

Deckenverschmutzung durch Luftdurchlässe – experimentelle und numerische Untersuchungen, Ursachen und Vermeidung

Heiko Timmer

1. Einführung

Die aufbereitete Zuluft aus raumlufttechnischen Anlagen kann auf vielfältige Weise den Räumen zugeführt werden. Eine der genutzten Möglichkeiten besteht in der Zufuhr über Linearluftdurchlässe und Dralldurchlässe. Beide Durchlasssysteme leiden unter einer Verschmutzung der Bauteile selbst und der Decke im Nahbereich der Luftdurchlässe. Im Laufe des Betriebs bilden sich Schmutzfahnen (*Bild 1.1*), die dem Nutzer des Raums suggerieren, die zugeführte Luft sei verunreinigt. Dem Problem kann bisher nur mit regelmäßiger und kostspieliger Säuberung oder Renovierung des Durchlasses und der Decke begegnet werden. Die vorliegende Untersuchung identifiziert die Ursachen der Deckenverschmutzung am Beispiel von Linearluftdurchlässen experimentell sowie mit Hilfe der CFD-Simulation und zeigt Lösungsvorschläge mit Hilfe eines neu entwickelten, photographischen Messverfahrens auf.



Bild 1.1. Verschmutzungen an einem Linearluftdurchlass. Foto gegen die Decke.

2. Ausgangssituation

Die Zuluft, welche einem Raum zur Klimatisierung zugeführt wird, lässt sich heute hinreichend filtern, so dass sie kaum Verunreinigungen enthält. Trotzdem verschmutzen die Decken, so dass sich offensichtlich Partikel abscheiden, die aus der Raumluft selbst stammen [6]. In der Literatur finden sich experimentelle Untersuchungen, welche die Verschmutzung durch Dispersion eines Farbnebels simulieren [7]. Die Nachteile dieses Verfahrens liegen in der polydispersen Partikelgrößenverteilung, der Störung der Raumluftströmung durch den Impuls des Sprüh-

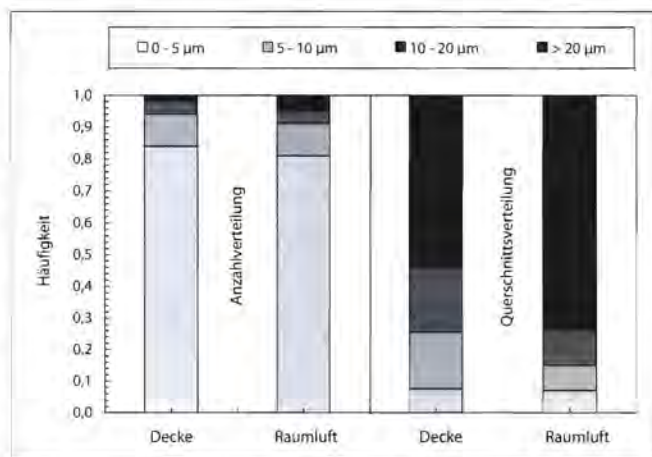


Bild 2.1. Anzahl- und Querschnittsverteilung realer Partikel.

strahls und der starken Verschmutzung des Versuchsraums. Es lassen sich jedoch die wesentlichen Einflüsse auf das Verschmutzungsverhalten relativ einfach untersuchen. Die Untersuchung realer Abscheidungen an Deckenluftdurchlässen mit Stempelproben zeigt die in *Bild 2.1* dargestellte Anzahl- und Querschnittsflächenverteilung [26].

Die großen Partikel sind im Wesentlichen schuppenförmig und bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff, was auf einen organischen Ursprung hindeutet. Sie lassen sich beschreiben über Ihren aerodynamischen Durchmesser. Es ist sinnvoll, das Hauptaugenmerk der Untersuchung auf einen Partikelgrößenbereich zwischen 5...20 µm zu beschränken. Deutlich kleinere Partikel tragen nicht zur sichtbaren Verschmutzung bei und folgen fast trägheitsfrei der Strömung. Größere Partikel hingegen besitzen eine zu hohe Sinkgeschwindigkeit, um von einer Raumluftströmung getragen oder sogar in den Deckenbereich beschleunigt zu werden [26]. Raumluftströmungen und Partikelbewegungen lassen sich grundsätzlich auch mit der numerischen Strömungssimulation abbilden [25].

3. Experimentelle Untersuchungen

In einem Versuchsraum wurde ein Linearluftdurchlass entsprechend *Bild 3.1* unter verschiedenen Randbedingungen auf sein Verschmutzungsverhalten untersucht.

Jeder Durchlass enthält acht zylinderförmige, jeweils 15 cm lange Segmente mit Leiteinrichtungen, die sich um

ihre Mittelachse in zwei Rastpositionen drehen lassen, um zwei verschiedene Einblaswinkel gegen die Decke einstellen zu können. Die einzelnen Segmente sind durch ca. 6 mm breite Stege voneinander getrennt.

3.1 Raumluftströmung

Die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen im Durchlasseintrittsbereich wurden mit der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) [2] vermessen. In der Hauptströmung werden nach Bild 3.2 Geschwindigkeiten von knapp über 4 m/s erreicht. Wie der Vergleich mit Bild 3.3 zeigt, verläuft die Strömung fast parallel zur Decke.

Die hohen Turbulenzgrade (Bild 3.4) unterhalb des Strahls entstehen durch die Ablösung großskaliger Wirbel. Diese können in Simulationsrechnungen mit *Reynolds-Averaged-Navier-Stokes* (RANS) Turbulenzmodellen nicht abgebildet werden, wohl aber mit der Large Eddy Simulation.

3.2 Partikeldeposition

Monodisperse Äquivalentpartikel mit aerodynamischen Durchmessern von etwa 5, 9 und 12 μm wurden aus Fluoreszin-Natrium über einen Partikelgenerator im Raum dispergiert. Hierzu wird das fluoreszierte Salz in Wasser gelöst, mit Ultraschall in einem Zuluftstrom zerstäubt und abgetrocknet. Das erzeugte Aerosol ist in Bezug auf die Massenverteilung hinreichend monodispers. Ab einer gewissen Menge wird das deponierte Fluoreszin-Natrium bei Bestrahlung mit einem Blitzlicht sichtbar, so dass die Verschmutzungsbilder fotografiert werden können, um einen qualitativen Eindruck der Ablagerungsmuster zu gewinnen. Die Verschmutzungen entstehen primär hinter den Stegen des Luftdurchlasses. Insbesondere die breiten Stege zwischen den einstellbaren Luftleitwalzen erzeugen markante Schmutzfahnen.

Zur Bewertung der numerischen Simulation werden neben den qualitativen Bildern auch quantitative Aussagen über die Abscheidung monodisperser Partikel benötigt. Zu diesem Zweck sind im Nahbereich des Linearluftdurchlasses Probeträger angebracht worden, auf denen sich die Partikel niederschlagen können. Anhand der Fluoreszenz kann die auf dem jeweiligen Probeträger deponierte Partikelmasse nach Ablösung mit einer Flüssigkeit ermittelt werden. Es ergeben sich die abgeschiedenen Partikelmassen in Abhängigkeit des Ortes,

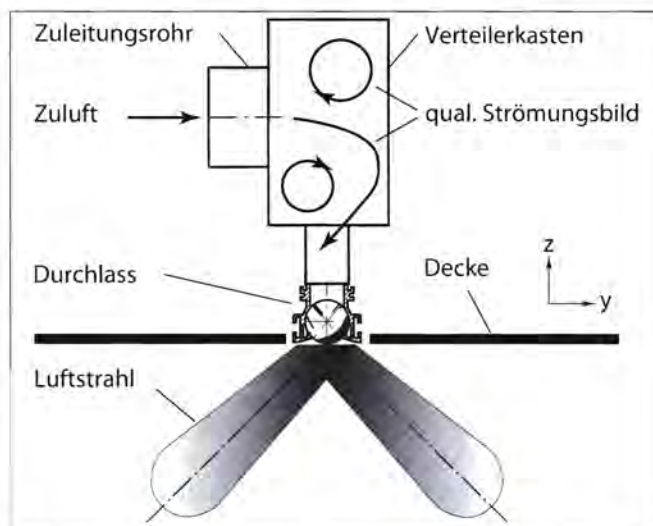


Bild 3.1. Funktionsprinzip der verwendeten Lineardurchlässe.

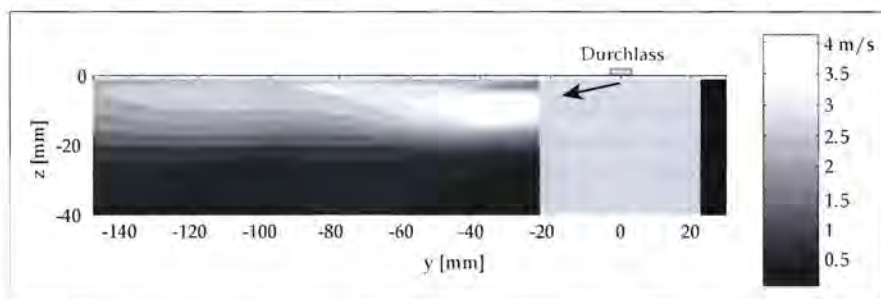


Bild 3.2. Betrag der Geschwindigkeit in der Hauptströmung, Volumenstrom = 100 m³/(mh), x = -47 mm.

