Abscheide- und Abklingverhalten von Aerosolpartikeln

Ein Vergleich zwischen Feinfiltern und HEPA-Filtern

Viele, sogenannte „Luftreiniger“ werden heute mit HEPA-Filtern (High-Efficiency Particulate Air / Arrestance-Filter) ausgestattet. Diese scheiden mehr als 99,9 Prozent der Aerosolpartikel aus dem Luftstrom ab. Untersuchungen an der Universität der Bundeswehr München haben die Reinigungswirkung von Luftreinigern mit HEPA-Filtern aufgezeigt. In diesen Untersuchungen werden Feinfilter als Alternative explizit nicht empfohlen. Mit HEPA-Filtern der Klasse H14 werde laut der Studie eine hohe Sicherheit bei Luftreinigern erreicht. Diese Aussage hat sich als Stand des Wissens etabliert. Aber stimmen diese Aussagen überhaupt oder sind sie sogar irreführend und suggerieren eine Sicherheit, die gar nicht erreicht werden kann?

TEXT: *Christoph Kaup*

Aktuell gilt die respiratorische Aufnahme von SARS-CoV-2 als ein wesentlicher Infektionsweg [1]. Laut Untersuchungen der Universität der Bundeswehr stellen Raumluftreiniger mit großem Volumenstrom und hochwertigen Filtern der Klasse H14 eine sehr sinnvolle technische Lösung dar, um in Räumen die indirekte Infektionsgefahr durch Aerosole stark zu verringern [2]. Eine Feinfilterung mit F7-Qualität (äquivalent ISO ePM1 60 %) wird dagegen kritisiert. „Selbst eine zehnfache Filterung des Aerosols mit einem Filter der Klasse F7 liefert laut dieser Studie ein schlechteres Abscheideergebnis als die einfache Filterung mit einem Filter der Klasse H14. Die Annahme, dass ein großer Volumenstrom mit einem F7-Filter zu vergleichbaren Ergebnissen führt wie ein H14-Filter bei kleinem Volumenstrom ist daher laut der Autoren nicht plausibel für die betrachtete Größenklasse (0,3 bis 1 µm).“ Laut einer zweiten Studie aus gleicher Quelle wird diese Aussage wiederholt und manifestiert: „Die beim Atmen, Sprechen, Singen und Husten erzeugten Tröpfchen und die sich daraus durch Verdunstung bildenden Tröpfchenkerne sind nur bis zu wenigen Mikrometer groß und daher können sie nur mit wirklich hochwertigen Filtern der Klasse H14 nahezu vollständig und effizient abgeschieden werden. Das Argument, dass dieser Abscheidegrad auch mit einem einfachen Filter durch Mehrfachfilterung erreicht werden kann, konnte in früheren Versuchen nicht bestätigt werden. Dieses Argument ist aber auch nicht zielführend, da dieser Ansatz eine Verdoppelung oder sogar Vervielfachung der geforderten Luftwechselrate erfordern würde, um eine vergleichbare Sicherheit vor einer Infektion zu erreichen, wie sie mit einem Filter der Klasse H14 beim einmaligen Durchströmen erreicht wird. Das ist technisch kaum realisierbar und die Behaglichkeit im Raum würde unter dem Lärm und dem Luftzug leiden.“ [3]

Die bisherigen normativen Aussagen zu Feinfiltern beziehen sich immer auf eine zweistufige Filterung, die seit langer Zeit Stand der Technik ist, und nicht auf eine einzige Feinfilterstufe, wie sie die genannte Studie voraussetzt und untersucht hat. Laut VDI 3803 wird eine Filterung der Außenluft mit Feinfiltern der Klasse ISO ePM1 60 % (erste Filterstufe) und ISO ePM1 60 % (zweite Filterstufe) empfohlen.

Um diesen Ansatz zu verifizieren, wurden umfangreiche Messungen am Hermann-Rietschel-Institut der TU Berlin (HRI) und am Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden (ILK) durch-

geführt. Im Rahmen der Aerosolmessungen des HRI wurden sieben verschiedene Filter in drei unterschiedlichen Filter-Bauarten in einem Lüftungsgerät der Howatherm Klimatechnik GmbH unter realen Einbaubedingungen untersucht. Dabei wurden die folgenden Filter in verschiedenen Kombinationen verwendet: Kompaktfilter, Taschenfilter und Paneelfilter. Deren Spezifizierung und Kombinationen sowie eine zusammenfassende Übersicht der Abscheidungsleistungen aller Filter für die Partikelgröße 0,3 bis 0,5 µm ist in **Bild 1** dargestellt [4]. Zu sehen sind die Mittelwerte als Punkt sowie die Antennen des jeweiligen Konfidenzintervalls. Mit der normativ empfohlenen Filterkombination werden laut den vorliegenden Messergebnissen zwischen rund 80 und über 90 Prozent der relevanten Aerosolpartikel aus dem Luftstrom abgeschieden.

