

➤ Grundlagen Filtertechnik

Vorwort

Um unseren Kunden einige der vielen Fragen rund um die Luftfiltration im Vorwege zu beantworten, haben wir Mitte 2002 unseren kleinen Leitfaden „Grundlagen der Filtertechnik“ als Download im Internet zur Verfügung gestellt.

Dieses Dokument wird stetig überarbeitet, um auch Einflüsse aktueller Richtlinien, Normen und Forschung zu berücksichtigen.

Die „Grundlagen der Filtertechnik“ können den Fachbereich nur in Ausschnitten und stark komprimierte Informationen über Teilbereiche bieten. Wir haben uns bemüht das Wesentliche für Sie herauszuarbeiten. Gern möchten wir Ihre Wünsche bei der Weiterentwicklung berücksichtigen und freuen uns deshalb über ein entsprechendes Feedback.

Ihr Luftfilterbau Team



Wir erfüllen höchste Ansprüche dank unseres zertifizierten Qualitäts- und Umweltmanagement gemäß ISO 9001, ISO 14001 und Regel KTA 1401.

Grundlagen der Filtertechnik. 4

Atmosphärische Luft	4
Staub macht Filter notwendig	4
Die Größe der (Staub-) Partikel	7
Staub- und Partikelkonzentrationen	8
Bedeutung der Staubbegrenzung.	9
Luft - Ein Lebensmittel mit Hygieneanspruch	10
Wirkprinzipien der Partikelabscheidung	12
Luftfilter	13
Grobstaubfilter	15
Feinstaubfilter und Schwebstofffilter	16
Adsorption von gasförmigen Luftverunreinigungen und Gerüchen (Molekular- / Sorptionsfilter).	17
Gängige Filternormen	20
EN 779, ehemalige Norm für Grob- und Feinstaubfilter	20
ISO 16890 aktuelle Norm für Grob- und Feinstaubfilter	23
Eurovent 4/21 Energieklassen für ISO 16890 ePMx Filter . . .	26
EN 1822 und ISO 29463 Normen für HEPA und ULPA Filter .	28
EN 1822-4 Scantest	30
EN 1822-4 Scantestbericht	31
EN 1822-4 Ölfadentest	32
ISO 29461 Ansaugfiltersysteme von Rotationsmaschinen. . .	33
ISO 10121-3 Klassifizierungssystem für Gasphasenfilter zur Behandlung von Außenluft	36
Übersicht der gängigen Filternormen, Fraktionsgrößen & Abscheidemöglichkeiten.	40
Anwendungsgebiete entsprechend der Filterklassen.	42
Standzeit der Filter.	44
Staubkonzentration, Form und Größenverteilung der Partikel in atmosphärischer Luft.	45
Staubspeichervermögen und Abscheidegrad der Luftfilter . .	46
Abhängigkeit Volumenstrom zu Filterwiderstand in einer lufttechnischen Anlage	46
Handhabung von Luftfiltern	47
Stichworte	49
Literaturhinweise	55

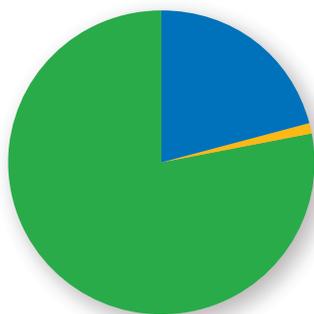
Atmosphärische Luft

Luft besteht aus einer Mischung verschiedener Gase. Normale atmosphärische Luft enthält 21 % Sauerstoff, 78 % Stickstoff, 1% Argon und 0,03 % Kohlendioxid. Daneben kommen noch geringe Mengen anderer Gase, wie Wasserstoff, Neon, Krypton, Helium, Ozon und Xenon sowie unterschiedliche Mengen von Wasserdampf, vor.

Luft ist das wichtigste „Nahrungsmittel“ für uns Menschen. Unterschiede in der prozentualen Zusammensetzung der Normalluft können sie für Mensch und Tier unbrauchbar machen. Bei atmosphärischem Druck sind schon kurzzeitige Sauerstoffgehalte unter 12 % und Kohlendioxidgehalte über 5 % gefährlich. Über längere Zeiträume können sogar geringe Änderungen der Zusammensetzung der Luft gesundheitsschädlich wirken.

