

Abscheideeffizienz von Mund-Nasen-Schutz Masken, selbstgenähten Gesichtsmasken und potentiellen Maskenmaterialien

Messungen durchgeführt am Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz Abteilung Partikelchemie

Dr. Frank Drewnick und Team

16.4.2020

Ziel der hier präsentierten Messungen ist es, die Abscheideeffizienz von gewöhnlichen Haushaltsmaterialien für luftgetragene Partikel zu untersuchen, auch im Vergleich zur Abscheideeffizienz zertifizierter OP-Masken. Hierdurch soll die Auswahl von Materialien zur eigenen Herstellung von Gesichtsmasken unterstützt werden. Für diese Arbeiten wurden aus Messgeräten, die sonst zur Untersuchung des atmosphärischen Aerosols genutzt werden, zwei einfache Messaufbauten zusammengestellt. Der eine Aufbau erlaubt die Messung von Abscheideeffizienzen flacher Materialien sowie selbstgenähter Gesichtsmasken für "kleine" Partikel mit Durchmessern von 30 nm bis 500 nm. Der zweite Aufbau ist zur Messung von Abscheideeffizienzen flacher und geformter Masken im Partikeldurchmesserbereich von 30 nm bis 10 μm geeignet. Zum Vergleich: Das SARS-CoV2 Virus ist etwa 100 nm groß, wird beim Niesen, Husten, oder Sprechen aber in wesentlich größeren Tröpfchen transportiert.

Versuchsaufbauten und Versuchsdurchführung

Messaufbau 1

Monodisperses Aerosol (ein Aerosol mit Partikeln einer definierten Partikelgröße) wird mit einem Vernebler (TSI Atomizer, Modell 3076) durch Zerstäuben einer NaCl Lösung, Trocknen in einem Aerosoltrockner (Silicagel) und anschließende Größenselektion mit einem elektrostatischen Klassierer (TSI Electrostatic Classifier, Modell 3082) erzeugt. Das auf diese Weise hergestellte Aerosol enthält ausschließlich elektrisch geladene Partikel. Zur Untersuchung des Einflusses des Partikel-Ladungszustandes auf das Abscheideverhalten kann ein Aerosol-Neutralisator hinter den Klassierer gesetzt werden, der die elektrische Ladung der Partikel in ein Gleichgewicht bringt und dadurch die Partikel teilweise entlädt.

Das Aerosol wird turbulent mit einem Überschuss an gefilterter Luft gemischt, um die benötigte Flussrate zu erzeugen. Das so erzeugte Aerosol wird anschließend durch das zu beprobende Masken-Material geleitet (Durchmesser der beaufschlagten Maske: ca. 66 mm, die Proben werden flach in einen Strömungskanal eingespannt). Die Volumenflussrate durch die Probe wird mit Hilfe einer Pumpe, einem regulierbaren Ventil und einem Flussmessgerät eingestellt. Die Partikelkonzentration wird mit zwei Kondensationskernzählern (TSI Wasser-CPCs, Modell 3787 und 3788) parallel vor und hinter der Probe bestimmt. Aus dem Verhältnis der Partikelkonzentrationen wird die

Abscheideeffizienz berechnet. Zusätzlich wird der Druckabfall an der Probe mittels Druckmessung vor und hinter der Probe bestimmt. Der Messaufbau ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

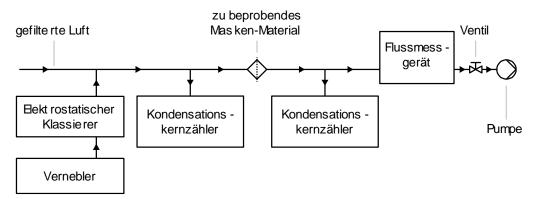




Abb.1: Schema und Abbildung des Versuchsaufbaus zur Messung der Abscheideeffizienz für kleine Partikel