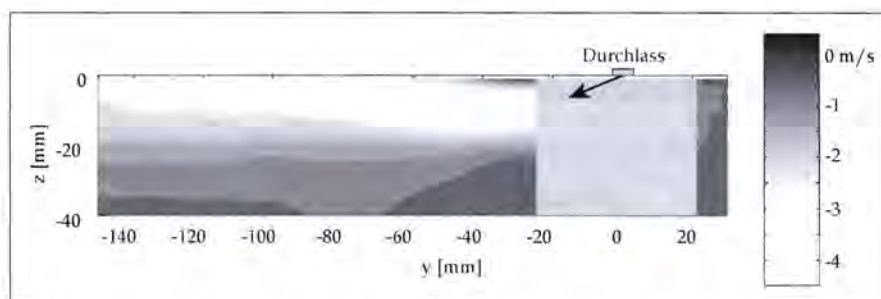


Bild 3.3. Geschwindigkeit entlang der Decke (v), Volumenstrom = 100 m³/(mh), x = -47 mm.

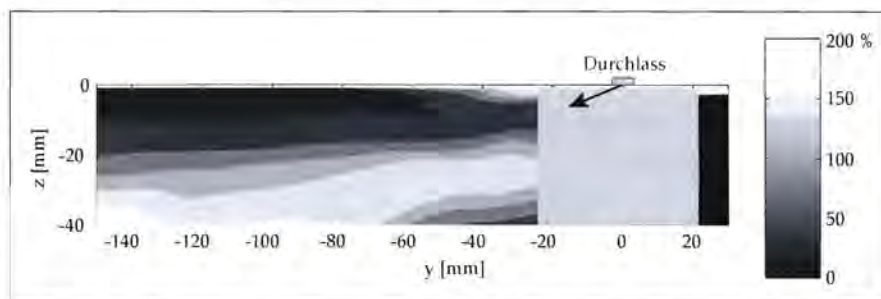


Bild 3.4. Turbulenzgrad in der Hauptströmung, Volumenstrom 100 m³/(mh), x = -47 mm.

wobei die Ortsauflösung der Größe der Probeträger entspricht. In der Literatur finden sich ähnliche Nachweisverfahren zum Beispiel mit Ammonium-Fluoreszin, wo ebenfalls eine Nachweisgrenze von 1 pg/ml erreicht wird [22].



Bild 3.5. Verschmutzungsbild Basisfall, steile Einblasung, 9 µm-Partikel, 6 g Aerosol.

Bild 3.6 gibt die druckseitigen Messungen wieder. Deutlich erkennt man die Maxima der Abscheidungen im Bereich hinter dem Steg ($x = 0$ mm) und bei einigen Messungen im Bereich hinter den mittleren Verstreubungen ($x = \pm 38$ mm und $x = \pm 75$ mm). Das Maximum ist bei der mittleren Partikelgröße am stärksten ausgeprägt, während sich über die gesamte Auslasslänge am meisten die größten Partikel abscheiden.

In der Richtung vom Durchlass weggehend zeigt sich, dass die Schmutzfahne der 9 µm Partikel weiter in den Raum hineinreicht als die der 5 µm Partikel (Bild 3.7, links). Die größeren Partikel besitzen also eine höhere Depositionswahrscheinlichkeit als die kleineren.

Die saugseitigen Abscheidungen liegen bei allen Versuchen etwa um Faktor 100–1000 unter den druckseitigen.

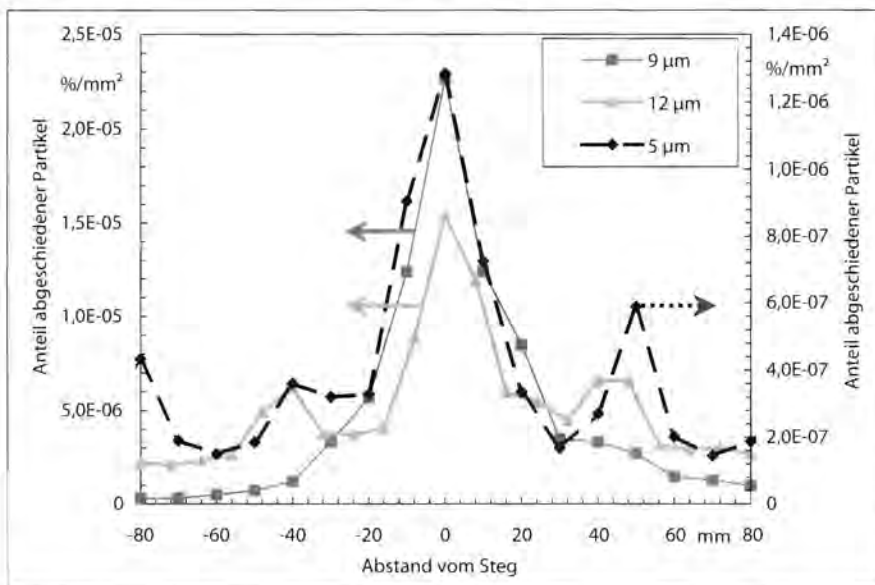


Bild 3.6. Druckseitige Abscheidungen der Experimente 1, 2, A1; Volumenstrom 100 m³/mh, steile Einblasung.

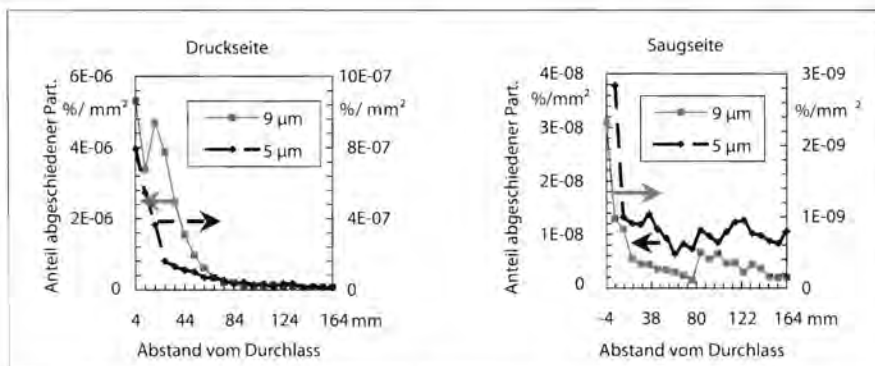


Bild 3.7. Experimente 9,10: senkrecht zum Durchlass.

4. Theoretische Untersuchungen

4.1 Numerische Simulation

Messungen der Partikelablagerung sind sehr aufwändig und in der Praxis nicht geeignet, um das quantitative Verschmutzungsverhalten von Luftdurchlässen zu analysieren. Die numerische Strömungssimulation kann hier als nützliches Werkzeug dienen, um den Experimentieraufwand zu umgehen oder zumindest zu reduzieren.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist die, dass zunächst die Luftströmung im Deckenbereich und anschließend in einem Post-Processing die Flugbahnen von Partikeln berechnet werden, die sich in dieser Strömung bewegen. Die inkompressible Luftströmung lässt sich dabei durch die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie beschreiben [12].

Diese Gleichungen werden in zeitlich gemittelter Form für ein Gitter aus finiten Volumen, das der Geometrie des Luftdurchlasses und seiner Umgebung angepasst wird, mit dem kommerziellen CFD-Code FLUENT gelöst. Die turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen werden dabei mit Hilfe von Turbulenzmodellen erfasst. Die Energieerhaltungsgleichung wird zur Ermittlung des Thermophoreseffekts gelöst, die Untersuchung aller anderen

Einflüsse kann unter der Annahme isothermer Bedingungen erfolgen.

Ist eine hinreichend genaue Lösung für die Luftströmung gefunden, kann die Partikelflugbahn aus der Integration der am Partikel angreifenden Kräfte nach *Lagrange* bestimmt werden. Dabei wird unterstellt, dass die Partikelbeladung in der Raumluft so gering ist, dass die Partikel die Luftbewegung nicht beeinflussen und Kollisionen der Partikel untereinander unerheblich sind.

Die Bewegung von Partikeln wird durch die Turbulenz beeinflusst. Man spricht in diesem Zusammenhang von Turbophorese bzw. turbophoretischen Kräften auf das Partikel. Die in diesem Abschnitt präsentierten Ergebnisse wurden mit dem *Reynolds-Stress-Modell* (RSM) berechnet, das zu den RANS-Modellen gehört und die Turbulenz mittelt, anstatt die Wirbelstrukturen aufzulösen. Anschließend werden auch Ergebnisse mit der aufwendigeren *Large-Eddy-Simulation* (LES) vorgestellt. Diese hingegen berechnet die großskalige Turbulenz direkt, weshalb sie über die Fluidgeschwindigkeit in die Bewegungsgleichung des Partikels eingeht. Die Subgridturbulenz ist um ein Vielfaches energieärmer und daher für die Partikelbewegung unerheblich [5].

4.2 Abbildung der Strömung

Die folgenden Abbildungen zeigen die von FLUENT berechneten Strömungsgrößen in den Schnittebenen, die auch mit der LDA vermessen wurden. Der in den Abbildungen der LDA-Messungen dargestellte Ausschnitt ist in den folgenden Abbildungen durch die hellgrauen Linien abgegrenzt. Das RSM-Modell berechnet die Turbulenz.

Die mittleren Geschwindigkeiten werden in der Hauptströmung gut wiedergegeben. Die Ausdehnung des Rückströmgebiets und die Anlegelänge des Strahls stimmen ebenfalls gut mit den LDA-Messungen überein.



Bild 4.1. Berechneter Betrag der Geschwindigkeit in der Hauptströmung (LDA in Bild 3.2).