Der Mensch verbraucht stündlich etwa 30 Liter Sauerstoff. Der Luftbedarf ist mit etwa 150 [Liter/h] oder 0,15 [m³/h] Frischluft ziemlich gering. Aufgrund der Eigenerzeugung von Kohlendioxid benötigt der Mensch jedoch etwa 5 [m³/h] Luft, um den Kohlendioxidgehalt unter einer gefährlichen Grenze zu halten.

Bei der Auslegung von Klimaanlage genügt es in der Regel, den Luftbedarf mit 15-20 [m³] pro Person und Stunde festzulegen. Größere Luftmengen können demnach für den jeweiligen Anwendungszweck, wie z. B. Transport von Wärme, Kälte und zum Abführen von Luftverunreinigungen, erforderlich sein.



- 78 % Stickstoff
- 21 % Sauerstoff
- 1 % andere Gase und Partikel

Hauptbestandteile der Außenluft :		Volumenanteil [%]	relativer Anstieg / Jahr
Stickstoff	N ₂	78,08	
Sauerstoff	O ₂	20,95	
Argon	Ar	0,93	
Kohlendioxid	CO ₂	0,034	0,03 - 0,04%
Neon	Ne	0,0018	
Helium	He	0,0005	
Methan	CH ₄	0,00016	
Krypton	Kr	0,00011	
Wasserstoff	H ₂	0,00005	
Distickstoffmonoxid	N ₂ O	0,00003	
Kohlemonoxid	CO	0,00002	
Xenon	Xe	0,000009	

Staub macht Filter notwendig

In der Luft befinden sich eine Menge verschiedener Fremdstoffe hervorgerufen von natürlichen Prozessen, wie Winderosion, Verdunstung von den Meeren, Bodenerschütterungen und Verbrennungsprodukte von industriellen Prozessen, Autoabgasen, verschiedene Materialbearbeitungsvorgänge usw.

Atmosphärischer Staub stellt eine Mischung aus Nebel, Rauchgasen, trockenen körnigen Partikeln sowie Fasern dar. Eine Analyse der Luft ergibt gewöhnlich das Vorhandensein von Ruß und Rauch, Quarz, Lehm, Spuren von verwitterten Tieren und Pflanzen, organischen Materialien in Form von Baumwoll- und Pflanzenfasern sowie Metallfragmenten. Sie enthält ferner Organismen, wie Keime, Sporen und Pollen von Pflanzen. Diese in der Luft oder in Gasen schwebenden Partikel werden „Aerosole“ genannt. Obwohl die Verunreinigungen in kleinen Mengen in normaler Luft vorkommen, haben sie eine entscheidende Bedeutung für unsere Umwelt. Elektrische Effekte in der Atmosphäre, Absorption von Sonnenstrahlung und Wolkenbildung werden mehr oder weniger von den Verunreinigungen in der Luft beeinflusst. Besonders augenfällig ist die Wirkung der atmosphärischen Verunreinigungen bei Materialien (z.B. Gebäudekorrosion) und Lebewesen. Um schädliche Effekte durch luftgetragene Partikel abzuwenden, müssen Partikel unterschiedlichster Größen aus der Luft gefiltert werden.

Aus gesundheitlicher Sicht ist neben dem Schadstoffgehalt des Staubes die Größe der Staubpartikel der entscheidende Parameter. Partikel mit einem Durchmesser größer als 10 [µm] (1 Mikrometer = 1/1000 Millimeter), der sog. Grobstaub, bleibt mehr oder minder gut an den Nasenhärchen oder den Schleimhäuten des Nasen-Rachenraums hängen. Kleinere und kleinste Staubpartikel (Feinstaub, ultrafeine Partikel) können über die Luftröhre und die Bronchien bis tief in die Lunge vordringen. Daher wird der Feinstaub auch als inhalierbarer bzw. als lungengängiger (alveolengängiger) Feinstaub bezeichnet.

Allgemein anerkannte Bezeichnungen für Feinstaub existieren allerdings nicht. In der Regel wird unter Feinstaub Staub mit einer Partikelgröße kleiner als 10 μm (PM10) verstanden. Die Staubfraktionen mit einer Partikelgröße $<0,4 \mu\text{m}$ werden als Schwebstoffe bezeichnet.

Unter PM10 ist Feinstaub mit einem Durchmesser bis 10 μm (Particulate Matter 10 μm) zu verstehen. Diese Messgröße wurde an den automatischen Messstationen zu Beginn des Jahres 2000 eingeführt, da sie in den ersten EU-Richtlinien als Bezugsgröße für Partikel vorgesehen ist. In den Jahren davor war bei den Staubmessungen die Konzentration des Gesamtstaubes bestimmt worden.

