

Bestimmung des Filtrationsgrades für Gewebefilter in Luftströmungen mittels laseroptischen Aufbaus

Determination of the degree of filtration for fabric filters in air flows by means of laser-optical setup

Johannes Burkert, Rüdiger Schwarze

Tu Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanik und Fluidodynamik,
Lampadiusstr. 4, 09599 Freiberg
Johannes.burkert@imfd.tu-freiberg.de

Filtration, Filterleistung
filtration, degree of filtration

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurden textile Filtergewebe optisch hinsichtlich ihrer Partikelfiltrationsfähigkeit untersucht. Der verwendete optische Aufbau (siehe Abbildung 1) bestehend aus Lasersystem und Hochgeschwindigkeitskamera ist in der Lage eine maximale Fläche von ca. 150 mm x 120 mm zu beobachten. In gewählten ROI (Region of Interest) vor und nach dem Filter werden die Partikel für zwei Bilder mit einem Abstand Δt ausgezählt. Daraus kann ein Filtrationsabscheidegrad $R = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}}$, mit N_{out} Partikelanzahl Filternachlauf und N_{in} Partikelanzahl Filtervorlauf, für das jeweilige Filtermedium abgeleitet werden. Um nicht nur auf eine Messebene beschränkt zu sein, können Lichtschnitt und Kamera synchron bewegt werden um dadurch mehrere Messebenen zu realisieren. Unsere initialen Messungen für vier verschiedene Gewebe zeigten, dass R zwischen 23 % und 39 % abhängig von der Gewebeart und Anordnung variiert.

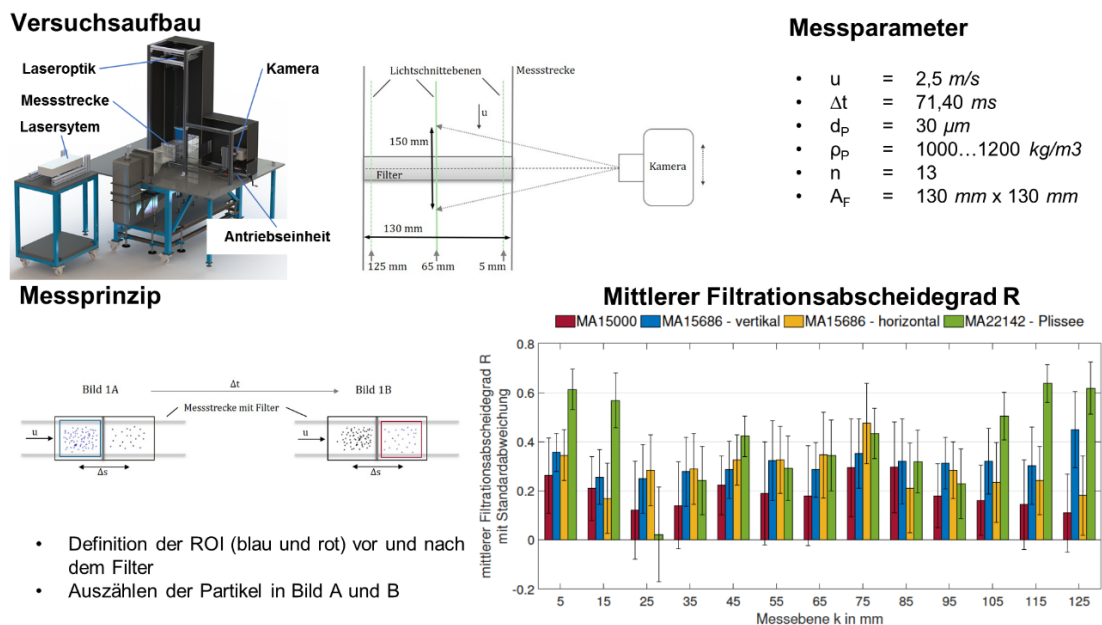


Abbildung 1: Grafische Zusammenfassung des Versuchsaufbaus und des Messprinzips zur Bestimmung des Filtrationsabscheidegrades für Gewebefilter

Einleitung

Der vorliegende Beitrag entstammt dem *VDI ZIM Projekt Keimtier*, im Rahmen dessen biozide Filterstrukturen entwickelt wurden, um vorrangig bakterielle Erreger in der Raumluft von Tierställen abzutöten und so den präventiven Antibiotikaeinsatz zu verringern (siehe Gilbert et al., 2010, Bragoszewska and Biedroń, 2018).