4.3 Bewertung der Simulationsrechnungen bei verschiedenen Einflussparametern auf das Verschmutzungsverhalten

Nach Berechnung der Strömung werden die Partikel im Strömungsfeld ausgesetzt. Die folgende Abbildung zeigt ein berechnetes Verschmutzungsbild bei verschiedenen Partikelgrößen für den Basisfall der einseitigen, steilen Einblasung mit $100 \text{ m}^3/\text{mh}$. Der Steg liegt bei 0 mm , die Hauptströmungsrichtung ist nach links. Jeder schwarze Punkt markiert den Auftreffpunkt eines Partikels. Wie bei Farbsprühversuchen ist daher nicht erkennbar, wie viele Partikel übereinander liegen, beispielsweise im Bereich hinter dem Steg. Es stimmt qualitativ gut mit dem fotografierten Schmutzbild überein.

Zum quantitativen Vergleich mit den Experimenten müssen die Koordinaten der Auftreffpunkte diskretisiert werden. Auf der Druckseite liegen die Abscheidewahrscheinlichkeiten gemäß Bild 4.5 über denen der Experimente. Dies resultiert zum einen aus der Annahme, dass jedes auftreffende Partikel auch haftet, und zum anderen an Unzulänglichkeiten der numerischen Modellierung, insbesondere des RSM-Turbulenzmodells. Allerdings scheiden sich im Gegensatz zu den Fluoreszenzmessungen leicht mehr $12 \mu\text{m}$ als $9 \mu\text{m}$ Partikel hinter dem Steg ab. Die Abweichungen liegen aber im Rahmen der Ungenauigkeiten sowohl des Fluoreszenzverfahrens als auch der numerischen Simulation.

Verlässt man das enge Spektrum der experimentell generierbaren Partikelgrößen, so findet man den in Bild 4.6 dargestellten Zusammenhang zwischen Abscheidung und Partikelgröße. Es ergibt sich ein Maximum der Abscheidung, das durch den gegenläufigen Einfluss der mit der Partikelgröße zunehmenden Turbophorese und der Gravitation entsteht.

Es scheiden sich bei kleinerem Luftvolumenstrom und somit niedrigerer Einblasgeschwindigkeit weniger Partikel ab. Gleiches gilt bei der untersuchten Durchlassgeometrie bei flacherem Strahlwinkel und wechselseitiger Einblasung [24].



Bild 4.2. Berechnete y-Komponente der Geschwindigkeit (LDA in Bild 3.3).



Bild 4.3. Berechneter Turbulenzgrad in der Hauptströmung (LDA in Bild 3.4).

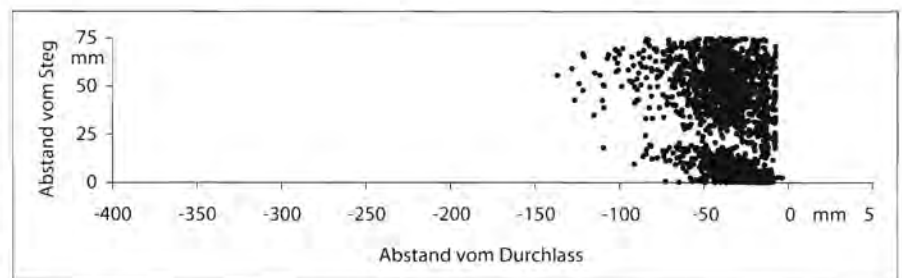


Bild 4.4. Verschmutzungsbild, einseitig, $9 \mu\text{m}$.

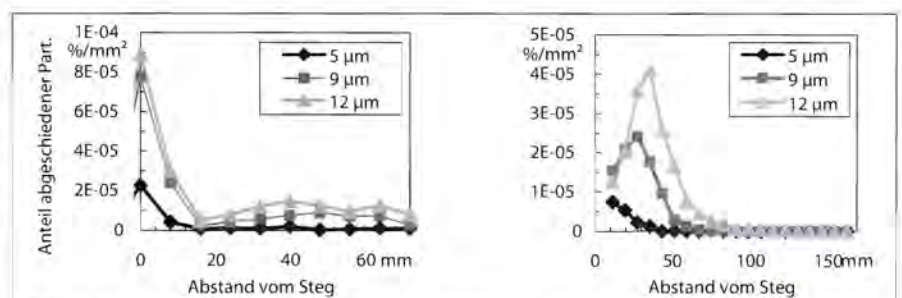


Bild 4.5. Einfluss der Partikelgröße, diskretisiert wie im Experiment in Bild 3.6 und Bild 3.7.

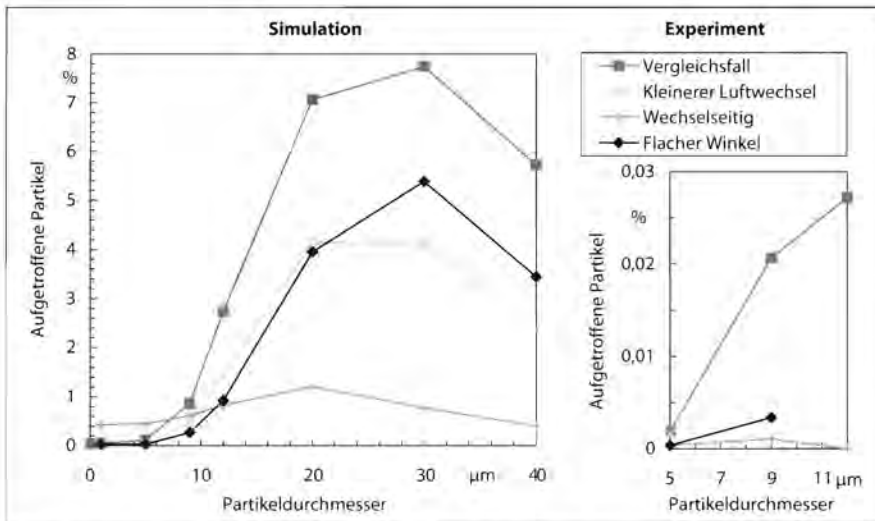


Bild 4.6. Anteil aufgetroffener Partikel in Abhängigkeit der Partikelgröße.

4.4 Interpretation der Depositionsvorgänge

Im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen lassen sich bei der Simulation die Flugbahnen der Partikel und das Strömungsfeld beobachten, was Schlussfolgerungen auf die vorherrschenden Abscheidemechanismen ermöglicht. Für den Basisfall der einseitigen Einblasung zeigt Bild 4.7 in einer Ansicht von unten gegen die Decke die Geschwindigkeitsvektoren in den Symmetrieebenen in der Mitte des Durchlasses (links) und des Steges (rechts). Unterhalb des Luftdurchlasses sind die Flächen einer konstanten, turbulenten kinetischen Energie der für die Partikelabscheidung maßgeblichen wandnormalen Komponente der Schwankungsgeschwindigkeit als Hüllfläche dargestellt. Um die Vorgänge zu erklären, wird der Deckenbereich in drei Gebiete eingeteilt. Der Übergang zwischen den Gebieten, deren Abgrenzung im Folgenden erläutert wird, ist dabei fließend.

Das erste Gebiet umfasst die Schmutzfahne hinter dem Steg. Im Bereich unterhalb des Steges können Partikel durch die Hauptströmung näher an die Decke heran-



Bild 4.7. Turbulenz und Strömung unterhalb des Luftdurchlasses, einseitige Einblasung.

geführt werden als in einiger Entfernung vom Steg, in welcher der eintretende Luftstrahl die Partikel aufgrund der hohen Geschwindigkeit nach unten abdrängt. In Verbindung mit der erhöhten Turbulenz unterhalb des Steges kommt es hier zu den maximalen Abscheideraten. Ähnliches gilt für den zweiten Bereich in einiger Entfernung hinter dem Durchlass. Hier läuft die Strömung nach Abklingen des Rückströmgebiets oberhalb des Luftstrahls ebenfalls auf die Decke zu und kann den Partikeln im Zusammenwirken mit der Turbulenz an den Strahlrändern einen ausreichenden Impuls verleihen, um einen Deckenkontakt herbeizuführen.

Das dritte Abscheidegebiet liegt oberhalb der Rückströmung. Die Partikel erreichen den Wirbel über die Turbulenz unterhalb des in den Raum eintretenden Luftstrahls. Die Beschleunigung ist dabei gerade ausreichend, um ein Partikel durch die Hauptströmung hindurch in das Wirbelgebiet zu transportieren, nicht jedoch bis zur Decke. Die Partikel bewegen sich vor dem Aufprall innerhalb des Wirbels und werden im oberen Bereich des Wirbels, wo sie sich mit der Luft parallel zur Decke in Richtung Durchlass bewegen, durch die dortige Turbulenz abgeschieden. Sie erreichen dabei wandnormale Geschwindigkeitskomponenten in der Größenordnung der wandnormalen turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit in wenigen Metern Entfernung von der Decke.

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten können ohne die Turbulenz keine Partikel bis zur Decke beschleunigen. Ohne zusätzliche, turbulente Beschleunigung im Nahbereich der Decke würden sich also keine Partikel an der Decke abscheiden.

4.5 Thermophorese

Befindet sich ein Partikel in einem Medium, das einen Temperaturgradienten aufweist, wird das Partikel entgegengesetzt zu diesem Gradienten durch die thermophoretische Kraft beschleunigt. Soll die Thermophorese eine Bewegung von Partikeln zur Decke hin bewirken [8], muss die Lufttemperatur im Bereich von Luftdurchlässen zur Decke hin abnehmen.