Staub kann prinzipiell durch verschiedene Prozesse entstehen:

- die mechanische Bearbeitung von Feststoffen (Zerkleinern, Oberflächenbearbeitung, Abrieb, etc.),
- physikalische Einflüsse auf Feststoffe (z.B. Erosion durch Wind und Wetter),
- durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre unter Partikelbildung (sekundäre Aerosole),
- durch Aufwirbelung von Partikeln (vgl. Definition von Staub).

Die staubbildenden Prozesse können sowohl natürlichen Ursprungs als auch durch den Menschen verursacht sein und werden in primäre und sekundäre Prozesse unterschieden. Bei einem primären Prozess werden die Partikel direkt durch den Prozess erzeugt. Ein primärer anthropogener Prozess ist z.B. die Kohleverbrennung in einem Kraftwerk; das Kraftwerk wird dann als primäre Quelle bezeichnet. Ein primärer natürlicher Prozess ist die Verwitterung von Gestein. Beim sekundären Prozess entstehen die Partikel aus den Reaktionen bestimmter Gase, wobei sich die entstehenden festen Reaktionsprodukte leicht an bereits vorhandene Partikel (sog. Kondensationskerne) anlagern können.

Nennenswerte natürliche Staubquellen sind:

- Bodenerosion,
- Vulkanismus,
- Meere (sea spray),
- Sandstürme,
- Pollenflug,
- Wald- und Buschbrände mit natürlicher Ursache (z.B. Blitzschlag).

Nennenswerte anthropogene Staubquellen sind:

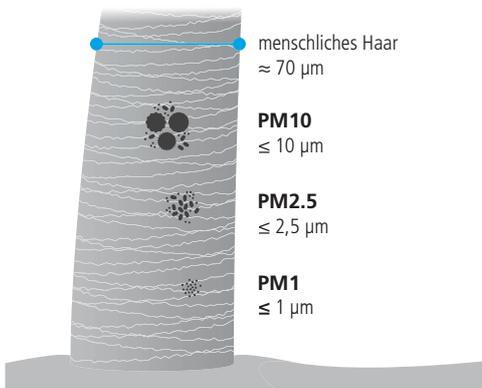
- Industrielle Prozesse,
- Energiegewinnung (Kraft- und Fernheizwerke),
- Verkehr,
- Landwirtschaft,
- Bautätigkeit,
- Haushalte,
- Wald- und Buschbrände (z.B. Brandrodung).



Staubart / Staubquelle	Partikelgröße [μm]
POM*, Wald-/Buschbrände	0 - 2
POM*, fossile Brennstoffe	0 - 2
POM*, Pflanzenzerfall	> 1
Ruß, Wald-/Buschbrände	0 - 2
Ruß, fossile Brennstoffe	0 - 2
Asche und Staub (Vulkane)	< 5
Industrielle Prozesse	> 1
Seesalz	0 - 16
Gesteinsstaub	0 - 20

*POM: Particulate Organic Matter
(partikuläres organisches Material)

Größenvergleich der Feinstaubpartikelfractionen



Die Beiträge der einzelnen Quellen zur Staubbelastung (oder genauer zur Schwebstaubbelastung, da man u.a. auch den Rauch und Ruß als Partikelquellen berücksichtigen muss) ist unterschiedlich und hängt im Wesentlichen von der lokalen Situation ab. In einem ländlichen Gebiet kann der Gesteinsstaub (Sand, Löss) erheblich zur Staubbelastung beitragen, wohingegen auf einer vielbefahrenen Straße die Staubbelastung aus einem Cocktail von Abriebmaterial (Reifen, Bremsbeläge, Straßenbelag), Schwermetallpartikeln, Ruß, etc. bestehen wird.

Das Umweltbundesamt schätzt, dass der Beitrag zur innerörtlichen Staubbelastung im Wesentlichen drei Quellen zuzuordnen ist:

- etwa 50 % aus der Emission von Dieselfahrzeugen (LKW, Kleinlaster, Busse, PKW),
- etwa 25 % aus dem, was der Verkehr aufwirbelt (Abrieb von Bremsen, Reifen, Straßenbelag),
- etwa 25 % durch ferntransportierte Partikel, das heißt Partikel, die aus weiter entfernt liegenden Quellen stammen.

