb in Funktion der auskondensierenden Dampfmenge $m_{WD, kon}^*$ für die Stufen F bis 6.

Die Abb. 4 und 5 deuten darauf hin, dass der Abscheidegrad des Venturiabscheiders nur durch diejenige Dampfmenge $m_{WD, kon}^*$ beeinflusst wird, die unmittelbar nach der Dampfzugabe an den Aerosolpartikeln auskondensiert.

5. Ergebnisse aus der Literatur

Bis jetzt veröffentlichte Messungen über die Abscheidegradverbesserung bei Nasswäschern durch Wasserdampfkondensation wurden praktisch alle in Ver-

suchsanlagen mit Labormasstab durchgeführt. Dabei untersuchte man mehrheitlich Waschtürme [3, 7] oder Rohrscrubber [4, 6] bezüglich Abscheidegradverbesserung, oder aber es wurden Versuche durchgeführt, welche Auskunft über die Grundlagen der Kondensationsvorgänge geben sollten [2, 5].

Einzig in einem Artikel von Litvinov [8] findet man Angaben über einen Venturiabscheider, der einem Schaumscrubber vorgeschaltet war, um Kohlestaub zu agglomerieren. Gelangte das Gas mit der Taupunkttemperatur in den Venturi, wurde die Endbelastung nach dem Schaumscrubber minimal. Litvinov führte dieses Ergebnis auf eine maximale Agglomeration des Staubes, durch die Kondensatschicht an den Staubteilchen hervorgerufen, zurück.

Die Untersuchungen an Waschtürmen ergeben ebenfalls Abscheidegradverbesserungen unter der Einwirkung von kondensierendem Wasserdampf. Lohs [7] zeigt in seiner Dissertation, dass der Abscheidegrad eines Waschturmes sowohl bei hydrophilen (Natriumsulfat) wie bei hydrophoben (Polystyrol) Teilchen eine Funktion der effektiv auskondensierenden (an den Staubteilchen wie auch an den Wänden des Waschturmes) Dampfmenge ist. Dabei gibt er nur Fraktionsabscheidegrade an.

Calvert [3] fasst in seiner Arbeit die Resultate verschiedener Autoren zusammen. Er stellt den Staubdurchdringungsgrad in Funktion des Verhältnisses von effektiv auskondensierender Dampfmenge $m_{WD, kond, eff}^*$ zum Luftmassenstrom m_L^* dar. In dieser Zusammenstellung werden auch die Messergebnisse von Lancaster [4] und Prakash [6] berücksichtigt. Ebenfalls von Litvinov [8] sind Resultate aufgeführt.

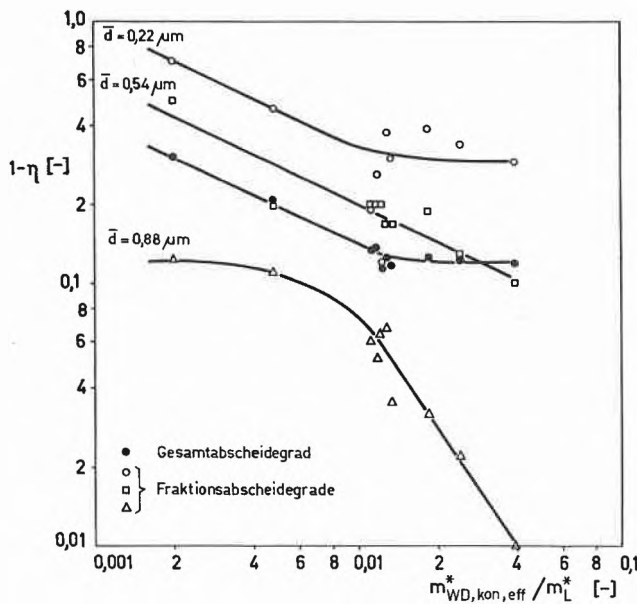


Abb. 6: Durchdringungsgrade ($1-\eta$) in Funktion der effektiv auskondensierenden Dampfmenge $m_{WD, kond, eff}^*$ (gravimetrisches Messgerät).

Einige Messungen zeigen in dieser Darstellungsart einen linearen Zusammenhang, andere weichen stark davon ab. Alle bei Calvert [3] aufgeführten Messergebnisse weisen aber darauf hin, dass der Staubdurchdringungsgrad ($1-\eta$) mit zunehmender auskondensierender Dampfmenge pro Luftmasse sinkt.

Die von Calvert verglichenen Messungen basieren auf gravimetrischen Messgeräten. Eine Darstellung der eigenen gravimetrisch ermittelten Staubdurchdringungsgrade zeigt Abb. 6. Sie weist darauf hin, dass die kleinste Fraktion mit einem mittleren Partikeldurchmesser $\bar{d}_p = 0,22 \mu m$ den Verlauf des Gesamtabscheidegrades bestimmt. Den oben erwähnten Zusammenhang zwischen Staubdurchdringungsgrad und auskondensierender Dampfmenge kann man auch hier feststellen. Dabei sinkt der fraktionelle Durchdringungsgrad mit zunehmender Dampfkondensatmenge bei den grossen Partikeln stärker ab.