Ein Problem stellt hier die Bestimmung der Filtrationsleistung dar. Konventionelle Methoden basieren auf der genauen Kenntnis der in den Luftstrom gegebenen Partikel und eines Vorher/Nachher Vergleichs. Andere Methoden basieren auf Einzelfaserbetrachtungen, aus denen dann Rückschlüsse auf das reale Filterverhalten geschlossen werden. Letzteres ist stark empirisch, weswegen genau darauf geachtet werden muss, welche strömungsmechanischen Bedingungen vorliegen (siehe Bílek and Šidlof, 2014, DIN EN ISO 29463, 2019).

So werden in der Literatur je nach Anwendungsfall unterschiedliche Reynoldszahlen zur Berechnung der Filtrationsleistung angegeben. Weitere Messverfahren basieren auf invasiven Methoden, bei denen Schwebstoffsensoren in der Strömung platziert werden um daraus die Filterleistung bzw. die Partikelbeladung abzuleiten. Gravimetrische Verfahren wiegen die untersuchten Filter vor und nach der Messung mit Feinwaagen um die Filtrationsfähigkeit zu bestimmen. Wobei auch hier die Kenntnis der zuvor in den Versuchsstand gegebenen Partikelmenge bekannt sein muss (siehe Berthold, 1999, , Chen et al., 2008, Wenke et al., 2017)

Der vorliegende Beitrag hat daher zum Ziel ein Messprinzip zur Bestimmung der Filtrationsleistung auf Basis von optischen Messungen zu untersuchen. Das Verfahren basiert auf der Auszählung der Tracerpartikel vor und nach dem Filter. Der dazu notwendige Zeitversatz ist durch die Partikelbewegung in der Messtrecke definiert. Das Verfahren hat den Vorteil, dass keine Kenntnis über die im System vorhandenen Partikel bekannt sein muss und die Strömung nicht durch Bohrungen und Messsonden beeinträchtigt wird.

Versuchsaufbau und -Durchführung

Die Versuche werden an einem Modellwindkanal in Göttinger Bauart durchgeführt (Abbildung 2 a)). Dieser verfügt über einen drehzahlgesteuerten Lüfter, so dass unterschiedliche Volumenströme erreicht werden können. Abbildung 2 b) zeigt das Umgelenkgetriebe mit der Kamera und Lichtschnitt gleichzeitig bewegt werden können, um eine beliebige Ebene in der Messtrecke vermessen zu können. Die Kamera wird dafür einmalig auf die Lichtschnittebene fokussiert und verbleibt durch den konstruktiven Aufbau stets im gleichen Abstand zum Lichtschnitt. Abbildung 2 c) zeigt schematisch wie die Messebenen in der Messtrecke gewählt werden können. Um zu verhindern das der Lichtschnitt genau auf den Wänden liegt, sind der minimale und maximale Wandabstand auf 5 mm bzw. 125 mm beschränkt. Die Mittelebene der Messtrecke liegt bei 65 mm.

Die Messtrecke des Kanals besitzt einen rechteckigen Querschnitt mit einem hydraulischen Durchmesser von 130 mm. Die Filtergewebe werden über eine Filterkassette eingeschoben, welche konstruktionsbedingt den lichten Querschnitt auf $125 \times 125 \text{ mm}^2$ reduziert. Die Messungen werden mit einem Hochleistungslasersystem (Fa. Litron) und einer Hochgeschwindigkeitskamera (Phantom V12, max. Auflösung $1280 \times 800 \text{ px}$) durchgeführt. Für die Partikelbeladung der Strömung werden Bärlappsporen ($\overline{d_p} = 30 \text{ }\mu\text{m}$, $\rho \approx 0,4 \text{ g/cm}^3$) verwendet. Um den

Ein- als auch Auslassbereich des Filtergewebes optisch zu erfassen wird ein 50 mm Objektiv genutzt, wodurch sich ein Sichtbereich von etwa 200 x 125 mm ergibt.