Staub kann verschiedene Einflüsse auf den Menschen und die Umwelt haben. Im Gegensatz zum Grobstaub kann Feinstaub über die Atemwege bis in die Lunge gelangen. Die toxikologische Wirkung beruht vor allem auf dem Gehalt an Stoffen, wie Blei, Vanadium, Beryllium und Quecksilber, von denen einige die Entstehung von Krebserkrankungen fördern. Zudem lagern sich an der Oberfläche der winzigen Staubteilchen andere Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe, Schwefel- oder Stickstoffverbindungen an, sodass deren Wirkung bei gleichzeitiger Anwesenheit von Staub verstärkt wird. Allgemein erzeugt Staub eine Erhöhung der Zahl von Erkrankungen der Atmungsorgane, wie z.B. Grippe, Lungenentzündung und Asthma. Neben gesundheitsschädlichen Aspekten ist der Einfluss von Partikeln auf das Klima ein wichtiger Aspekt aktueller Forschung.



Die Größe der (Staub-) Partikel

Die Größe von Partikeln wird in μm (Mikrometer) angegeben, d.h. $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ oder ein tausendstel Millimeter. Die Partikel kommen in der Atmosphäre in der Größe von weniger als $0,01 \mu\text{m}$ bis zu der Größe von Fasern, Laub und Insekten vor. Fast alle denkbaren Formen und Größen sind vertreten.

Die natürliche Reinigung der Atmosphäre erfolgt durch Regen. Ob ein Gleichgewicht zwischen dem erzeugten und dem zurückgeführten Staub besteht, ist nicht eindeutig geklärt. Messungen der Sonneneinstrahlung zeigen eindeutig, dass die Staubbilddung der äußeren Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen hat.

Partikel unter $0,1 \mu\text{m}$ benehmen sich annähernd wie Gasmoleküle. Sie wandern nach dem Gesetz von Brown ohne eine bestimmte oder messbare Fallgeschwindigkeit.

Partikel in der Größe von $0,1-1 \mu\text{m}$ haben eine Fallgeschwindigkeit, die sich berechnen lässt. Sie ist aber so gering, dass sie für den praktischen Gebrauch keine Bedeutung hat, da die normalen Luftströmungen der Absetztendenz entgegenwirken (\rightarrow Schwebstoffe).

Partikel in der Größe von $1-10 \mu\text{m}$ fallen mit konstanter und zu berechnender Fallgeschwindigkeit. Normale Luftströmungen halten sie im allgemeinen in der Schwebe. Partikel, die größer als $10 \mu\text{m}$ sind, fallen relativ schnell und können sich nur in der Nähe der Entstehungsquelle oder bei entsprechenden Windverhältnissen in der Schwebe halten. Eine Ausnahme bilden hierbei Baumwolle und andere leichte Fasern, wie Teile von manchen Wildkrautsamen, die lange Zeit frei schweben können.

Manche Partikel mit Größen um die $10 \mu\text{m}$ sind unter günstigen Lichtverhältnissen sichtbar. Kleinere Partikel sind bei hohen Konzentrationen mit dem bloßen Auge erkennbar. Ein Beispiel hierfür ist Zigarettenrauch mit einer mittleren Partikelgröße von $0,5 \mu\text{m}$.

Der Begriff Rauch wird gewöhnlich für eine Mischung aus festen Partikeln, flüssigen und gasförmigen Schadstoffen angewendet. Rauch entsteht durch unvollständige Verbrennung organischer Substanzen wie Tabak, Holz, Kohle, Öl usw. Die Größe der Rauchpartikel ist sehr unterschiedlich und meistens kleiner als $1 \mu\text{m}$, oft sogar $0,1-0,3 \mu\text{m}$.

Viren haben eine Größe von $0,005 \mu\text{m}$ bis $0,1 \mu\text{m}$. Sie kommen meistens in Kolonien oder zusammen mit anderen Partikeln vor. Diese Konglomerate werden als Keime bezeichnet. Die Größe der meisten Keime liegt zwischen $0,4$ und $0,5 \mu\text{m}$. Sie werden im allgemeinen durch größere Staubpartikel, an die sie angelagert sind, verbreitet.

Die Größe von Schwammsporen liegt zwischen 10 und $30 \mu\text{m}$ während Pollensamen $10-100 \mu\text{m}$ groß sind. Nebel und Dunst bestehen aus in der Luft schwebenden Tröpfchen, die gewöhnlich durch Kondensation von Dampf, Feinverteilung von Flüssigkeiten durch Sprühen oder Verdunstung einer Flüssigkeit gebildet werden.