Ergänzende Versuche mit Aerosolpartikeln unter 0,3 µm

Am ILK Dresden wurde eine Filterkombination ISO ePM1 55 % (1. Filterstufe) und ISO ePM1 70 % (2. Filterstufe) sowie eine Filterkombination ISO ePM1 55 % (1. Filterstufe) und ISO ePM1 80 % (2. Filterstufe) ebenfalls messtechnisch im Einbauzustand im Lüftungsgerät untersucht. Hier allerdings im Aerosolbereich von 0,1 bis 0,25 µm, da das SARS-CoV-2-Virus eine Größe von 0,08 bis 0,14 µm [5] hat.

Das geprüfte Gerät mit der Filterkombination ISO ePM1 55 % (1. Filterstufe, äquivalent F7) und ISO ePM1 70 % (2. Filterstufe, äquivalent F8) weist damit für Partikel mit einem Durchmesser von 0,1 bis 0,15 µm einen Abscheidegrad von 87,5 Prozent auf, Aerosolpartikel mit einer Größe zwischen 0,15 und 0,20 µm wurden auf demselben Niveau abgeschieden. Die Abscheideleistung von Aerosolpartikeln mit einer Größe zwischen 0,20 und 0,25 µm betrug 89,6 Prozent. Der Volumenstrom betrug während der Messung 645 m³/h, bezogen auf ein halbes Normfilterelement, also 1 300 m³/h bezogen auf eine vergleichbare Normfiltergröße, die in den Messungen des HRI mit 2 000 m³/h untersucht wurden.

Die analoge Messung am HRI ergab für die vergleichbare Filterqualität (Paneelfilter) einen Abscheidegrad von 83,1 Prozent im Bereich von 0,3 bis 0,5 µm, jedoch bei einem spezifischen Volumenstrom, der um 54 Prozent über dem Volumenstrom der Messung des ILK lag.

Die Messung des ILK Dresden mit einer Filterkombination ISO ePM1 55 %- Filter (äquivalent F7) in der ersten Stufe und einem ISO ePM1 80 %-Filter (äquivalent F9) in der zweiten Stufe ergab eine Abscheideleistung von 94 Prozent, bezogen auf eine Partikelgröße von 0,15 bis 0,2 µm [6]. Ergänzend wurde die Abscheideleistung einer HEPA-Filterstufe H13 als zweite Filterstufe untersucht. Der Abscheidegrad dieser Filterkombination (ISO ePM1 55 % und HEPA H13) lag im Einbauzustand bei 99,9 Prozent.

Auswirkungen auf die Abklingkurve in einem Raum

Die Filterungswirkung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Abscheidung von Partikeln im Luftstrom des Geräts. Der Einfluss auf die Partikelanzahl im Raum wird jedoch nur zu einem Teil durch die Filterabscheidegrade bestimmt. Denn auch der Volumenstrom des Geräts, wie ebenfalls die Lüftungseffektivität der

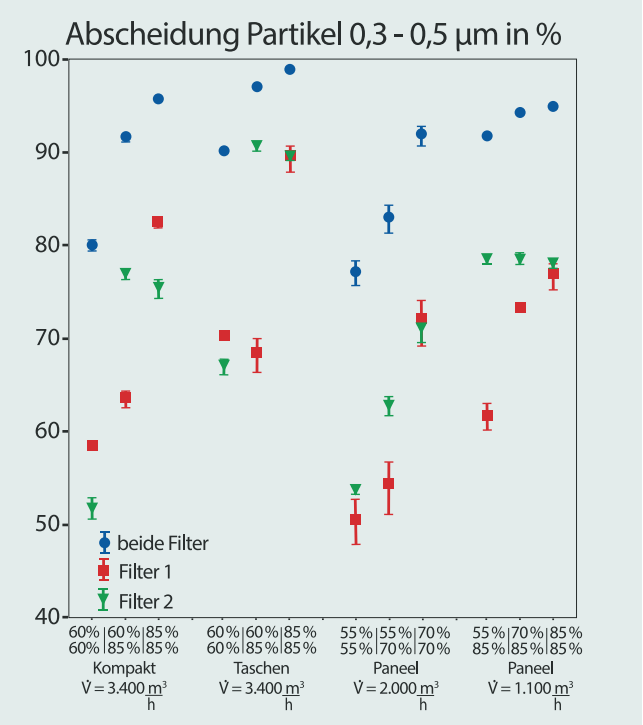

Bild 1: Abscheidungsleistung der Feinfilter bei Aerosolen von Partikelgröße 0,3 bis 0,5 µm für alle untersuchten Filterkombinationen.
Grafik: HRI der TU Berlin