Für jede Probe wird die Abscheideeffizienz für 30 nm, 100 nm und 500 nm große Partikel (geometrischer Partikeldurchmesser) jeweils für eine Flussrate von 10 und 25 l/min durch die Probe bestimmt. Jede Messung besteht aus zwei Phasen von jeweils einer Minute Messdauer; zwischen den beiden Messphasen werden die Kondensationskernzähler ausgetauscht, so dass Unterschiede in der Messeffizienz der Geräte ausgeglichen werden. Aus den so gemessenen mittleren Partikelkonzentrationen werden jeweils die Abscheideeffizienzen berechnet. Alle Messungen werden sowohl ohne als auch mit zusätzlichem Aerosol-Neutralizer hinter dem Klassierer durchgeführt, um den Einfluss der Partikelladung auf die Abscheidung im Probenmaterial zu testen.

Messaufbau 2

In diesem Messaufbau wird Umgebungsaerosol durch das Probenmaterial gesaugt und die Partikelkonzentration sowohl in der Außenluft als auch hinter der Probe größenselektiv gemessen. Hierzu wird die Probe mittels geeigneter Adapter auf ein Probenahme-Gehäuse gespannt. Über ein Flussmessgerät, ein regulierbares Ventil und eine Pumpe wird ein definierter Volumenstrom durch das Gehäuse gesaugt. Die Partikelkonzentration wird parallel mit je einem optischen Partikelspektrometer (Optical Particle Counter OPC, Grimm, Modell 1.109) im Inneren des Probenahme-Gehäuses (stromabwärts des Probenmaterials) sowie in der Außenluft, unmittelbar neben dem Lufteinlass des Gehäuses, größenselektiv gemessen. Diese Messung liefert partikelgrößenabhängige Konzentrationen im Bereich von 250 Nanometern bis 10 Mikrometer. Zur Minimierung von Partikel-Transportverlusten großer Partikel (>1 Mikrometer) sind alle Probenahmeleitungen senkrecht angeordnet. Zusätzlich wird mit einem scannenden Partikelspektrometer (Scanning Mobility Particle Sizer SMPS, TSI, Modell 3938) die partikelgrößenabhängige Konzentration im Bereich von 30 bis 400 Nanometern abwechselnd im Probenahme-Gehäuse und in der Außenluft gemessen. Der Messaufbau ist schematisch in Abb. 2 dargestellt.

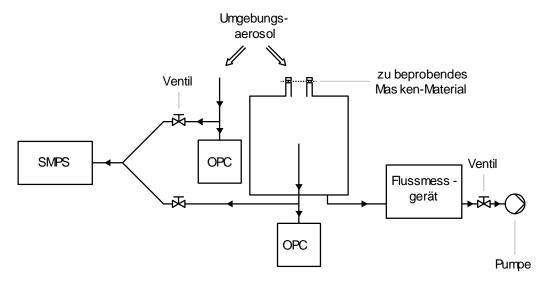




Abb. 2: Schema und Abbildung des Versuchsaufbaus zur Messung von Abscheideeffizienzen von Partikeln im Größenbereich 30 nm bis 10 μ m.

Zur Korrektur möglicher Messeffizienz-Unterschiede zwischen den beiden optischen Partikelspektrometern wird zunächst eine Messung ohne Probenmaterial durchgeführt. Der eigentliche Messzyklus besteht zunächst aus einer 5-minütigen Stabilisierungsphase, gefolgt von einer 20-minütigen Messung der Größenverteilungen mit den OPCs. Parallel dazu wird abwechselnd je dreimal die Größenverteilung mit dem SMPS in der Außenluft und stromabwärts des Probenmaterials gemessen. Die mittels OPC gemessenen "optischen" Partikelgrößen werden in geometrische Partikelgrößen umgerechnet. Aus dem Verhältnis der mittleren Partikelkonzentration bei einzelnen Partikelgrößen wird die Abscheideeffizienz des Probenmaterials für die jeweilige Partikelgröße bestimmt. Jede Messung wird bei zwei Volumenflussraten durch die Probe durchgeführt, die – je nach Fläche des jeweiligen Probenadapters – so gewählt sind, dass sie zu gleichen Flussgeschwindigkeiten wie bei den Messungen mit Aufbau 1 ("niedrige Flussrate" bzw. "hohe Flussrate") führen.