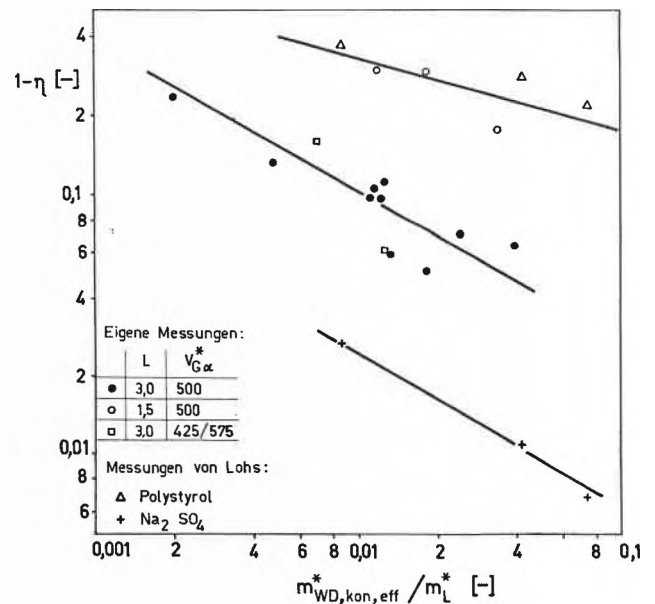


Abb. 7: Durchdringungsgrad ($1-\eta$) in Funktion der effektiv auskondensierenden Dampfmenge $m_{WD, kond, eff}^*$ (optische Messgeräte).

In Abb. 7 sind die Messresultate von Lohs (umgerechnet auf Gesamtabscheidegrade), die mit einem optischen Staubmessgerät ermittelt wurden, mit den eigenen optisch ermittelten Resultaten zusammen aufgezeichnet. Die optische Messmethode deutet auch einen linearen Zusammenhang zwischen Durchdringungsgrad und auskondensierender Dampfmenge an. Dabei stimmen die Messungen von Lohs (durchgeführt mit einem hydrophoben Aerosol) mit den eigenen Messungen (durchgeführt bei einer Wasserbelastung $L = 1,5 l/m^3$ und mit einem hydrophoben Aerosol) gut überein.

Die Verfasser danken der Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsarbeit (Projekt Nr. 837).

Symbolverzeichnis

C_N	Staubbelastung bei Normalbedingungen (760 Torr, 15 °C)	[mg/N m ³]
d_p	Partikeldurchmesser	[μm]
D	Diffusionskoeffizient des Dampfes	[m ² /s]
L	Wasser-Luft-Verhältnis	[1/m ³]
m^*	Massenstrom	[kg/h]
M	molare Masse	[kg/kmol]
p_0	Totaldruck	[N/m ²]
p_{Tr}	Dampfdruck an der Tropfenoberfläche	[N/m ²]
p_{∞}	Dampfdruck an einer ebenen Oberfläche	[N/m ²]
Δp	Druckabfall	[N/m ²]
P	spezifischer Arbeitsaufwand	[N/m ²]
R_r	universelle Gaskonstante	[J/kgmol · K]
r	Radius	[m]
T_0	Lufttemperatur am Venturieintritt	[°C]
T	Temperatur	[K]
t	Zeit	[s]
V^*	Volumenstrom	[m ³ /h]
w	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
η	Abscheidegrad	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ_{Tr}	Oberflächenspannung des Tropfens	[N/m]

Indices

AS	Andersen-Sampler
eff	effektiv
G	Gas
K	Kehle
kon	kondensierbar
L	Luft
SP	Stgrist-Photometer

TA	Tropfenabscheider
Tr	Tropfen
VA	Venturiabscheider
W	Wasser
WD	Wasserdampf
α	Anfang, Eintritt
ω	Ende, Austritt

Literaturverzeichnis

- 1 *W. Brocke*: Immissionssituation aus der Sicht der Emmission. Staub-Reinhalt. Luft 34 (1974) 9, 329/332.
- 2 *R.J. Davies* und *J. Truitt*: Using condensing steam for air cleaning. Inst. and control Systems 45 (1972) 11, 68/70.
- 3 *S. Calvert* und *N. C. Jhaveri*: Flux force/condensation scrubbing. J. of the air poll. contr. assoc. 24 (1974) 10, 946/51.
- 4 *B. Lancaster* und *W. Strauss*: A study of steam injection into wet scrubbers. Ind. Eng. chem. Fundam. 10 (1971) 3, 362/369.
- 5 *T. Yoshida*, *Y. Konsaka* und *K. Okuyama*: Growth of particles by condensation. I & EC Fundam. 15 (1976) 1, 37/41.
- 6 *C. B. Prakash* und *F. E. Murray*: Particle conditioning by steam condensation. AIChE Sympos. Series 147 (1975) Vol. 71, 81/88.
- 7 *W. Lohs*: Über das Herstellen von Aerosolen und die Abscheidung von Feinstäuben in Sprühwäschern. Staub 29 (1969) 2, 78/82; Diss. ETHZ Nr. 3782 (1965).
- 8 *A. T. Litvinov*: Influence of condensation on the effectiveness of capture of fine particles during cleaning of gases by the wet method. J. appl. Chem. USSR 40 (1967) 2, 335/342.
- 9 *M. Lemann*: Einfluss von Kondensationsvorgängen in mit Wasserdampf gesättigten Staub-Luft-Gemischen auf die Staubabscheidung in einem Venturiwäscher. Diss. ETHZ (in Vorbereitung).