Dies ist im Sommer der Fall, wenn dem warmen Raum gekühlte Zuluft zugeführt wird. Da die Deckenverschmutzung aber auch im Heizfall zu beobachten ist, kann bereits hieraus gefolgert werden, dass die Thermophorese eine untergeordnete Rolle spielt und höchstens eine gewisse Veränderung der Abscheidung bewirken wird. Die Decke kann im Kühlfall im Bereich des Luftdurchlasses minimal die Zulufttemperatur annehmen, wobei die Wirkung der Thermophorese am höchsten wäre. Um ihren maximalen Einfluss zu bewerten, wird diese Konstellation betrachtet. Liegt nämlich die Temperatur der

Decke über der des Zuluftstrahls, würden die Partikel unmittelbar unter der Decke thermophoretisch abgestoßen („thermophoretic repulsion“) [22]. Dies ist in der Realität wahrscheinlicher, da selbst eine Kühldecke nie bis an einen Luftdurchlass heranreicht. Zur Untersuchung des geschilderten Effekts wird für den Basisfall der einseitigen, steilen Einblasung zusätzlich die Energieerhaltungsgleichung gelöst. Dabei wird die Raumlufttemperatur auf 27°C und die Temperatur von Zuluft und Decke zu 17°C angenommen, die Zuluft strömt also mit der zur Vermeidung von Zugerscheinungen in praxi verwendeten Temperaturdifferenz von 10 K in den Raum ein (Bild 4.8). Die Thermophorese wird nach Talbot als zusätzlicher Kraftterm in der Bewegungsgleichung des Partikels erfasst [21]. Die durch instationäre Temperaturfluktuationen innerhalb der Grenzschicht entstehenden Temperaturgradienten bleiben ebenso wie instationäre Effekte in der isothermen Strömung unberücksichtigt. Es wird im Gegensatz zu [11] davon ausgegangen, dass sich diese zufälligen Effekte im zeitlichen Mittel aufheben.

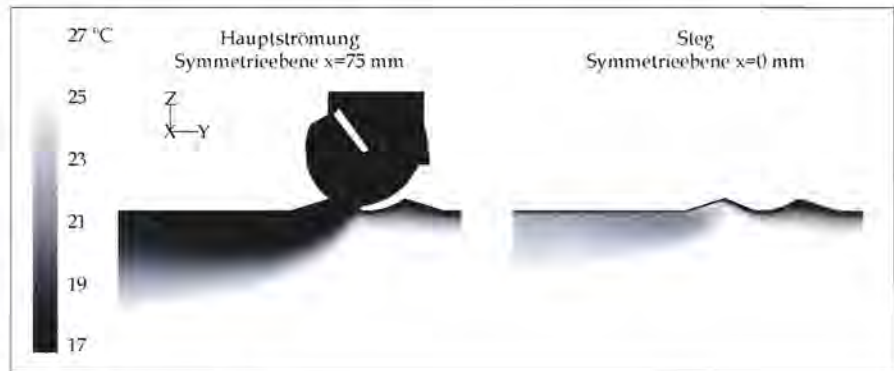


Bild 4.8. Temperaturfelder.

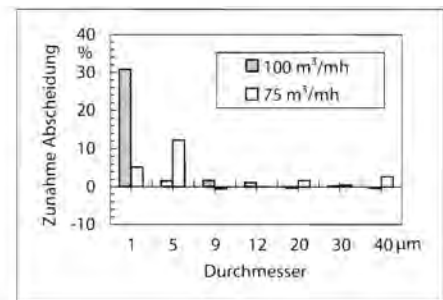
Wegen der großen Ähnlichkeit der Abscheideraten zu denen der isothermen Rechnung wird nur die durch die Thermophorese bedingte Veränderung der Abscheidung betrachtet.

$$\text{Zunahme Abscheidung} = \frac{n_{\text{mit Thermophorese}} - n_{\text{ohne Thermophorese}}}{n_{\text{ohne Thermophorese}}} \quad (4.1)$$

Ihr Einfluss nimmt mit sinkender Partikelgröße ab (Bild 4.9). Ab einem Durchmesser von 5 µm ist er beim Basisfall praktisch ohne Bedeutung; die Abweichungen zwischen den Rechnungen liegen in der Größenordnung der statistischen Genauigkeit.

Den Rechenergebnissen lässt sich aufgrund numerischer Ungenauigkeiten in der Rechnung nur die Aussage entnehmen, dass die Thermophorese bei Annahme extremer Temperaturgradienten nur bei den kleinsten relevanten Partikelgrößen überhaupt und dabei eine untergeordnete Rolle spielt. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit Untersuchungen in der Literatur [29]. Für den geometrisch ähnlichen Fall einer laminar überströmten Platte scheiden sich bei einem Verhältnis von der Temperatur der Wand zu der in der Anströmung von $T_w/T_\infty = 0,75$ bei Partikeln mit dem Durchmesser 1 µm und unter Berücksichtigung der Thermophorese dreimal mehr Partikel ab [15]. Im vorliegenden Fall mit einer deutlich geringeren Untertemperatur der Decke ($T_w/T_\infty = 0,97$) stellt sich ein kleinerer Anstieg von ca. 30% ein. Für steigende Durchmesser sinkt der Einfluss der Thermophorese. Eine Zunahme der Abscheidung findet sich für steigende Durchmesser nur im hier uninteressanten Bereich zwischen 0,001 ... 0,1 µm [10]. Bereits ab einem Durchmesser von 2,5 µm ist kein signifikanter thermopho-

Bild 4.9. Zunahme der Abscheidung durch Thermophorese.



retischer Einfluss auf die Abscheidung an Decken zu erkennen [22].

4.6 Elektrophorese

Unter Elektrophorese versteht man die von einem elektrischen Feld verursachte Bewegung eines Partikels [14]. Um das Abscheideverhalten der Partikel an Deckenluftdurchlässen auf diese Art zu beeinflussen, müssen sowohl die Partikel als auch die Decke oder der Durchlass elektrisch geladen sein. Die Kraft auf das Partikel ergibt sich aus der Ladung des Partikels und die durch die Ladungsverteilung auf der Decke erzeugte elektrische Feldstärke im Raum in Abhängigkeit vom Ort. Die elektrophoretische Kraft wird als zusätzlicher Summand in der Bewegungsgleichung für die Partikel berücksichtigt. Das größte Problem bei der Bewertung des Einflusses der Elektrophorese ist die Festlegung der elektrostatischen Randbedingungen. Um die maximale Beeinflussung der Partikelbewegung dennoch abschätzen zu können, sollen die Ladungsdichte der Decke und die Ladung der Partikel von Materialien übernommen werden, die sich stärker aufladen als die Stoffe, aus denen die Decke und die Partikel in der Regel bestehen.

Tabelle 4.1. Aufladungen von Decke und Partikeln (Elementarladung = $1,6021 \cdot 10^{-19}$ C).

	Decke, nach [1]		Partikel, nach [17]		
	Material	Ladungsdichte [C/cm ²]	Material	d _p [µm]	Ladung [C]
Stufe 1	ABS (Novodur W)	$-4,70 \cdot 10^{-9}$	Paraffin	5	$\pm 1,60 \cdot 10^{-19}$
Stufe 2	ABS (Novodur W)	$-4,70 \cdot 10^{-9}$	Latex	2	$\pm 4,01 \cdot 10^{-18}$
Stufe 3	ABS (Novodur PM)	$-1,65 \cdot 10^{-8}$	Latex	2	$\pm 4,81 \cdot 10^{-18}$
Hier	10% ABS (PM)	$-1,65 \cdot 10^{-9}$	10% Latex	5	$\pm 3,01 \cdot 10^{-18}$

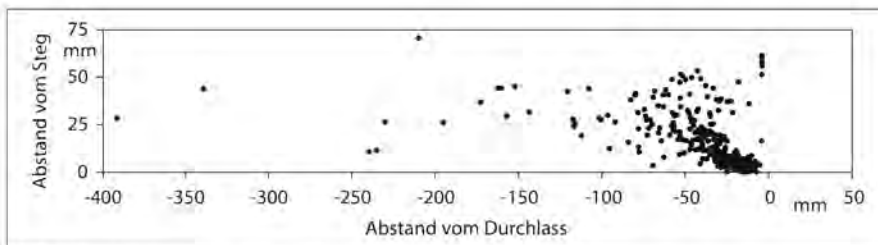


Bild 4.10. Abscheidungen ohne Elektrophorese.

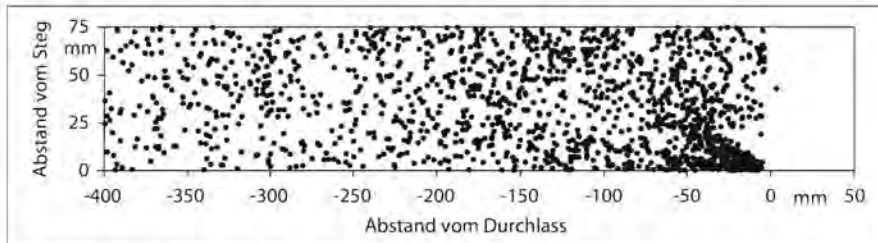


Bild 4.11. Abscheidungen bei elektrophoresischer Anziehung.

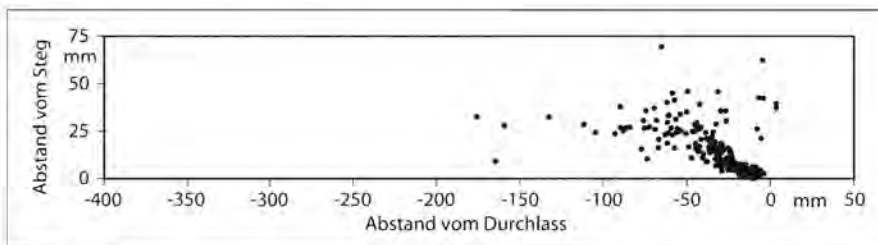


Bild 4.12. Abscheidungen bei elektrophoretischer Abstoßung.