Raumströmung sowie eventuell vorhandene Kurzschlussströme, haben einen großen Einfluss auf das Abklingverhalten der Aerosolpartikel im Raum.

Die Effektivität nur auf Basis der Filterungswirkung zu bestimmen, kann zu einer erheblichen Fehlbeurteilung führen. Würde beispielsweise ein Gerät zu 100 Prozent im Kurzschluss betrieben werden, würde selbst eine Filterung mit einem Abscheidegrad von 100 Prozent zu keiner Abnahme der Aerosolpartikel im Raum führen, da in diesem Fall die gereinigte Zuluft sofort wieder vom Gerät angesaugt und damit die Wirkung auf den Raum vollständig verpuffen würde.

Um die Leistungsunterschiede der beiden Filterkombinationen darstellen zu können, wurden zwei vergleichbare Reinigungsgeräte mit identischem Volumenstrom und ansonsten identischem ▶

FUSSNOTEN

1) Robert-Koch-Institut (2020): SARS-CoV-2 Steckbrief zur Coronavirus-Krankheit-2019 (COVID-19), https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html#doc13776792bodyText1, letzter Zugriff: 05.11.2020, 17:00 Uhr.
2) Kähler, C.; Fuchs, T.; Hain, R.: Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren? Universität der Bundeswehr München, Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik.
3) Kähler, C.; Fuchs, T.; Mutsch, B.; Hain, R.: Schulunterricht während der SARS-CoV-2 Pandemie – Welches Konzept ist sicher, realisierbar und ökologisch vertretbar? Universität der Bundeswehr München, Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik.
4) Hartmann, A.; Lange, J.; Schumann, L.; Kriegel, M.; Swiderek, M.; Kaup, C.: Feinfilterkombinationen in RLT-Anlagen, tab 3/2021, S. 48-53.
5) Robert-Koch-Institut (2020): Virologische Basis-Daten SARS-CoV-2, https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Virologische_Basisdaten.html, letzter Zugriff: 13.11.2020, 15:30 Uhr.
6) wie Fußnote 4.

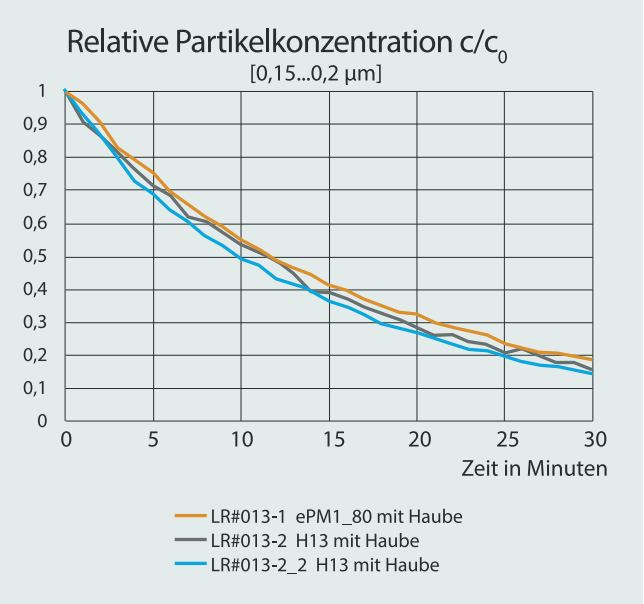

Bild 2: Abklingkurven im Messraum im Vergleich (2. Filterstufe ISO ePM1 80 % versus H13-Filter). *Grafik: ILK Dresden*