Die Versuche werden mit einem konstanten Volumenstrom von $Q = 5400 \text{ l/min}$, was etwa $u = 6 \text{ m/s}$ Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke entspricht, durchgeführt. Für ein Gewebe (MA22142, Tabelle 1) wurde ein Volumenstrom von $Q = 4465 \text{ l/min}$ gewählt, da ansonsten der Druckverlust am Filter zu hoch ist. Mit der Geschwindigkeit, dem Partikeldurchmesser und mit der Annahme das ein Partikel eine Strecke von $s = 300 \text{ mm}$ bewältigt um sich vom Einlass der Messstrecke in den Auslass zu bewegen ergibt sich eine Abtastfrequenz von $f_s = 16,67 \text{ Hz}$ für die Messung. Da dies jedoch die maximale Frequenz des Lasers überschreitet wurde f_s auf 15 Hz festgelegt. Für diese werden pro Gewebe jeweils 700 Einzelbilder aufgenommen, wovon die ersten 200 nicht berücksichtigt werden, da der Laser einige Zeit benötigt um die volle Leistung zu erreichen.

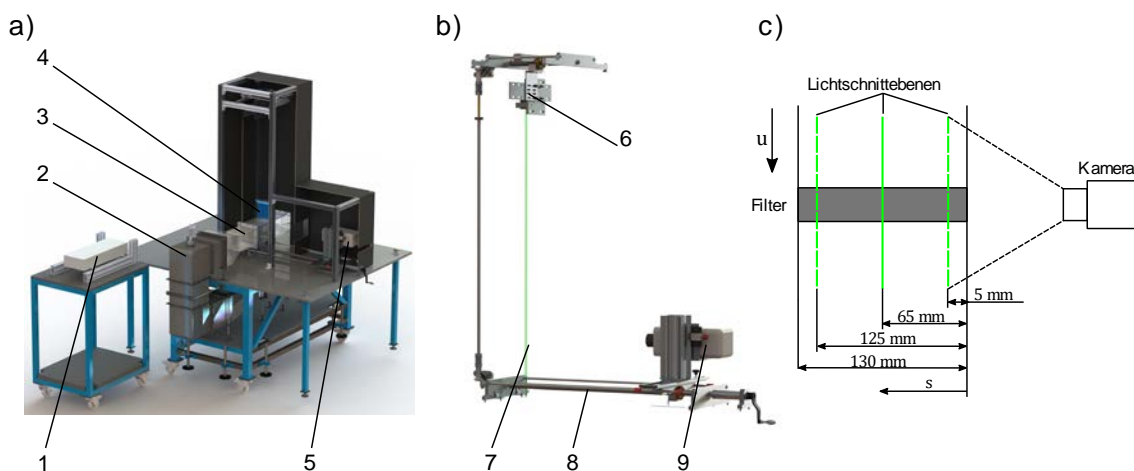


Abbildung 2: a) CAD Darstellung des Versuchsaufbau 1-Lasersystem, 2-Windkanal, 3-transparente Messstrecke, 4-Filtereinschub, b) Laser- und Kamerasystem: 6-Lichtschnittoptik, 7-Lichtschnitt (exemplarisch), 8-Umlenkgetriebe, 9- Kamera, c) Prinzipskizze

Die Versuche werden mit 5 verschiedenen Geweben durchgeführt, Fokus liegt hierbei auf der Funktionsweise der Methode, denn als auf den Filtrationseigenschaften der einzelnen Gewebe. Die Gewebe unterscheiden sich vorrangig auf der Webung, Fadenstärke und Faserabstand als auch ihrer Form. Die Messungen wurden an den Ebenen 25 mm, 45 mm, 65 mm, 85 mm und 105 mm durchgeführt. Die Gewebe sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Gewebeparameter laut Hersteller