Da die Ladungen der Stufe 3 bei Überströmung mit Luft unrealistisch hoch sind, Angaben über realitätsnähere Werte jedoch fehlen, sollen im Folgenden 10% der Ladungen der Stufe 3 zugrunde gelegt werden. Ferner wird die maximale Partikelladung unter der Annahme, dass sie sich proportional zur Oberfläche verhält, auf 5 μm Partikel hochgerechnet. Für größere Partikel ist der Einfluss geringer [10]. Das elektrische Feld E kann in ein Potenzialfeld

$$\vec{E} = \nabla \cdot \Phi \quad (4.2)$$

überführt werden, das durch die Laplacesche Gleichung

$$\Delta\Phi = 0 \quad (4.3)$$

beschrieben wird, sofern außer auf den Begrenzungsflächen keine Ladungen im Raum vorhanden sind [3]. Man spricht in diesem Fall von einem „elektrostatischen Feld“. Im vorliegenden Fall muss man zur Modellierung der Deckenluftdurchlässe ladungsfreie Bereiche beliebig anordnen können. Aus diesem Grund gelingt nur eine numerische Lösung der diskretisierten Potenzialgleichung [3].

Mit Hilfe eines Programms kann das Potenzialfeld unter bestimmten Annahmen bestimmt werden [24]. Die daraus resultierende lokale Kraft auf das Partikel ergibt sich aus einem nachgeschalteten Programm durch Ableitung des Potenzialfeldes (Gl. 4.2) und Vorgabe einer Partikelladung. Diese Kraft wird an die Lagrangesche Berechnung der Partikelflugbahn übergeben. Für den Basisfall des hohen Luftwechsels zeigt Bild 4.10 das Abscheidebild bei 5000 berechneten Bahnen von 5 μm

von positiv und negativ geladenen Partikeln im Raum und einer einheitlich geladenen Decke würde die Abscheidung durch die Elektrophorese begünstigt. Die Ursache liegt in der bereits diskutierten Erschließung neuer Abscheidegebiete, in denen die Turbulenz oder andere Strömungskräfte nicht ausreichen, um Partikel an die Decke zu beschleunigen. Eine elektrische Abstoßung kann hingegen nur die Abscheidung an Orten verringern, an denen die Strömungskräfte die Verschmutzungen verursachen.

Es lässt sich somit festhalten, dass die Elektrophorese bei der Deckenverschmutzung wahrscheinlich eine untergeordnete Rolle spielt. Dies widerspricht der Auffassung von [27], der „elektrostatische Felder“ als eine mögliche Ursache der Deckenverschmutzung nennt.

Mit der geführten Argumentation lässt sich ein Rückschluss auf die Größenordnung der real vorliegenden

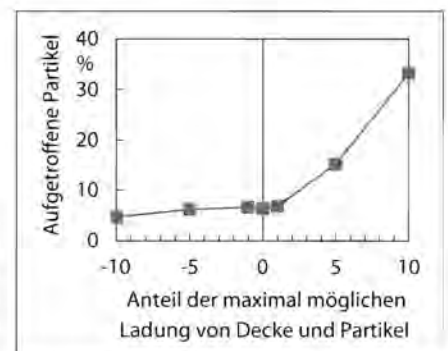


Bild 4.13. Abhängigkeit der Wirkung der Elektrophorese von der Aufladungsstärke.

großen Partikeln. Wie bei den Rechnungen mit der detailgetreuen Abbildung der Geometrie scheiden sich die meisten Partikel hinter dem Steg ab. Wird die Elektrophorese in die Berechnung einbezogen, treffen insgesamt viermal mehr Partikel auf die Decke auf (Bild 4.11), aber nur 50% mehr im Bereich bis 25 mm hinter dem Steg. Der Großteil der zusätzlich abgeschiedenen Partikel schlägt sich auf Bereichen in weiterer Entfernung vom Durchlass nieder. Ohne elektrische Kräfte würden diese Orte nicht verschmutzen. Das Verhältnis zwischen dem Anteil in größerer Entfernung zum Anteil unmittelbar am Steg abgeschiedener Partikel ist dabei deutlich höher als in den Experimenten. Die hier angenommenen Aufladungen von Decke und Partikeln sind also offensichtlich zu hoch.

Lädt man die Partikel in gleicher Stärke aber entgegen gesetzter Richtung auf, scheiden sich nach Bild 4.12 etwa 25% weniger Partikel ab als ohne Berücksichtigung der Elektrophorese. Elektrische Anziehung und Abstoßung wirken also nicht gleich stark auf das Verschmutzungsverhalten. Selbst bei einer Gleichverteilung

Aufladungen ziehen. Eine Variation der Aufladungen zeigt, dass die Elektrophorese die Abscheidung kaum beeinflusst, wenn Decke und Partikel unter einem Prozent ihrer Maximalladung tragen (Bild 4.13). Dann würde ein Partikel knapp zwei und ein Quadratmillimeter Decke etwa zehn Millionen Elementarladungen tragen. Bei den hier durchgeführten Experimenten mit durch Zerstäubung erzeugten Salzkristallen lassen sich am Austritt des Generators jedoch höhere Partikelladungen von ca. 10–14 Elementarladungen erwarten [9]. Falls sie diese auf ihrem Weg zur Decke nicht verlieren, muss die Deckenladung in den Abscheideversuchen dann noch niedriger liegen, da ansonsten, wie bereits diskutiert, auch Bereiche in weiterer Entfernung vom Durchlass verschmutzen würden.

4.7 Large-Eddy-Simulation

Das verwendete Turbulenzmodell beeinflusst die Qualität der Simulationsrechnungen in erheblichem Maße. Die Large-Eddy-Simulation (LES) ist den RANS-Modellen wie dem bisher verwendeten RSM zwar überlegen, benötigt aber deutlich längere Rechenzeiten. Um den Vorteil der LES darzustellen, wurde dennoch eine Rechnung durchgeführt für die einseitige, steile Einblasung mit einem Volumenstrom von 100 m³/mh und einer mittleren Partikelgröße von 9 µm. Die turbulenten Strukturen in der Strömung, welche die LES-Rechnungen erfassen sollen, sind in der Realität nicht symmetrisch. Um dennoch den Rechenaufwand zu reduzieren, wurden zwei Symmetrieebenen im Abstand von zwei Durchlasselementen bei $x = \pm 15$ mm verwendet. Sie liegen weit genug vom mittleren Steg entfernt, um die Berechnung der Turbulenz dort nicht zu verfälschen. Als Zeitschritt für die Strömungsberechnung wurden zunächst 0,5 ms gewählt. Die Randbedingungen am Einlass in das Berechnungsgebiet und die Druckrandbedingungen an den Außenflächen entsprechen denen der RSM-Rechnungen. Sie liegen weit genug von den strömungstechnisch interessanten Bereichen entfernt, um diese nicht zu beeinflussen. Bild 4.14 zeigt die y-Geschwindigkeiten in drei Schnittebenen durch die Hauptströmung ($x = \pm 75$ mm) und den Steg ($x = 0$ mm) in einem Blick von schräg oben durch die Decke hindurch im Abstand von 50 ms. Das Strömungsbild unterscheidet sich von den RSM-Rechnungen (Bild 4.2). Die in den LDA-Messungen (Bild 3.3) und in Nebelversuchen sichtbaren Wirbel werden qualitativ gut wiedergegeben. Dies gilt insbesondere für die großskaligen Wirbel unterhalb des Luftstrahls, welche die RANS-Modelle nicht erfassen. Ferner ist der Coanda-Effekt weniger ausgeprägt, so dass der Luftstrahl sich nicht so stark an die Decke anlegt und dem Experiment entsprechend ein größeres Rückströmgebiet entsteht.

Für die gekoppelte Berechnung von Fluidphase und Partikelbewegung wurde ein Zeitschritt von 1 ms gewählt, da in diesem Zeitraum die

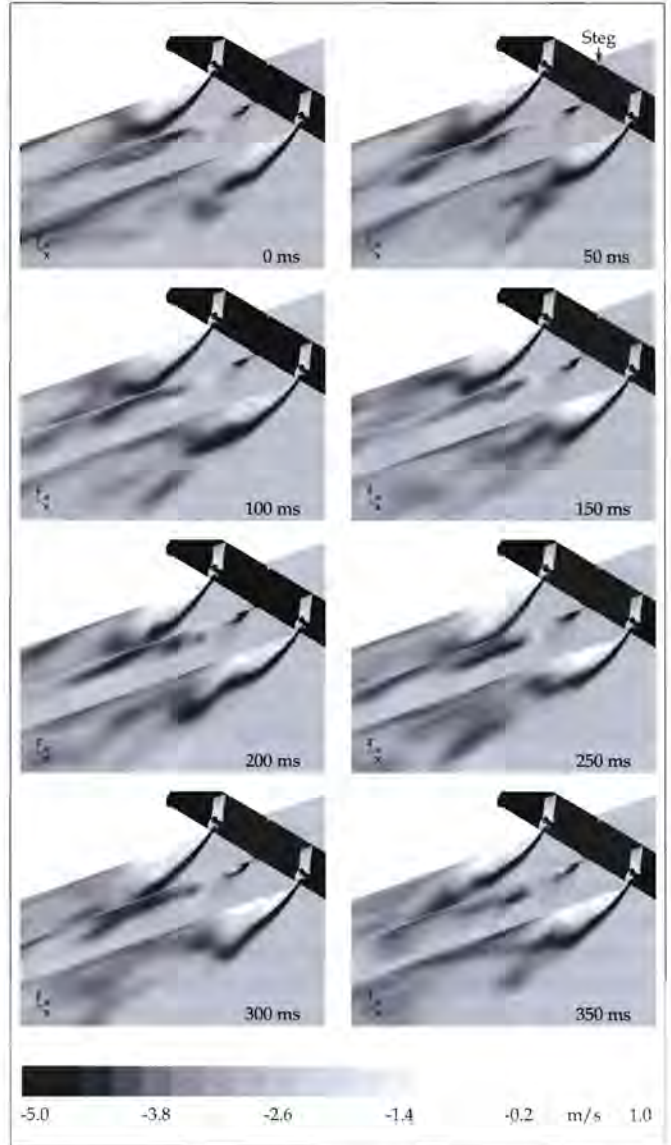


Bild 4.14. y-Komponente der Geschwindigkeit mit LES (LDA in Bild 3.3, RSM in Bild 4.2)

Veränderung der Strömung hinreichend gering ist. Es befanden sich stets 6000 Partikel gleichzeitig im Berechnungsgebiet, insgesamt wurden in 7,92 s Strömungszeit 75838 Partikelbahnen berechnet, von denen 126 die Decke berührten.