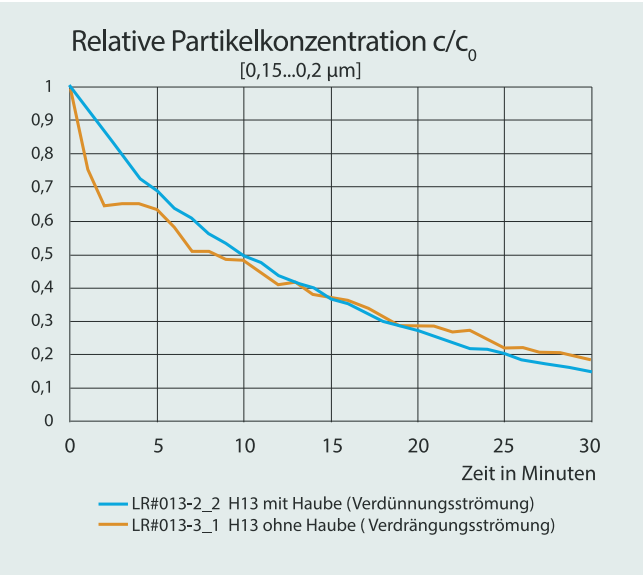

Bild 3: Abklingkurven im Messraum im Vergleich (Verdünnungsströmung versus Verdrängungsströmung). *Grafik: ILK Dresden*

Luftverteilsystem messtechnisch untersucht, lediglich in der zweiten Filterstufe unterschieden sich die Geräte (HEPA H13 versus ePM1 80 %).

Messverfahren der Erholzeit

Um eine effiziente Reduzierung der Ansteckungsgefahr darzustellen, kann der Reinigungsgrad der Raumluft im Sinne einer „Erholzeit“ bestimmt werden. Die Erholzeitmessung ist ein Prüfverfahren zur Beurteilung von Lüftungsanlagen in Reinräumen. Zuerst werden luftgetragene Tropfen mit einem Durchmesser von 0,1 bis 2 µm in den Raum eingebracht. Anschließend wird untersucht, ob die Anlage fähig ist, innerhalb einer begrenzten Zeitspanne den Partikelgehalt wieder auf ein bestimmtes Maß zu reduzieren. Nach welcher Zeit die angestrebte Partikelkonzentration erreicht werden kann, hängt neben der Abscheideleistung der eingesetzten Filterstufen auch von der Strömungsführung im Raum und dem Luftvolumenstrom des Luftreinigungsgeräts ab. Gelingt es zudem, unerwünschte Kurzschlussströme zu vermeiden, kann mit einem geeigneten Luftreinigungsgerät die Aerosolkonzentration im Raum innerhalb einer kurzen Zeitspanne auf eine Zielkonzentration reduziert werden.

Die Erholzeit wird als Messgröße ermittelt, welche jenseits von subjektiven Erwartungen auf Basis der Geräteausstattung oder der Beobachtung der Strömung im Raum die Leistung hinsichtlich der Reinigungswirkung messbar macht und den Vergleich verschiedenartiger Geräte ermöglicht. Die gebräuchlichste Methode zur Messung der Erholzeit ist die Abklingmethode. Sie kann sehr einfach über die kurzzeitige Injektion eines Tracers angewendet werden. Um die Reinigungsleistung der Raumluftreiniger zu ermitteln wurde in Analogie dazu als Tracer ein Aerosol über einen Nebel-Generator mit einem Nebel-Fluid in die Raumluft eingebracht.

Die Messung der Raumluftkonzentration an Aerosol wurde im Minutentakt durchgeführt. Da der Raum keinen Luftaustausch mit der Umgebung während der Messung hat, ist das Abklingen der Konzentration auf den Raumluftreiniger zurückzuführen.

Die Messung der Konzentration der Aerosolpartikel erfolgte mit einem optischen Partikelzähler. Dabei wurde die Aerosolkonzentration mit einer Probenentnahmesonde in einer Höhe von 1 350 mm erfasst – entsprechend dem Atembereich in Kopfhöhe einer sitzenden Person. Um eine koinzidenzfreie Messung durchführen zu können, war dem optischen Partikelzähler eine Verdünnungsstufe (Verhältnis 1:100) vorgeschaltet.

Parallel wurde das Abklingen der Konzentration an einem zweiten Messpunkt analog bestimmt, mit einer Probeentnahme in Kopfhöhe einer stehenden Person.

Nach Inbetriebnahme des Luftreinigungsgeräts wurde mit einem Nebelgenerator ein Aerosol aufgegeben und eine möglichst hohe Aerosolkonzentration unterhalb der Koinzidenzschwelle des Partikelzählers realisiert. Nach Vergleichmäßigung und Homogenisierung des Aerosols im Prüfraum mit 200 m³ Raumvolumen wurde die Messung mittels optischer Partikelzähler gestartet. Auf Grund des gewählten Messintervalls wurde hiernach das Abklingen der Aerosolkonzentration mit einer Auflösung von einer Minute über einen Zeitraum von 30 bis 45 Minuten bestimmt.