Gewebebezeichnung (Hersteller)	Faser	Fadenstärke	Faserabstand	Bearbeitung des Gewebes
MA15000	Monofil	85 μm	200-250 μm	keine
MA15686	multifil	1000 μm + 100 μm	300-350 μm	keine
MA15781	multifil	1000 μm + 100 μm	300-350 μm	keine
MA22142	monofil	150 μm	50-100 μm	plissiert

Bildauswertung und Partikelzählung

Die Bilder werden wie in Abbildung 3 dargestellt mit einem selbst geschriebenen Matlab-Skript hinsichtlich der Partikelanzahl ausgewertet. Dabei kommen eine Hintergrundentfernung (siehe

Mendez et al., 2017) und ein Partikelzähler für Partikel-Tracking Anwendungen (siehe Heyman, 2019), beides jeweils implementiert in frei verfügbaren Matlabskripten, zum Einsatz. Im ersten Schritt wird der Hintergrund vom Rohbild entfernt, so dass nur die Partikel auf den Bildern erkennbar sind. In einem zweiten Schritt werden der Einlauf- und der Auslaufbereich maskiert (Region of Interest, kurz: ROI). Die Partikel werden für den Zeitpunkt t_1 im Einlass und für den Zeitpunkt t_2 im Auslauf des Filters gezählt. In der Praxis bedeutet dies, dass die Partikel im Einlass für Bild 1 und im Auslass für Bild 2 gezählt werden. So wird sichergestellt, dass die Partikel zwischen den Aufnahmen von Bild 1 nach Bild 2 „gewandert“ sind.

Die Partikel unterscheiden sich auf Grund der Beleuchtung in ihrer Helligkeit, was sich in unterschiedlichen Grauwerten auf den Rohbildern widerspiegelt. Für die Partikeldetektion muss daher ein Schwellwert vorgegeben werden, damit eventuelle Geisterpartikel außerhalb der Lichtschneitebene nicht erfasst werden.

Je nach Wahl dieses Schwellwertes I zwischen 0 und 1 werden entweder weniger oder mehr Partikel in den ROIs detektiert. Dadurch wird das Messergebnis unter Umständen verfälscht. Zum jetzigen Zeitpunkt muss daher der Grenzwert vom Nutzer manuell und passend zu den aufgenommenen Bildern eingestellt werden. Erste Versuche zeigten jedoch, dass die Anzahl der Partikel keine große Änderung erfährt. Außerdem müssen die Sichtfenster der Messstrecke regelmäßig gesäubert werden, da die Tracerpartikel diese während der Messung sehr schnell verblocken.

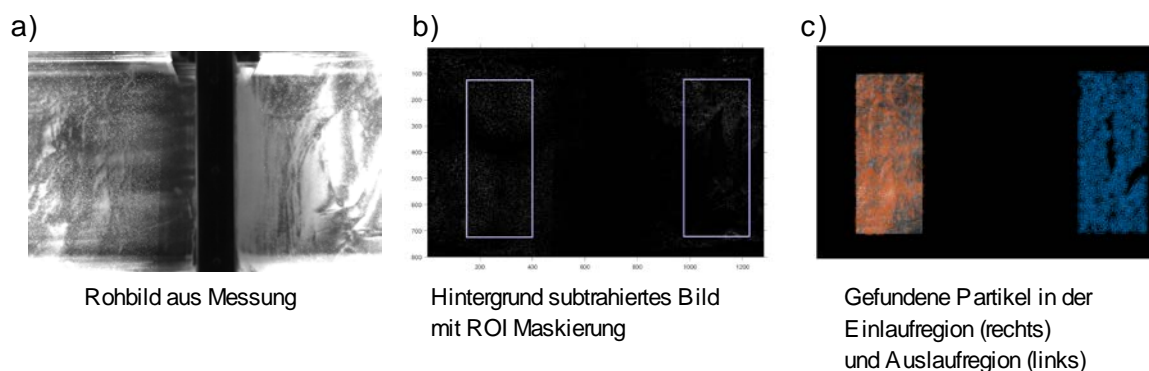


Abbildung 3: Bildauswertung zur Partikelzählung: a) Rohbild, b) Hintergrund subtrahiertes Bild mit ROI Maskierung, c) gefundene Partikel innerhalb der ROI