Viren

$0,01 - 0,4 \mu\text{m}$
Grippevirus = $0,01 \mu\text{m}$
Tollwut / Masern = $0,018 \mu\text{m}$



Tabakrauch und Aerosole

$0,01 - 1 \mu\text{m}$
Smog = $0,01 - 0,5 \mu\text{m}$



Bakterien

$0,5 - 5 \mu\text{m}$
Pseudomonas = $0,5 - 5 \mu\text{m}$



Sporen

$5 - 15 \mu\text{m}$
Kartoffelbovist-sporen = $8-13 \mu\text{m}$



Fasern / Naturfasern

$5 - 1000 \mu\text{m}$
biopersistente
Glasfaser = $3-20 \mu\text{m}$



Nebel

$15 - 150 \mu\text{m}$

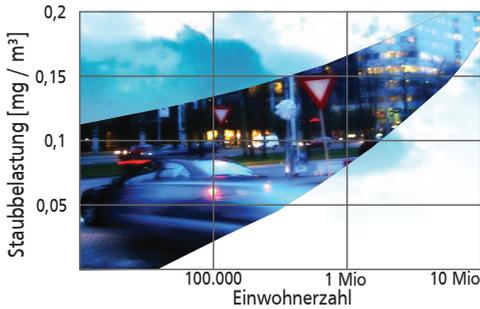


Grobstaub

$60 - 20.000 \mu\text{m}$
Feinsand lt.
DIN 4022 = $63-200 \mu\text{m}$
Tafelsalz = $100 \mu\text{m}$



Staub- und Partikelkonzentrationen



Anfang der sechziger Jahre begann man sich in der Bundesrepublik Deutschland verstärkt für die Spurenstoff-Konzentrationen in der Luft außerhalb der Städte und Ballungsräume zu interessieren. Ziel war es, die Zusammensetzung von „Normalluft“ kennen zu lernen, die als Bezug für biologische und medizinische Wirkungsuntersuchungen in Gebieten mit erhöhten Verunreinigungen der Luft dienen sollte. Unter „Normalluft“ wollte man dabei die über einen größeren Raum und längere Zeit repräsentative Luftzusammensetzung verstehen. Schnell wurde klar, dass der „Reinluft“- Begriff fragwürdig geworden war, denn offenbar kennt die Natur keine räumlich und zeitlich konstante Zusammensetzung der Luft. Vielmehr ist sie ein Spiegel der Aktivitäten des Lebens. Daher war und ist es häufig nicht einfach, die jeweiligen Beiträge von Natur und Mensch zu den Spurenstoffen in der Luft zu erkennen.

Typische umgebungsbezogene Luftverunreinigungen:

Umgebung Außenluft:	Partikel	Konzentration [mg/m³]	Partikelgröße [µm]
Ländlich	Insekten, pflanzliche Stäube (Pollen), erdene Stäube.	0,01 bis 0,1	0,01 bis 3
Stadt	Ruß, Staub, Insekten	0,03 bis 5	0,01 bis 10
Industrie	VOC's, metallurgische Stäube	0,1 bis 10	0,01 bis 50
Wüste	grobe und feine Sandstaubpartikel	0,1 bis 700	1,0 bis 50
Tropisch	Insekten,	0,01 bis 0,25	0,01 bis 10
Arktisch	Schnee, Eis, Insekten	0,01 bis 0,2	0,01 bis 10
Maritim	Salz, Eis, Staub, Insekten	0,01 bis 10	0,01 bis 5
Fahrzeuge	alles	0,01 bis 700	0,01 bis 5

Die Gesamtverteilung und die Konzentration des atmosphärischen Staubes ist je nach Ort, Jahreszeit, Tageszeit usw. sehr unterschiedlich. In einigen Kilometern Höhe ist aber die Verteilung in der Atmosphäre ziemlich konstant, unabhängig davon, ob die Proben über Land oder über dem Meer genommen werden. Die Anzahl der Partikel in der Luft ist verhältnismäßig groß. Ein Kubikmeter gewöhnlicher Umgebungsluft enthält selten weniger als 40 Millionen Partikel in der Größe über 0,1 µm.