Die Luftbehandlungsrate (LR) lag im Versuch bei rund LR = 3,7 h^{-1} mit einem Nennvolumenstrom von 750 m³/h und einem Raumvolumen von 200 m³.

Einfluss der Filterabscheideleistung

Bild 2 zeigt die Abklingkurven der Partikelkonzentration bei Verwendung von zwei unterschiedlichen Filterkombinationen. Die graue Linie stellt die Partikelkonzentration bei Nutzung einer HEPA-Filterstufe H13 dar. Der Abscheidegrad lag hier bei 99,9 Prozent. Im direkten Vergleich zeigt die orangefarbene Linie die Abklingkurve, die mit einem ISO ePM1 80 %-Filter in der zweiten Filterstufe mit einem relevanten Abscheidegrad von

94 Prozent erreicht wurde. Die Volumenströme waren mit 750 m³/h in beiden Fällen im Rahmen der Messtoleranz identisch (761 m³/h mit ePM1 80 % zu 733 m³/h mit H13). Beide Varianten wurden mit einem Vorfilter der Klasse ISO ePM1 55 % (1. Filterstufe) betrieben.

Beide Abklingkurven sind im Rahmen der Messtoleranz nahezu identisch. Dies zeigte insbesondere eine erneute Validierungsmessung (blaue Linie), die eine Wiederholung der ersten Messung mit H13-Filter (graue Linie) darstellt. Beide Kennlinien zeigen somit die Messunsicherheit einer identischen Messung.

Zur Reduktion der Partikelkonzentration um 50 Prozent, wurde mit beiden Varianten eine Erholzeit von rund zwölf Minuten benötigt. Bei der erneuten Messung mit identischem H13-Filter lag die Erholzeit (in diesem Fall die Halbwertszeit) bei rund zehn Minuten.

Eine Reduktion um 80 Prozent wurde mit Hilfe des H13-Filters nach 25 Minuten erreicht. Mit der ePM1 80 %- Filterstufe wurden 28 Minuten benötigt.

Eine weitere Erhöhung der Filterklasse von H13 auf H14, wie sie von der Universität der Bundeswehr empfohlen wird, würde zu keiner weiteren Verbesserung der Erholzeit führen, da sich die „Verbesserung“ des Abscheidegrades in der dritten Stelle hinter dem Komma erst recht in der Messtoleranz der Abklingkurve verlieren würde. Dies umso mehr, da der relevante Betrachtungsfokus auf der Partikelkonzentration im Raum liegt und nicht auf der Partikelkonzentration im Luftstrom innerhalb des Geräts (vor und hinter dem Filter). Demnach würde eine so geringe Verbesserung des Filterabscheidegrads zu keiner relevanten Verbesserung im Raum führen.

Die Reinigungsleistung (RL) des Geräts im Partikelgrößenbereich von 0,15 bis 0,2 µm lag mit H13-Filter bei RL = 3,6 h^{-1} und damit fast bei der theoretisch maximalen RL, die der Luftbehandlungsrate von LR = 3,7 h^{-1} entspricht. Dies kann mit geringen Kurzschlussströmungsanteilen erklärt werden. Mit Feinfilter ePM1 80 % lag die Reinigungsleistung aufgrund des etwas niedrigeren Abscheidegrads bei RL = 3,3 h^{-1}, also rund um acht Prozent niedriger als mit H13-Filter. Würde der Volumenstrom im Luftreiniger mit Feinfilter ePM1 80 % um neun Prozent angehoben, wäre das Ergebnis mit dem Gerät mit H13-Filter identisch.

Einfluss der Raumströmungsform

Bild 3 zeigt die Abklingkurven der Partikelkonzentration bei Verwendung von zwei unterschiedlichen Luftauslässen aber identischem Filtersystem.

Die blaue Linie repräsentiert einen Mischluftaufsatz, der mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von rund 6 m/s die Luft mit hohem Impuls in den Raum induziert und damit eine Verdünnungsströmung im Raum aufbaut, während die orangefarbene Linie den Wert ohne Haube zeigt. Dadurch wurde ▶

Bild 4: Raumströmung Verdünnungsströmung (Mischlüftung).
Bild: Howatherm

Bild 5: Raumströmung Verdrängungsströmung (Quelllüftung).
Bild: Howatherm

die Luft impulsarm mit einer Geschwindigkeit unter 1 m/s in den Raum eingebracht und so eine Verdrängungsströmung erreicht. Es handelt sich allerdings nicht um eine typische Quelllüftung, da der Luftströmung systembedingt keine Untertemperatur aufgeprägt werden konnte.