Hintergrund und Ergebnisse

Die Abscheidung von Partikeln auf Filtern geschieht vor allem durch vier Prozesse (s. Abb. 3):

- Partikel, deren Flugbahn durch das Filtermaterial einer Faser des Materials so nahekommen, dass sie sie berühren, können an der Faser haften bleiben (Interzeption). Dieser Prozess wird mit zunehmendem Partikeldurchmesser effizienter.
- Partikel, deren Trägheit so groß ist, dass sie der Ablenkung der Strömung um eine Faser des Filtermaterials nicht folgen können, prallen auf die Faser und können an ihr haften bleiben (Impaktion). Dieser Prozess wird mit zunehmendem Partikeldurchmesser und zunehmender Strömungsgeschwindigkeit effizienter.
- Partikel führen zusätzlich zu ihrer Bewegung mit der Luftströmung eine Diffusionsbewegung innerhalb der Strömung durch. Wenn sie hierdurch auf eine Faser des Filtermaterials treffen, können sie an ihr haften bleiben (Diffusions-Abscheidung). Dieser Prozess wird mit abnehmender Partikelgröße und längerer Aufenthaltszeit der Luft im Filtervolumen (d.h. geringerer Strömungsgeschwindigkeit) effizienter.
- Im elektrischen Feld um eine elektrostatisch geladene Faser können Partikel, die selbst elektrisch geladen sind oder in denen eine elektrische Polarisation durch das elektrische Feld erzeugt wird, abgelenkt werden und hierdurch auf Fasern gelenkt werden (elektrostatische Abscheidung). Dieser Prozess wird mit abnehmender Partikelgröße und längerer Aufenthaltszeit der Luft im Filtervolumen effizienter.

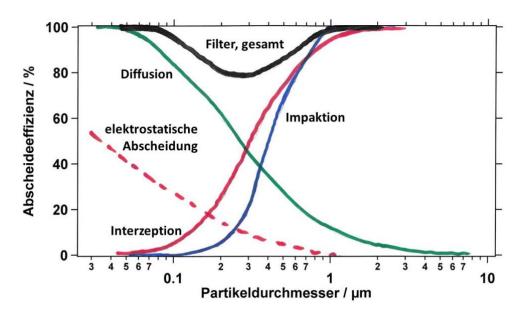


Abb. 3: Partikelgrößenabhängigkeit der unterschiedlichen Abscheidemechanismen (schematisch). Die gesamte Abscheideeffizienz eines Filters besitzt ein Minimum für Partikel von wenigen hundert Nanometern Durchmesser.

Aufgrund der unterschiedlichen Abhängigkeiten der Abscheideprozesse von der Partikelgröße sowie teilweise von der Ladung der Partikel und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft durch das Filtermedium ergibt sich ein komplexes Gesamtbild. Generell werden Partikel im "mittleren" Größenbereich von wenigen hundert Nanometern Durchmesser mit der geringsten Effizienz

abgeschieden. Um die Abhängigkeiten der Partikelabscheidung von den verschiedenen Abscheideprozessen abzubilden, wurden unterschiedliche Messbedingungen realisiert:

Messung für Partikel unterschiedlicher Durchmesser:

- 30 nm: Diese Messung zeigt den Grenzfall der Abscheidung für extrem kleine Partikel
- 100 nm: Ungefähr der Durchmesser einzelner SARS-CoV-2 Viren (ca. 60 140 nm)
- 500 nm: Der Durchmesser größerer Partikelagglomerate oder Tröpfchenresiduen
- 1, 2.5, 5 und 10 μm: Durchmesser kleiner und mittlerer Tröpfchen, wie sie z.B. beim Sprechen, Husten oder Niesen entstehen können. Hierbei entstehen jedoch auch deutlich größere Tröpfchen, die jedoch schnell zu Boden sinken.