Trotz dieser großen Anzahl ist die Konzentration relativ gering. Die mittlere Konzentration der Luftverunreinigungen während eines Jahres liegt in der Regel um 0,025 mg pro Kubikmeter Luft im Gegensatz zu den üblichen Konzentrationen von 200 bis 40.000 mg pro Kubikmeter in der Abluft von Verfahrensprozessen verschiedener Art. In der Herbst- und Winterzeit erhöht sich die Staubkonzentration in der Luft, da natürliche Filtereffekte (z.B. von Bäumen) fehlen und mehr Ruß (z.B. durch Heizanlagen) produziert wird.

Die Luft in Industrieorten und Städten enthält normalerweise Ruß und andere Verbrennungsprodukte. Die Staubkonzentration ist hier höher als auf dem Lande. Die Staubkonzentration schwankt mit den Jahreszeiten.

Mittlere Korngrößenverteilung von Staubpartikeln in Großstadtluft (Menge: 0,075 g/m³ bei 1000 g/m³ Dichte der Luft)

Größenbereich [µm]	mittlere Größe [µm]	Partikelzahl je [m³]	Vol. % = Gew. %
10 - 30	20	50 • 10³	28
5 - 10	7,5	1.750 • 10³	52
3 - 5	4	2.500 • 10³	11
1 - 3	2	10.700 • 10³	6
0,5 - 1	0,75	67.000 • 10³	2
0 - 0,5	0,25	910.000 • 10³	1

Die Anzahl von Partikeln in der Luft ist von der Umgebung abhängig. Hier einige Beispiele von absoluten Partikelanzahlkonzentrationen bei verschiedenen Umgebungen:

- Reinraum: 1 Partikel / Liter
- Arktis: 10.000 Partikel / Liter
- Meeresluft: 100.000 Partikel / Liter
- Ländliches Gebiet: 1.000.000 Partikel / Liter
- Kleinstadt: 100.000.000 Partikel / Liter
- Großstadt: 1.000.000.000 Partikel / Liter
- verrauchte Zimmerluft: >100.000.000.000 Partikel / Liter

Bedeutung der Staubbegrenzung

Die Reinigung der Luft von Staub ist nicht nur für den Unterhalt von Gebäuden und Einrichtungen von wirtschaftlicher Bedeutung, sondern trägt auch zu größerem Wohlbefinden und Gesundheit der Benutzer bei.

Der unmittelbar wahrnehmbare Vorteil gereinigter Luft ist eine verringerte Verschmutzung der Innenwelt. Aufgrund der Vielfalt von Einflüssen können diese und andere Vorteile (z.B. Verringerung von Wartungs- und Reinigungskosten) nicht ohne weiteres in Ziffern angegeben werden. Die Einflüsse und Wirkungen sind mannigfaltig:

Partikel mit großem Verschmutzungspotential, bestehen aus feinem Ruß, dessen Beseitigung hochwertige Filter erfordert. Wärmetauscher, Luftkanäle und Zwischendecken sind große Staubsammler. Kanäle und Zwischendecken sind bekanntlich nur mit großem Aufwand und damit verbundenen Kosten zu reinigen. Im verschmutzten Zustand stellen sie zum einen eine erhebliche Feuergefahr dar, und zum Anderen können Verunreinigungen der luftführenden Kanäle zu einem Gesundheitsrisiko, wie z.B. dem berüchtigten „Sick-Building-Syndrom“ (SBS), führen. An den Wärmetauschern setzen sich bei mangelhafter Vorfiltration vor allem Fasern ab, wodurch gleichsam der Wirkungsgrad sinkt und die Wartungen intensiviert werden müssen.

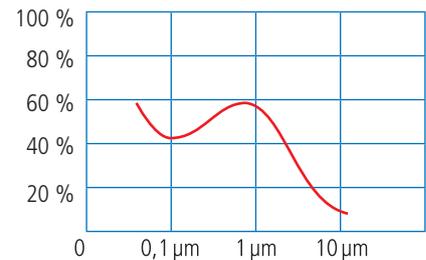
Kieselpartikel tragen zum Verschleiß von Einrichtung bei. Den meisten Menschen ist es eher unbehaglich, Staubschichten oder Ruß auf dem Schreibtisch wahrzunehmen. Fasern verbleiben auf Oberflächen und machen ständiges Abstauben notwendig, wenn die Einrichtung nicht durch eine wirkungsvolle Reinigung der Zuluft vor Staub geschützt wird.