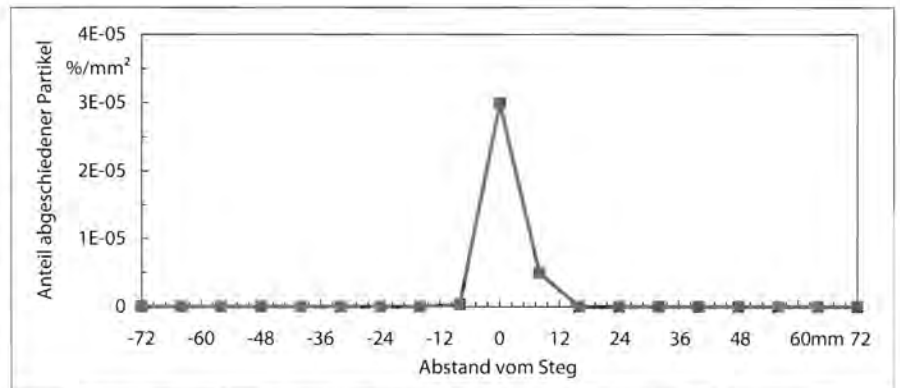


Bild 4.15. LES-Simulation, $d_p = 9 \mu\text{m}$; Experiment in Bild 3.6, RSM-Rechnung in Bild 4.5.

Wie *Bild 4.15* zeigt, scheiden sich insgesamt deutlich weniger Partikel ab als in der vergleichbaren RSM-Rechnung (*Bild 4.5*). Die Partikel treffen ausnahmslos im Bereich hinter dem Steg auf und nicht mehr auch im Bereich hinter der Hauptströmung. Die Ursache liegt in der realitätsgetreueren Abbildung der Rückströmung in diesem Bereich. Es bleibt die Frage, warum die Fluoreszenzmessungen im Bereich hinter dem Durchlass Abscheidungsmengen unter denen der RSM- aber über denen der LES-Rechnungen ergeben. An dieser Stelle wird vermutet, dass hierfür Abweichungen zwischen der Modellierung und der Realität verantwortlich sind [24].

4.8 Kontakt zwischen Partikel und Decke

In der numerischen Strömungssimulation wurde angenommen, dass jedes Partikel bei Berührung der Decke haftet. Dies ist in der Realität nicht der Fall. Bei den betrachteten Partikelgrößen ist jedoch anzunehmen, dass der Fehler nicht allzu groß ist [24].

5. Fotografisches Messverfahren

Zur Beurteilung der Verschmutzungsneigung von Deckenluftdurchlässen und für die Suche nach Maßnahmen, sie zu verringern, wird ein praxistaugliches Testverfahren benötigt. Das Testverfahren soll die gezielte Entwicklung verschmutzungsarmer Bauteile vereinfachen. Dabei ist gleichzeitig die Frage zu klären, welche Eigenschaften von Verschmutzungsmustern in welchem Maße störend wirken und wie sie charakterisiert werden können.

5.1 Bewertung bisheriger Verfahren

Als Testverfahren für die Verschmutzung von Luftdurchlässen ist die Erzeugung visueller Verschmutzungsbilder nach dem vorgeschlagenen Verfahren gut geeignet. Dieses Verfahren liefert im Gegensatz zu Farbsprühversuchen

monodisperse Abscheidungen, so dass die Untersuchung der Verschmutzung in Abhängigkeit verschiedener Partikelgrößen möglich ist. Die Versuchsdauer ist dabei signifikant niedriger als bei den quantitativen Untersuchungen, da die aufwändige Auswertung entfällt. Mit zunehmender Partikelgröße sinkt die benötigte Versuchsdauer durch die höhere Partikeloberfläche und Abscheidewahrscheinlichkeit im Größenbereich der erzeugbaren Partikel. Bereits nach der Vernebelung eines Spritzeninhalts der Fluoreszin-Natrium-Lösung zur Erzeugung der mittleren und damit interessantesten Partikelgröße von 9 µm lassen sich die Verschmutzungsbilder photographisch festhalten. Die minimale Versuchsdauer beträgt bei der mittleren Partikelgröße zwei Stunden, in denen lediglich 0,6 g des fluoreszierenden Salzes im Versuchsraum ausgesetzt werden. Der Versuchsraum verschmutzt dabei nicht sichtbar, erst bei einer Versuchsdauer über mehrere Tage empfiehlt sich ein Auskleiden des Raums. Damit ist das Verfahren auch in Hinsicht auf die Raumverschmutzung den Farbsprühversuchen überlegen. Wie sich bei Versuchen herausgestellt hat, funktioniert das Verfahren auch mit Kochsalz, das den Versuchsraum noch weniger belastet und keine Flecken auf Textilien hinterlässt. Das optische Verfahren liefert aber bisher keine quantitativen Aussagen über die Verschmutzung. Das folgende Kapitel räumt diesen Nachteil aus.

5.2 Ziel und Prinzip des neuen Messverfahrens

In den qualitativen Abscheidefotos korreliert die Helligkeit des reflektierten Lichts mit der Partikelbeladung der Oberfläche am betrachteten Ort. Aus der Helligkeitsverteilung im Foto lassen sich die Partikelbeladungsdichten in Abhängigkeit vom Ort ableiten.

Bild 5.1 stellt das fotografische Auswerteverfahren in einem Ablaufschema zusammen. Eine Digitalkamera mit integriertem Blitzlicht belichtet und fotografiert die partikelbeladene Oberfläche. Kernstück des Verfahrens ist eine Software, welche das Verschmutzungsfoto von diversen Versuchseinflüssen befreit und die Massenbeladung als Funktion des Ortes ausgibt. Hieraus können im letzten Schritt Kennzahlen berechnet werden. Das Verfahren ist in [24] näher beschrieben.

5.3 Kennzahlen

5.3.1 Mittlere Schmutzbeladung

Als einfachstes Maß zur Beschreibung der Verschmutzungsneigung bietet sich die abgeschiedene Gesamtmasse an. Diese erhält man durch Integration der aus dem fotografischen Auswerteverfahren gewonnenen Beladungsdichte m'' über der verschmutzten Fläche A . Dividiert man die errechnete Gesamtmasse durch den Abstand zwischen diesen Symmetrieebenen l_{char} erhält man die pro

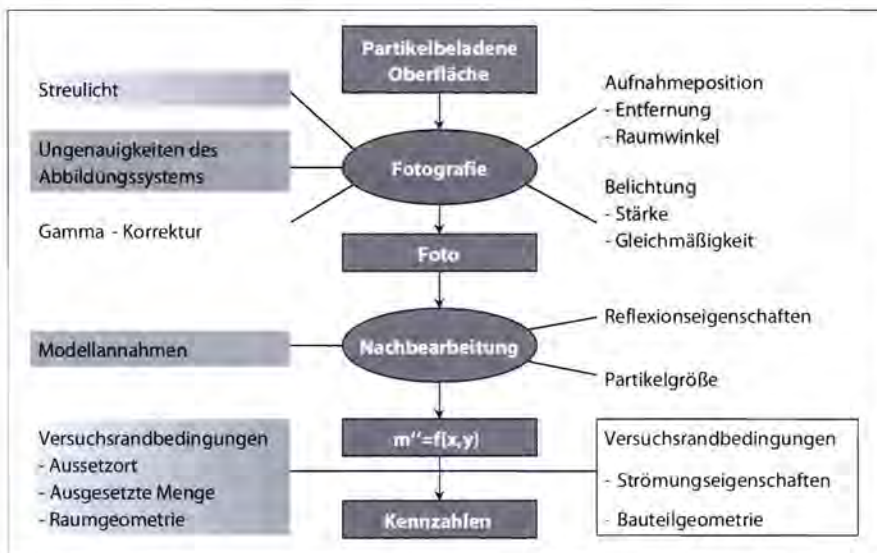


Bild 5.1. Ablauf der Auswertung und Einflussparameter.