Zu erkennen ist der charakteristische Verlauf beider Strömungsformen. Während die Verdünnungsströmung einer stetigen und exponentiellen Funktion folgt, verläuft die Abnahme der Verdrängungsströmung sprunghaft. Im ersten Bereich der Abklingkurve erscheint die Verdrängungsströmung der Verdünnungsströmung überlegen zu sein, da die Abnahme schneller erfolgt. Aufgrund des unstetigen Verlaufs sind die Messergebnisse jedoch mit Vorsicht zu bewerten.

Unterhalb der relativen Partikelkonzentration von 50 Prozent, also ab einer Zeit von zehn Minuten, verlaufen die beiden Abklingkurven nahezu parallel. Erst ab einer Zeit von rund 20 Minuten ergeben sich Vorteile für die Verdünnungsströmung, wobei die Unterschiede nahezu im Rahmen der Messtoleranz liegen (vergleiche Bild 2). Die Reinigungsleistung des Geräts mit Verdrängungsströmung lag bei RL = 3,0 h^{-1}, also rund um 17 Prozent niedriger als beim vergleichbaren Gerät, das mit einer Verdünnungsströmung (RL = 3,6 h^{-1}) arbeitet. Die deutlich unterschiedliche Verteilung der Raumströmung bei Mischlüftung und Quelllüftung (mit und ohne Mischluftaufsatz) zeigen **Bild 4** und **Bild 5**.

Auswertung und Diskussion

Mit den normativ geforderten, zwei hintereinander geschalteten Feinfiltern kann eine deutliche Reduktion der Partikelkonzentration auch in der für virenbeladene Aerosolpartikel kritischen Größenklasse von 0,3 bis 0,5 µm erreicht werden. Diese liegt im ungünstigsten Fall mit zwei Filtern der Klasse ISO ePM1 55 % oder 60 % (äquivalent F7) bei mindestens 75 bis 80 Prozent und kann mit gleicher Qualität je nach Bauart und Hersteller auch rund 90 Prozent erreichen.

Laut den Messungen am ILK in Dresden wurden Abscheidegrade in einer ähnlichen Größenordnung selbst im Bereich von 0,1 bis 0,25 µm ermittelt.

Damit ist die negative Beurteilung der Universität der Bundeswehr zur Wirkung von Feinfiltern bei der Abscheidung von Aersolpartikeln auch für die betrachtete Größenklasse 0,3 bis 1 µm widerlegt. Dies gilt umso mehr, wenn die Wirkung auf den Raum betrachtet wird. Die Abklingkurven, bezogen auf den Raum, werden eben nicht nur durch den Abscheidegrad, sondern auch durch die Luftmenge und die Strömungsform im Raum bestimmt. Dies zeigen die Messungen der Abklingkurven deutlich.

Auch mit Feinfilterkombinationen können, bezogen auf den Raum, nennenswerte Abscheideleistungen erreicht werden. Die unsinnige Festlegung auf den Abscheidegrad von HEPA-Filtern mit über 99,9 Prozent suggeriert eine trügerische Sicherheit, die, bezogen auf den Raum, überhaupt nicht aussagekräftig ist, da auch mit HEPA-Filtern der Klasse H14 der Raum nicht unmittelbar und vollständig von Partikeln befreit werden kann.

Diese falsche Interpretation ist jedoch sogar in der Fachöffentlichkeit immer wieder anzutreffen. Selbst die Universität der Bundeswehr nährt mit ihrer Forderung nach HEPA-Filtern diese Fehlinterpretation. Es ist eben nicht so, dass eine Verdopplung oder sogar Vervielfachung der geforderten Luftbehandlungsrate erforderlich wird, um mit Feinfiltern einen vergleichbaren, sicheren Schutz vor einer Infektion zu erreichen. Dies zeigen die durchgeführten Untersuchungen des ILK.

Und da Feinfilter deutlich geringere Luftwiderstände aufweisen als HEPA-Filter wird die Effizienz verbessert. Dazu kommt noch die wesentlich größere Staubspeicherkapazität. Es empfehlen sich die Feinfilter also nicht nur zur Effizienzsteigerung, sondern auch zur Kosteneinsparung. ■

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld und Geschäftsführender Gesellschafter der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.
Bild: Howatherm

© VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2021