Hohe Staubanteile in der Arbeitsluft können wie bereits erwähnt das sogenannte „Sick-Building-Syndrom“ verursachen, ein Krankheitsbild mit diversen Symptomen. Das „Sick-Building-Syndrom“ kann auch auftreten, wenn das Intervall für den Filterwechsel zu groß gewählt ist. Die Filter haben dann zwar die empfohlene Enddruckdifferenz noch nicht erreicht, sind aber bereits mit z.T. verkeimten Stäuben so beladen, dass sich die vom Filter aufgenommenen Mikroorganismen vermehren und wieder in den Luftstrom abgegeben werden können.

Keime können in der freien Luft vorkommen. Im allgemeinen werden sie jedoch durch Fasern oder andere Partikel übertragen. So können Allergien entstehen bzw. Allergiker erfahren entsprechende Reizsymptome. Rauch, z.B. von Tabak, reizt die Atemwege und besteht aus Partikeln und gasförmigen Luftverunreinigungen, die auf Nichtraucher belästigend wirken. Sie können nur mit wirkungsvollen Schwebstoff- und Aktivkohlefiltern aus Luftströmen entfernt werden.

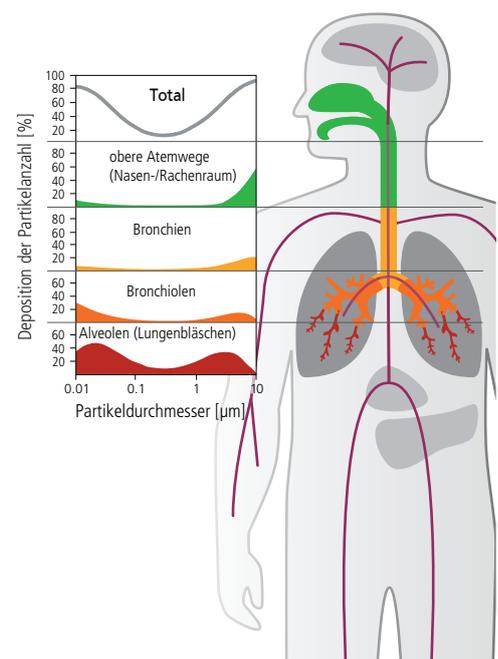
Insbesondere Feinstäube sind stark in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Sie stehen im Verdacht Krebs und andere schwere Krankheiten zu verursachen bzw. zu begünstigen. Das folgende Diagramm zeigt die Verteilung einzelner, lungengängiger Staubpartikelfractionen. Das Diagramm verdeutlicht, dass die maximale Einatmung Partikel von 1 μm und bei feinen Stäuben solche unter 0,3 μm umfasst. Die größeren Partikel bleiben in den oberen Luftwegen hängen und dringen nicht bis in die Lunge ein. Leider scheiden Grobstaubfilter kaum Partikel um 1 μm ab. Feinstaubfilter der höchsten Klasse scheiden 95-100 [%] der Partikel von 1 μm ab und besitzen auch einen mehr oder weniger hohen Wirkungsgrad hinsichtlich kleinerer Partikel.

Für Rein- und Sterilraumumgebungen, wie z.B. Operationsräume in Krankenhäusern sowie für verschiedene Zweige der Lebensmittel- und



Prozentualer Anteil der in der menschlichen Lunge verbleibenden Partikel als Funktion der Partikelgröße in μm

Deposition von Partikelfractionen aus der Atemluft im menschlichen Körper. Partikel im Bereich 0,1 μm gelangen über den Blutkreislauf in die Organe.



Pharmaindustrie, ist es selbstverständlich, dass die Luft eine absolute Reinheit aufweisen muss. Hier finden als letzte Filterstufe ausschließlich Schwebstofffilter (auch als Absolutfilter bezeichnet) unterschiedlicher Güteklassen ihren Einsatz.

Auch hat es sich erwiesen, dass die Produktqualität in der Metall- und Maschinenbauindustrie davon abhängt, wie frei die Luft von feinen Stäuben ist. Dies ist dadurch bedingt, dass moderne Systeme filigrane Bauteile enthalten, deren Toleranzbereiche nur einige hundertstel Millimetern oder noch kleiner zulassen. Selbst einzelne oder wenige Staubteilchen können diese Systeme völlig unbrauchbar machen. Beispiele hierfür sind optische Instrumente, feine Kugellager, Nanomechaniken sowie verschiedene elektrische Bauteile.