Längeneinheit des Linearluftdurchlasses abgeschiedene Partikelmasse. Sie verhält sich proportional zur ausgesetzten Gesamtmasse m_{ges} und umgekehrt proportional zur Gesamtlänge des Luftdurchlasses l_{ges} , der sich über die gesamte Breite des Testraums erstreckt und auf den sich die gesamte Partikelmasse bei Annahme idealer Durchmischung verteilt. Daher ist

$$\zeta_G = \frac{l_{ges}}{m_{ges} l_{char}} \iint_A m''(x,y) dx dy \quad (5.1)$$

als dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung der sich an einem Linearluftdurchlass abscheidenden Partikelmasse geeignet. Zur Anwendung der Kennzahl auf nicht lineare Durchlassgeometrien müssen die charakteristische Länge l_{char} und die Gesamtlänge l_{ges} aussagekräftig definiert werden. Bei einem Dralldurchlass könnte für l_{char} der Umfang des Durchlasses und für l_{ges} der Umfang des Testraums gewählt werden.

5.3.2 Kontrast

Verschmutzungen werden in Abhängigkeit von ihrer Intensität und Verteilung auf einer Oberfläche wahrgenommen. Gleiche Partikelbeladungen wirken störender, je kontrastreicher sie auf der Oberfläche verteilt sind. Im Bereich der Bildverarbeitung spricht man von „Texturen“ auf einer Oberfläche, die sich durch Maße wie die Streuung oder die Gradienten der Grauwerte beschreiben lassen [13]. Ein mögliches Kontrastmaß ist die erste Ableitung der Helligkeit nach dem Ort [16]. Es wird im Folgenden über die Gradienten der Beladungsdichte definiert, die mit einem *Sobel*-Filter aus dem Verschmutzungsfoto berechnet und über die beiden Koordinatenrichtungen gemittelt werden [18]. Hierzu wird die Bildmatrix sowohl mit dem optimierten *Sobel*-Filter

$$SF = \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

als auch mit dessen transponierten SF' gefiltert. Das bedeutet, dass jeder Eintrag in der Bildmatrix durch die Summe der Produkte zwischen den jeweils benachbarten Matrixelementen mit den Gewichten in der Filtermatrix ersetzt wird. Das so erhaltene Gradientenbild ist abhängig von der Orientierung des *Sobel*-Filters. SF findet die horizontalen und SF' die vertikalen Gradienten. Ein richtungsunabhängiges Gradientenbild erhält man durch punktweise Berechnung des quadratischen Mittels der beiden mit SF bzw. SF' gefilterten Bildmatrizen. Die sich auf diese Weise ergebenden Werte f werden nun über den Bildbereich integriert, auf die im Bild betrachtete Durchlasslänge und die ausgesetzte, längenbezogene Partikelmasse bezogen. Als Kontrastmaß erhält man somit

$$\zeta_G = \frac{l_{ges}}{m_{ges} l_{char}} \iint_A f[\nabla m''(x,y)] dx dy \quad (5.3)$$

Ein ähnliches Verfahren auf Basis des *Laplace*-Operators findet sich in der Literatur zur Erkennung von Kontrastgradienten in Eisschnitten [4].

5.3.3 Zusammenwirken der Kennzahlen

Die Wahrnehmung einfacher, stets ähnlicher Muster wie z.B. Karos kann näherungsweise mit *einer* Kennzahl erfasst werden. Hierbei ist jedoch die Eignung eines Merkmals zur Beschreibung eines Objekts abhängig von der Aufgabe und der Art von Objekten, auf die das Merkmal angewandt wird [28]. Die zu vergleichenden Objekte dürfen nur in wenigen objektiv definierbaren Merkmalen von einander abweichen, die zudem über eine Eigenschaft messbar sind. Man kann beispielsweise Karomuster vergleichen, die sich in Orientierung und Farbe unterscheiden. Bei Schmutzmustern, die stets verschiedenartige Strukturen besitzen und in unterschiedlichen Umgebungen wahrgenommen werden, ist eine Beschreibung über eine einzige Kennzahl nicht möglich. Die beiden Kennzahlen für Schmutzbeladung und -kontrast lassen sich somit nicht sinnvoll zu einer einzigen Kennzahl kombinieren.

5.4 Anwendungsbeispiel

Um ein Gefühl für die Größenordnung der vorgeschlagenen Kennzahlen zu vermitteln, sollen diese für ausgewählte Versuchsrandbedingungen berechnet werden.

Das in *Tabelle 5.1* durchgeführte fotografische Messverfahren bestätigt die bisherigen Feststellungen. Die Werte für die Schmutzbeladung und den Schmutzkontrast sind entsprechend ihrer Größe mit Graustufen hinterlegt. Einseitige Einblasung verursacht bei dem verwendeten Luftdurchlass stärkere Verschmutzungen als wechselseitige, wobei im einseitigen Einblasfall beim steilen und im wechselseitigen beim flachen Einblaswinkel mehr Partikel deponieren. Ferner lässt sich feststellen, dass die 12 µm Partikel einen geringeren Verschmutzungskontrast erzeugen als die 9 µm Partikel. Dies deckt sich mit den Fluoreszenzuntersuchungen und Simulationsrechnungen.

Tabelle 5.1. Verschmutzungskennzahlen ausgewählter Testfälle.

Ri.	Wi.	Vol.-Strom [m³/mh]	d _{aero} [µm]	Fluoreszenz-mess.	m _{ges} [g]	m [mg]	ζ _G [%]	ζ _K [1/m]
⇒	↘	100	12	Bild 3.6	8	2,21	0,664	18,53
⇒	↘	100	9	Bild 3.6	6	1,65	0,659	25,83
⇒	↘	75	9		13	1,78	0,336	13,97
⇒	→	100	12		12	0,281	0,056	2,42
⇒	→	100	9		12	0,221	0,044	3,35
⇔	→	100	12		12	0,122	0,024	2,79
⇔	↘	100	12		35	0,227	0,016	0,76

Einblasrichtung: ⇒ = einseitig, ⇔ = wechselseitig. Walzenstellung: ↘ = steil, → = flach

6. Verringerung der Verschmutzungsneigung

6.1 Prinzipielle Überlegungen

Bei dem Versuch, die Verschmutzungsneigung zu verringern, darf man die Hauptanforderungen an einen Deckenluftdurchlass nicht aus den Augen verlieren (in Anlehnung an [19]):

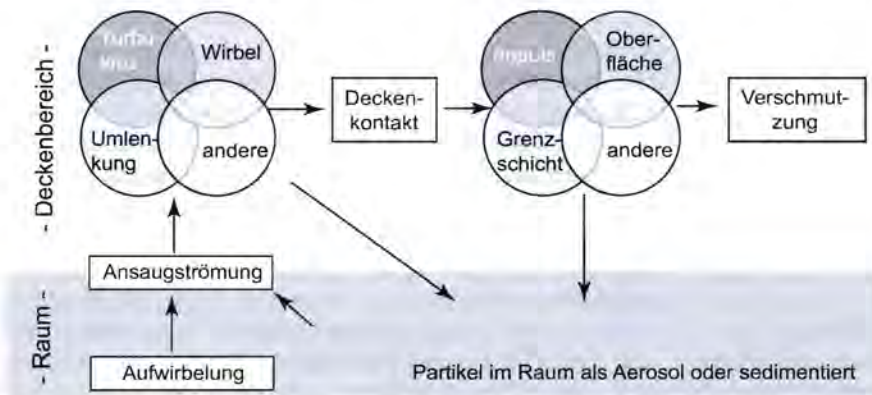


Bild 6.1. Wirkungskette der Deckenverschmutzung.

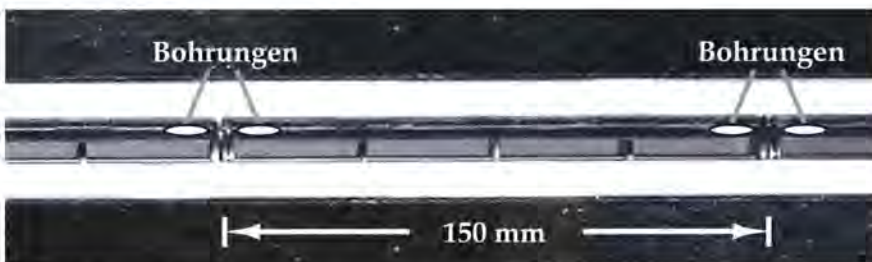


Bild 6.2. Beispiel für Gegenmaßnahme bei einseitiger Einblasung.

1. Keine Zugerscheinungen im Aufenthaltsbereich.
2. Gleichmäßige Durchspülung des Raums.
3. Rascher Geschwindigkeits- und Temperaturabbau auch bei hoher Eintrittsgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Raumluft.
4. Flexibilität bei der Anpassung an die Anforderungen des Raums, z.B. die Möglichkeit der nachträglichen Änderung von Einblasrichtung und -art.
5. Optische Gestaltbarkeit.

Die in den vorhergehenden Kapiteln diskutierten Einflüsse auf das Verschmutzungsverhalten lassen sich als Wirkungskette zusammenfassen (Bild 6.1). Die an Oberflächen aufgewirbelten oder in der Raumluft dispergierten Partikel erreichen den Deckenbereich ausschließlich über die Ansaugströmung der Eintrittsluftstrahlen. Dort erhalten sie den notwendigen Impuls, der zu einem Deckenkontakt führt, durch die Beschleunigung über turbulente Querbewegungen, Wirbel, Strömungsumlenkungen oder andere, unbedeutendere Kräfte (Thermo-, Elektrophorese). Ob das Partikel an der Decke haftet, wird schließlich hauptsächlich vom Partikelimpuls, der Beschaffenheit der Oberfläche und einer möglichen späteren Ablösung durch die Scherkräfte in der Grenzschicht bestimmt.

Da die Induktion von Raumluft und die Turbulenz wesentliche Eigenschaften der Mischlüftung sind, gibt es keine pauschalen Lösungen des Verschmutzungsproblems.

Es gibt bereits Hersteller von verschmutzungsarmen Luftdurchlässen, die an den diskutierten Zusammenhängen anreifen [23].