Messung bei unterschiedlichen Flussraten:

- Niedrige Flussrate: 10 l/min bei 66 mm Probendurchmesser (entsprechend angepasste Flussraten bei anderen Probendurchmessern)
- Hohe Flussrate: 25 I/min bei 66 mm Probendurchmesser (dito)

Messung mit unterschiedlich stark elektrisch geladenen Partikeln (nur 30, 100 und 500 nm Partikel):

- Komplett geladene Partikel: Der elektrostatische Klassierer selektiert ausschließlich geladene Partikel. Das hiermit erzeugte Aerosol ist daher komplett elektrisch geladen.
- Neutralisiertes Aerosol: Durch einen zusätzlichen Aerosol Neutralisator wird das Aerosol ins "Ladungsgleichgewicht" gebracht. Es ist teilweise elektrisch geladen.
- Umgebungsaerosol: Je nach Herkunft des Aerosols in der Umgebung sind die Partikel mehr oder weniger stark elektrisch geladen.

Im Einzelnen wurden folgende Materialien untersucht (Abb. 4):

- Staubsaugerbeutel 2: MicroPor® Staubsaugerbeutel (1-lagig)
- Staubsaugerbeutel 1: einfaches Staubsaugerbeutel-Vlies (1-lagig)
- Baumwolle + Staubsaugerbeutel Backupfilter: Backup Filter für Staubsauger zwischen zwei Lagen einfachem Baumwollstoff
- OP-Maske 1: Handelsübliche OP-Maske (grün, zum Vergleich)
- Maske 1: Selbstgenähte Maske aus 2 Lagen einfachem Baumwollstoff
- Maske 2: Selbstgenähte Maske aus 1 Lage T-Shirt Stoff und 1 Lage Biber-Bettwäsche
- Maske 3: Selbstgenähte Maske aus 2 Lagen fester Baumwolle
- Maske 4: Alternatives Maskendesign mit zwei Halbmasken, die in der Gesichtsmitte zusammengenäht wurden; 2 Lagen feste Baumwolle
- Maske 5: Selbstgenähte Maske aus 3 Lagen einfachem Baumwollstoff
- OP-Eigenbau: Material entsprechend selbstgenähter OP-Masken vergangener Zeiten aus 2
 Lagen einfachem Baumwollstoff mit 4 Lagen Verbandmull (Verbandtuch) dazwischen
- Jersey: regulärer T-Shirt Stoff (2-lagig)
- Bügelvlies (Nähzubehör) zwischen zwei Lagen einfachem Baumwollstoff
- Molton-Tuch: 1-lagig
- Molton-Tuch: 2-lagig
- Mikrofasertuch: Einfaches Mikrofaser-Putztuch mit dünner Perforation (1-lagig)
- Mikrofasertuch Frottee (1-lagig)
- Küchenrolle (2-lagig) mit dazwischen gelegtem Papiertaschentuch (1-lagig)
- Spülhandtuch (2-lagig)

- Musselin (2-lagig)
- Kaffeefilter

Nach dem 10.04.2020 gemessene Materialien:

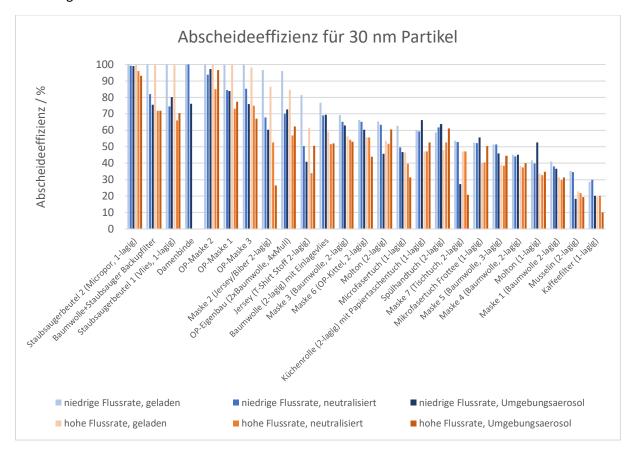
- OP-Maske 2: Handelsübliche OP-Maske (blau, zum Vergleich)
- OP-Maske 3: Handelsübliche OP-Maske (violett, zum Vergleich)
- Maske 6: Selbstgenähte Maske aus 2 Lagen OP-Kittel
- Maske 7: Selbstgenähte Maske aus 2 Lagen Tischtuch
- Damenbinde (1-lagig)

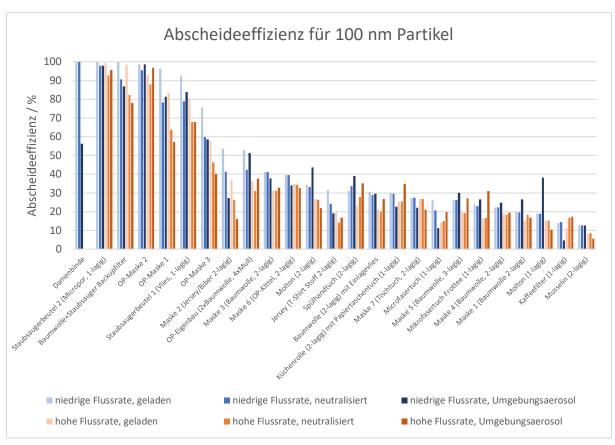


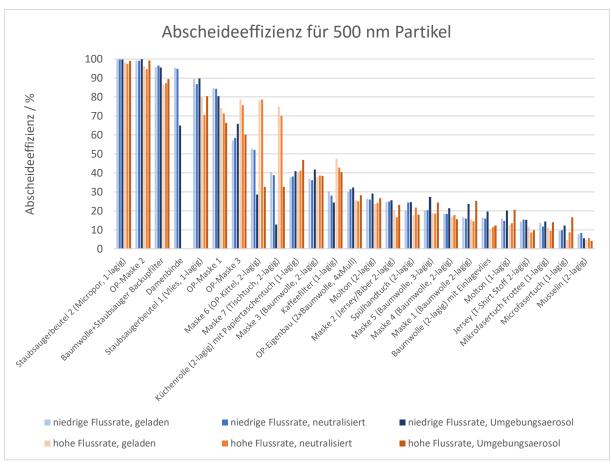
Abb. 4: Untersuchte Materialien und Masken in derselben Reihenfolge (links oben nach rechts unten) wie in obiger Liste (nach dem 10.04.2020 hinzugekommene Stoffe sind nicht abgebildet).

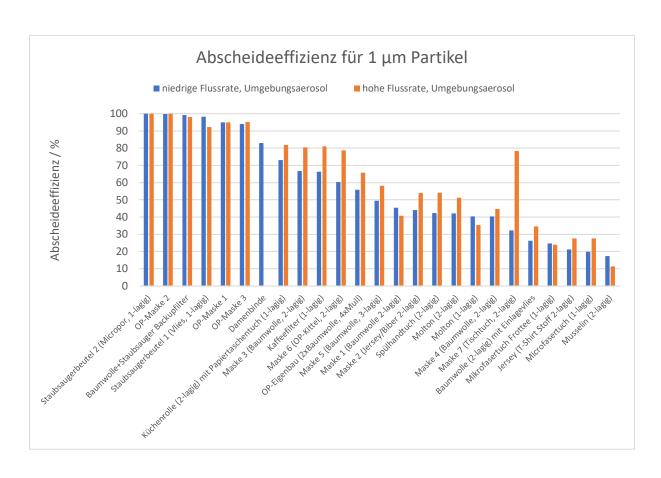
Im Folgenden sind erste Ergebnisse von Abscheideeffizienzen an einer Reihe von möglichen Maskenmaterialien dargestellt:

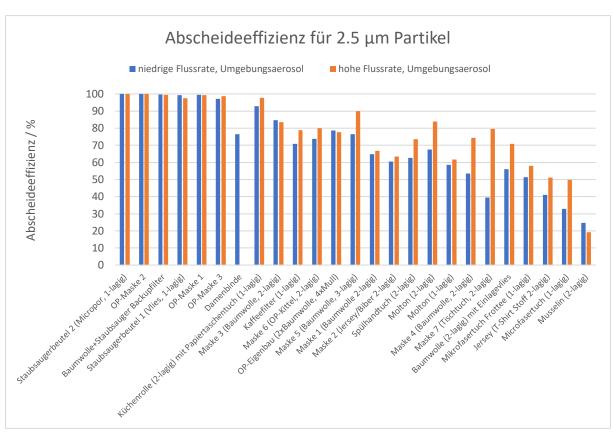
Die Sortierung der Materialproben erfolgte unterschiedlich, tendenziell von hoher Abscheideeffizienz zu niedriger.

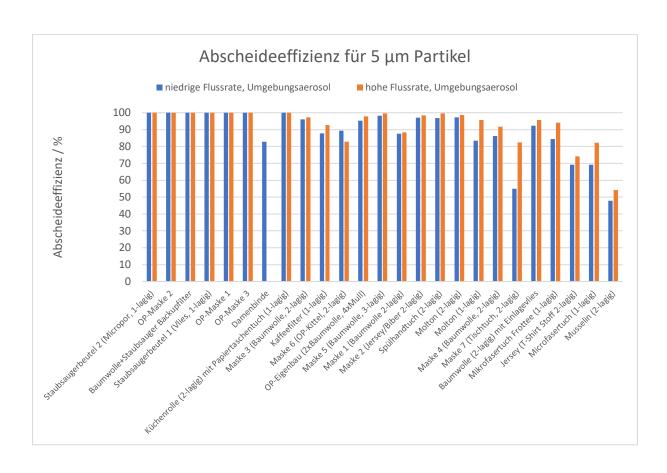


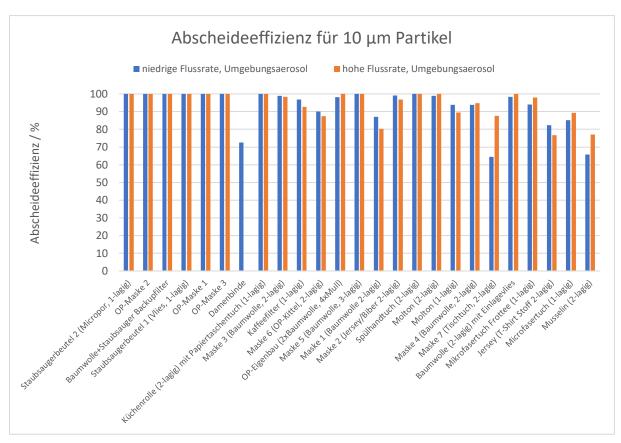




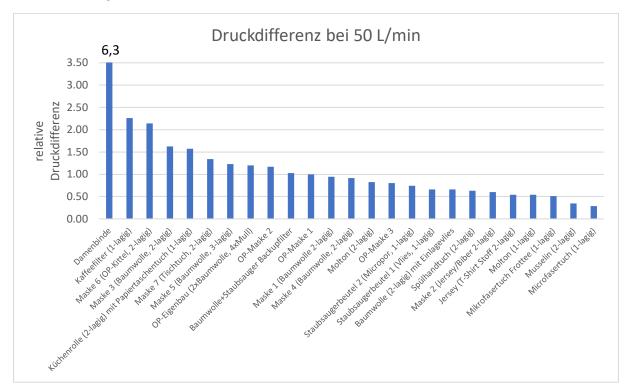








Die Druckdifferenz wurde an den Proben bei deutlich erhöhter Flussrate gemessen. Diese Werte dienen lediglich zum Vergleich der unterschiedlichen Materialien untereinander und sind daher auf die Druckdifferenz, die an der OP-Maske gemessen wurde, bezogen. Anmerkung: Der Wert für die Damenbinde ragt erheblich über den Achsenbereich hinaus.