Der Filtrationsabscheidegrad R wird nach mit der folgenden Beziehung aus den gefundenen Partikeln bestimmt.

$$R = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}}$$

Wobei N_{in} die Partikelzahl in der Einlassregion des Filters bezeichnet und N_{out} die gefundenen Partikel im Nachlauf des Filters beschreibt.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 4 und Tabelle 2 dargestellt. Die Balkendiagramme zeigen den gemessenen Filtrationsabscheidegrad R in Abhängigkeit von der Messebene k . Es werden die Ergebnisse für einen Schwellwert von $I = 0,25$ gezeigt. Generell fällt auf, dass die Webung des Stoffes MA15000 einen hohen Partikeldurchsatz aufweist, während

die größeren Gewebe als auch die plissierten Variante einen hohen Filtrationsgrad aufweisen. Wie in Tabelle 1 aufgeführt, bestehen die Gewebe entweder aus Monofilamenten oder Multifilamenten. Daraus resultiert das im Vergleich sehr schlechte Filtrationsverhalten des Gewebes MA15000, während die größeren Fäden der Gewebe MA15686 und MA15781 die Filterfähigkeit verstärken. Das Plissee auf Grundlage des Gewebes MA22142 erzielte in den Versuchen die höchsten Filtrationsabscheidegrade (siehe Tabelle 2).

Wie Abbildung 4 außerdem zeigt, unterscheiden sich die ermittelten Filtrationsabscheidegrade unter den einzelnen Messebenen. Diese Unterschiede ergeben sich aus Verschattungen oder lokalen Verblockungen, z.B. wenn der Lichtschnitt genau auf eine Faser bzw. Lücke im Gewebe trifft. Die Abweichungen der Messungen sind aber dennoch tolerierbar, da der Filter eine räumliche Struktur aufweist und sich nicht anhand von punktuellen Messungen charakterisieren lässt. Tabelle 2 fasst den mittleren Filtrationsabscheidegrad \bar{R} über alle Messebenen pro Gewebe zusammen.

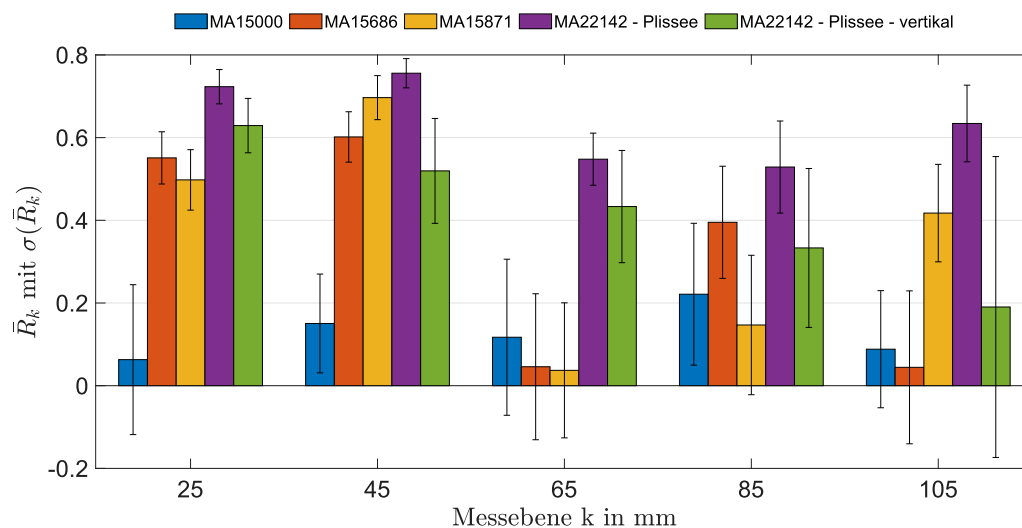


Abbildung 4: Ergebnisse für $I = 0,25$ mit der zugehörigen Standardabweichung.

Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass das System sensitiv gegenüber dem gewählten Schwellwert ist. Liegt dieser zu niedrig werden nur sehr dunkle Partikel gefunden, wird der Wert zu hoch gesetzt, so werden eventuell helle Partikel und Bildbereiche vermischt. Beide Fälle können zu einer verfälschten Partikelzählung führen. Außerdem könnten an der Wand haftende Partikel durch die Hintergrundentfernung nicht entfernt werden, so dass diese „stationären“ Partikel ebenfalls in der Zählung auftauchen. Eine Anpassung der Laserleistung führt hier jedoch schnell zu Ergebnisverbesserungen.

Tabelle 2: Mittlerer Filtrationsabscheidegrad \bar{R}_k der verwendeten Gewebe.

Gewebe	MA15000	MA15686	MA15871	MA22142-Pliseee	MA22142-Pliseee vertikal
$\bar{R} (I = 0,25)$	0,1280	0,3276	0,3592	0,6379	0,4211

Ausgehend von den vorgestellten Ergebnissen, lässt sich die Methode als eine sehr gute Alternative zu konventionellen Messmethoden heranziehen, um die Filtrationseigenschaften von Gewebefiltern zu bewerten. Mit der Methodik lassen sich Filtergewebe berühr- und kontaktlos

mittels optischer Methoden charakterisieren und bewerten. Durch die Anordnung von Kamera und Lichtschnittoptik lässt sich der Filter über das gesamte Volumen untersuchen, wodurch lokale Fehlerquellen wie Verschattungen oder Verblockungen in der Gesamtleistung des Filters nicht ins Gewicht fallen. Zukünftige Arbeiten sehen außerdem die Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes für die verschiedenen Ebene vor um Rückschlüsse auf die Filtrationseigenschaften zu erhalten.

Danksagung

Das Projekt wurde im Rahmen des ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) gefördert (Förderkennzeichen: 16KN049470). Darüber hinaus danken wir unserer mechanischen Werkstatt für die Fertigung des Versuchsaufbaus und den hilfreichen Hinweisen während der Planungsphase. Außerdem danken wir Frau Mahsa Mohammadi, die uns bei den Messungen tatkräftig unterstützt hat.

References

- Berthold, F.** (1999). Ein neues Zellenmodell zur Bestimmung von Abscheidegrad und Druckverlust der in der Klimatechnik verwendeten Filtermedien. *Dissertation*, Universität GHS Essen.
- Bílek, P. and Šidlof, P.** (2014). Detection of damage of a filter by visualization of filtration process. *EPJ Web of Conferences*. **67**, 1–8. doi:10.1051/epjconf/20146702008.
- Bragoszewska, E. and Biedroń, I.** (2018). Indoor air quality and potential health risk impacts of exposure to antibiotic resistant bacteria in an office rooms in southern poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. **15**. doi:10.3390/ijerph15112604.
- Chen, C. W., Huang, S. H., Chiang, C. M., Hsiao, T. C. and Chen, C. C.** (2008). Filter quality of pleated filter cartridges. *Annals of Occupational Hygiene*. **52**, 207–212. doi:10.1093/annhyg/men008.
- DIN EN ISO 29463** (2019). Schwebstofffilter und Filtermedien zur Abscheidung von Partikeln aus der Luft – Teil 5: Prüfverfahren für Filterelemente (.).
- Gilbert, Y., Veillette, M. and Duchaine, C.** (2010). Airborne bacteria and antibiotic resistance genes in hospital rooms. *Aerobiologia*. **26**, 185–194. doi:10.1007/s10453-010-9155-1.
- Heyman, J.** (2019). TracTrac: A fast multi-object tracking algorithm for motion estimation. *Computers & Geosciences*. **128**, 11–18. doi:10.1016/j.cageo.2019.03.007.
- Mendez, M. A., Raiola, M., Masullo, A., Discetti, S., Ianiro, A., Theunissen, R. and Buchlin, J.-M.** (2017). POD-based background removal for particle image velocimetry. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **80**, 181–192. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.08.021.
- Wenke, C., Pospiech, J., Reutter, T., Truyen, U. and Speck, S.** (2017). Efficiency of different air filter types for pig facilities at laboratory scale. *PLoS ONE*. **12**, 1–12. doi:10.1371/journal.pone.0186558.