6.2 Konkretes Beispiel

Bei einseitiger, steiler Einblasung scheiden sich wie bereits diskutiert die meisten Partikel im Bereich hinter den Stegen ab. Dies lässt sich verringern, wenn saugseitig oder wie in Bild 6.2 gezeigt beidseitig der Stege Löcher in die Luftleitzyylinder gebohrt werden, durch die Luft senkrecht nach unten ausströmen kann. Dieser Luftstrom stört die aufwärtsgerichtete Ansaugströmung unterhalb der Stege und verhindert dadurch, dass Partikel über die Induktion in die hochturbulenten Gebiete druckseitig des Stegs vordringen. An dem untersuchten Auslasselement ließen sich hierdurch die Schmutzbelastung um knapp 98% ($\zeta_G = 0,43 \dots 0,009\%$) und der Schmutzkontrast um fast 93% ($\zeta_G = 19,28 \dots 1,45/m$) senken.

7. Zusammenfassung

Die Verschmutzung von Decken in der Nähe solcher Luftdurchlässe ist auf verschiedene Effekte zurückzuführen. Der wichtigste Einfluss besteht in der Turbulenz in Deckennähe. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit und des Volumenstroms am Durchlass steigert die Turbulenz und die Ansaugung von Partikeln aus dem Raum, was eine verstärkte Verschmutzung zur Folge hat. Die Verschmutzungsneigung wird verringert, wenn die Zuluft unter einem steileren Winkel in den Raum eingeblasen wird, da die Partikel hierdurch zum einen durch die Hauptströmung stärker von der Decke wegbeschleunigt werden und zum anderen der Abstand zwischen den turbulenten Gebieten und der Decke vergrößert wird. Bei gleichzeitiger Veränderung mehrerer Parameter gelten diese pauschalen Aussagen nicht. Nach den durchgeführten numerischen Untersuchungen sind elektrische und thermophoretische Kräfte für die Deckenverschmutzung unbedeutend. Die numerische Strömungssimulation ist in der Lage, die Vorgänge in dem für die Deckenverschmutzung relevanten Partikeldurchmesserbereich $5 \dots 20 \mu\text{m}$ im Wesentlichen nachzubilden, wenn bestimmte Anforderungen eingehalten werden. Dazu zählen die Mitberechnung der Innenströmung des Luftdurchlasses, welche die Strömungseigenschaften des Luftstrahls beim Eintritt in den Raum stark beeinflusst, eine hinreichend feine Auflösung der Grenzschicht und die Verwendung eines anisotropen Turbulenzmodells. Wie Vergleiche mit Depositionsmessungen zeigen, ist die qualitative Aussage der Simulationsrechnungen recht gut. Eine genauere quantitative Aussage kann durch eine weitere Verfeinerung des Berechnungsgitters und eine verbesserte Modellierung der Turbulenz, z. B. mit der deut-

lich rechenintensiveren Large-Eddy-Simulation, erreicht werden.

Da Induktion und Turbulenz gleichzeitig immanente Eigenschaften einer Mischlüftung und Hauptursache der Partikelabscheidung sind, lassen sich keine allgemein gültigen Maßnahmen zur Verringerung der Deckenverschmutzung ableiten. Eine Lösung des Problems ist vielmehr individuell unter Berücksichtigung der diskutierten Aspekte zu suchen. Das entwickelte fotografische Verfahren, das mit Kochsalz als Indikator arbeitet, eignet sich für die Entwicklung verschmutzungsarmer Bauteile. Das Verfahren liefert bereits nach kurzer Versuchsdauer zwei Kennzahlen, welche die Verschmutzungswirkung über die Schmutzbeladung und den Verschmutzungscontrast charakterisieren.

Danksagung

Dieser Beitrag beruht auf einer Dissertation bei Herrn Prof. Dr.-Ing. *Manfred Zeller*, Lehrstuhl für Wärmeübertragung und Stoffaustausch der RWTH Aachen [24]. Ein Großteil der Arbeit wurde gefördert von der „Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V. (FLT)“ und dem „Bundesminister für Wirtschaft“ über die „Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AiF)“. Sie wurde ausgezeichnet mit dem „Young Researcher Award“ der REHVA.

Literatur

- [1] *Bausser, H.*: Static Electrification of Organic Solids. In: Dechemamographien. Behrens, D., Fischbeck, K. (Hrsg.), Band 72 (Elektrostatische Aufladung), 1. Auflage, Frankfurt, 1974, S. 11–28.
- [2] *Drain, L. E.*: The Laser Doppler Technique. Wiley & Sons, Chichester, England, 1980.
- [3] *Durand, E.*: Électrostatique et Magnétostatique. Masson, Paris, 1953.
- [4] *Eicken, H.*: Quantifizierung von Meereseigenschaften: Automatische Bildanalyse von Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen. In: Berichte zur Polarforschung, Bd. 82, Bremerhaven, 1991.
- [5] *Fan, Q.L., Wang, X.L., Zhang, H.Q. and Chan, C.K.*: Large eddy simulation, of a horizontal particle-laden turbulent planar jet. In: Computational Mechanics 27 (2201), S. 128–137.
- [6] *Fichtner, R.-H., Knorr, T. und Roth, H.-W.*: Deckenverschmutzung durch Luftauslässe. In: CCI (1996) H. 12, S. 36–38.
- [7] *Finke, U. und Fitzner, K.*: Beurteilung der Deckenverschmutzung durch Schlitzdurchlässe. In: DKV Tagungsband 23 (1996) Nr. 4, S. 119–128.
- [8] *Fitzner, K. und Finke, U.*: Deckenverschmutzung bei Luftdurchlässen. In: CCI (1996) Nr. 11, S. 69–70.
- [9] *Forsyth, B., Liu, B. Y. H. und Romay, F. J.*: Particle Charge Distribution Measurement for Commonly Generated Laboratory Aerosols. In: Aerosol Science and Technology 28 (1998), S. 489–501.
- [10] *Gartz, K., Schmidt, F. und Fissan, H.*: Partikelverluste in turbulent durchströmten Probenahmeleitungen. In: Chemie Ingenieur Technik, Bd. 67, 1995, S. 1641–1645.
- [11] *Greenfield, C. und Quarini, G.*: A Lagrangian simulation of particle deposition in a turbulent boundary layer in the presence of thermophoresis. In: Applied Mathematical Modelling 22 (1998), S. 759–771.
- [12] *Gröber, E. und Grigull, U.*: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1963.
- [13] *Haberäcker, P.*: Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [14] *Haga, K.*: Applications of the Electrostatic Separation Technique. In: Handbook of Electrostatic Processes. Chang, J.-S., Kelly, A.-J. and Crowley, J. M. (Hrsg.), New York, 1995, S. 365–386.
- [15] *Jayaraj, S., Dinesh, K. K. und Pullai, K. L.*: Thermophoresis in natural convection with variable properties. In: Heat and Mass Transfer 34 (1999), S. 469–475.
- [16] *Marr, D.*: Vision. Freeman Publishers, San Francisco, 1982.
- [17] *Muhr, W.*: Elektrostatische Aufladung verschiedener Teststäube. Chemieingenieur-Technik 48 (1976) Nr. 6, S. 581.
- [18] *Müller, R. K., Eitemeyer, A., Ott, R., Saackel, L. und Stoeckel, H. P.*: Digitale Bildverarbeitung in der experimentellen Spannungsanalyse und in der Produktionskontrolle. In: Kontakt & Studium, Bd. 307, Bartz, W. J. (Hrsg.), Ehningen, 1990.
- [19] N.N.: Schlitzauslässe Typ LDB und LDB „LTG System clean®“. Produktinformation, LTG AG, Version LDB-D-TP-01 (03/00), Stuttgart, 2000.
- [20] *Rauer, P.*: Untersuchung der Deckenverschmutzung im Bereich induktiver Decken-Zuluftdurchlässe. Diplomarbeit im Fachbereich Versorgungstechnik der Fachhochschule Köln, 1996.
- [21] *Talbot, L., Cheng, R. K., Schefer, W. R. und Wilkies, D. R.*: Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer. In: Journal of Fluid Mechanics 101 (1980) Nr. 4, S. 737–758.
- [22] *Thatcher, T. L., Fairchild, W. A. und Nazroff, W. W.*: Particle Deposition from Natural Convection Enclosure Flow Onto Smooth Surfaces. In: Aerosol Science and Technology 25 (1996), S. 359–374.
- [23] *Stahl, M.*: Kein Schmutz an der Decke. In: CCI print, Nr. 13, 2008, S. 19 f.
- [24] *Timmer, H.*: Deckenverschmutzung durch Luftdurchlässe. Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2003.
- [25] *Timmer, H. und Zeller, M.*: Numerische Untersuchung zur Partikelablagerung im Nahbereich von Deckenluftdurchlässen. In: HLH 51 (2000) Nr. 7, S. 65–67.
- [26] *Timmer, H., Zeller, M., Jordan, E., Neumann, S. und Fissan, H.*: Überprüfung der Verschmutzung im Nahbereich von Deckenluftdurchlässen. Ki Luft- und Kältetechnik (2001), S. 256–261.
- [27] *Vogel, K.-H.*: Wie die Decke sauber bleibt. In: CCI (1995) Nr. 9, S. 27–29.
- [28] *Walter, P.*: Verfahren der sequentiellen Merkmalsanalyse für die Mustererkennung. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2000.
- [29] *Yilmaz, S. und Cliffe, K. R.*: Particle deposition simulation using the CFD code FLUENT. In: Journal of the Institute of Energy. 73 (2000), S. 65–68.