Fazit

- Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in der Abscheideeffizienz in Abhängigkeit der Partikelgröße. Insbesondere große Partikel (Durchmesser von 5 μm und größer) werden von allen untersuchten Materialien sehr effizient abgeschieden. Tröpfchen, die beim Husten, Niesen und Sprechen entstehen, finden sich vorwiegend im Mikrometerbereich. Die geringste Abscheideeffizienz findet man für Partikel mit Durchmessern um 100 nm bis 500 nm, also in dem Bereich, in dem die Größe des SARS-CoV 2 liegt. Die Höhe dieses Abscheideminimums hängt jedoch stark vom verwendeten Material ab. Noch kleinere Partikel werden in der Regel wiederum effizienter abgeschieden.
- Es wurden auch deutliche Unterschiede in der Abscheideeffizienz für unterschiedliche Materialien gefunden. Vor allem einige Kunstfaser-Materialien scheiden sehr kleine Partikel besonders gut ab. Die Abscheideeffizienz für größere Partikel hängt dagegen eher von der Struktur der Materialien ab. Dichtere Stoffe scheiden diese Partikel zumeist besser ab als weniger dicht gearbeitete Stoffe.
- Die Messungen an der Damenbinde waren schlecht reproduzierbar, da sich das Füllmaterial in der Binde zwischen den Messungen stark verschieben kann. Hierdurch ändert sich das Abscheideverhalten deutlich. Die in den Diagrammen dargestellten Werte für große Partikel sind der Mittelwert von drei unabhängigen Messungen. Aufgrund des sehr hohen Druckabfalls an der Damenbinde war eine Messung bei der hohen Flussrate nicht möglich (die Binde wurde bei der hohen Flussrate aufgerissen).
- Erhebliche Unterschiede (bis zu Faktor 8) findet man in den Werten für den Druckabfall, der beim Durchströmen der Materialien gemessen wurde. Diese Größe bestimmt auch wesentlich mit, wie leicht sich durch diese Materialien atmen lässt.
- Bei der Auswahl geeigneter Materialien für selbstgenähte Masken dürfen allerdings auch weitere Eigenschaften der eingesetzten Stoffe wie Hautverträglichkeit oder mögliche Abgabe gesundheitsschädlicher Substanzen durch die Materialien nicht außeracht gelassen werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen ausschließlich die Abscheideeigenschaften der untersuchten Proben für Partikel im Größenbereich von 30 nm bis 10 μm und stellen daher keine Empfehlung für die Auswahl von geeigneten Materialien oder gar Beurteilung des Schutzes einer hieraus hergestellten Maske dar!
- Die Messungen zeigen deutliche Unterschiede der Abscheideeffizienz ähnlicher Textilien, die sich z.B. durch ihre Materialstärke oder –dichte unterscheiden. Da bisher nur eine geringe Anzahl an Proben untersucht wurde, lassen sich allgemeingültige Aussagen noch nicht treffen. Hierzu muss erst eine systematische und umfangreichere Studie durchgeführt werden.
- In keinem Fall können die hier präsentierten Ergebnisse eine Aussage über den Eigen- oder Fremdschutz geben, der mit einer Maske aus einem der untersuchten Materialien erzielt wird. Dieser hängt neben der Abscheideeffizienz auch von einer Vielzahl anderer Faktoren ab, wie Nebenflüssen an der Maske vorbei, Sitz und Handhabung der Maske, Art und Häufigkeit der Reinigung der Maske, und anderen.