Luft - Ein Lebensmittel mit Hygieneanspruch

Täglich nimmt der Mensch Nahrung zu sich:

- ca. 0,8 - 1,5 Kg feste Nahrung
- ca. 1,6 - 3 ltr. Flüssigkeiten
- ca. 20 - 30 Kg Luft (> 20.000 ltr)

Bei unserem wichtigsten Nahrungsmittel, der Luft, ist Hygiene ebenso unverzichtbar wie für die anderen Aspekte unserer Ernährung. Nur können wir bei Luft nicht immer so wählerisch sein, wir müssen Atmen was uns vorge-setzt wird. Insbesondere in Bereichen, welche ausschließlich mit raumluft-technischen Anlagen (RLT) belüftet werden, können bei mangelnder Lufthygiene schnell vielfältige Probleme entstehen.

Vom „Sick-Building-Syndrom“ mit diffusen Krankheitsbildern über Allergien, Schimmelpilzbefall bis hin zu Legionelleninfektionen ist die Bandbreite der möglichen Mangelfolgen nur angerissen.

Nicht zuletzt im Interesse der allgemeinen Gesundheit sind Forderungen an die Hygiene bei RLT-Anlagen in Form von Richtlinien aufgestellt worden. Insbesondere für die Filtration und Aufbereitung von Zu- und Umluft hat sich die Richtlinie VDI 6022 als Standard zur hygienegerechten Auslegung von RLT-Anlagen durchgesetzt. Die VDI 6022 gibt zahlreiche Empfehlungen, auf welche Merkmale und Eigenschaften bei den einzusetzenden Luftfiltern zu achten ist, um deren bestimmungsgemäße Funktion sicherzustellen:

- RLT-Anlagen sollen ein physiologisch günstiges Raumklima und eine hygienisch einwandfreie Qualität der Innenraumluft schaffen. Sie sind nach dem Stand der Technik so zu planen, auszuführen zu betreiben und instand zu halten, dass von ihnen weder eine Gefährdung der Gesundheit noch Störungen der Befindlichkeit, der thermischen Behaglichkeit oder Geruchsbelästigung ausgehen.
- RLT-Anlagen müssen in allen luftführenden Bereichen so gestaltet, betrieben und instand gehalten werden, dass eine zusätzliche Belastung durch Schadgase sowie anorganische und organische Verunreinigungen sicher vermieden und der Luftcharakter als geruchsneutral empfunden wird.
- Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass keine gesundheitlich bedenklichen oder geruchsaktiven Stoffe zusätzlich in die Zuluft gelangen.
- Die gesamte RLT-Anlage muss im luftführenden Bereich aus Materialien bestehen, die weder gesundheitsgefährdende Stoffe emittieren noch einen Nährboden für Mikroorganismen bilden.

- Luftfilter müssen so ausgelegt, eingebaut und gewartet bzw. ausgetauscht werden können, dass sie den Eintrag von luftgetragenen Keimen sowie von anorganischen und organischen Stäuben minimieren, keinesfalls jedoch erhöhen. Es muss sichergestellt sein, dass sie nicht selbst zur Quelle von gesundheits- und geruchsbelastenden Bestandteilen der Luft werden können.

Die VDI-Richtlinie 6022 besteht aus insgesamt 3 Blättern, wobei das Blatt 1 für Lüftungsanlagen in Büro- und Versammlungsräumen und das nachgereichte Blatt 3 für RLT-Anlagen in Gewerbe- und Produktionsbetrieben gilt. Das Blatt 2 beschreibt die Anforderung an die Hygieneschulung, d. h. der Qualitätssicherung der Maßnahmen gemäß Blätter 1 und 3, in dem Anforderungen an Schulungen, durchführende Referenten, Schulungsinhalte festgelegt sowie Ablauf der Schulungen und Prüfungsbedingungen, definiert werden. Im Blatt 3 werden neben allgemeingültigen Aussagen auch spezielle Hinweise für einzelne Branchen (Lebensmittel- und Tabakindustrie, Holzwirtschaft, Textilindustrie, Druck- und Papierverarbeitung, Pharmaindustrie, Entsorgungsbetriebe, Metallverarbeitung und Automobilindustrie) gegeben.

Die VDI 6022 fordert die regelmäßige Kontrolle von Luftfiltern hinsichtlich der Verschmutzung und Durchfeuchtung. Ebenso wird der Austausch bei Verschmutzung, Durchfeuchtung oder Leckagen vorgeschrieben. RLT-Anlagen sollen in regelmäßig kurzen Zeitabständen durch nach Blatt 2 geschultes Betriebspersonal (sog. Hygienekontrollen) und in größeren Zeitabständen durch Fachpersonal (sog. Hygieneinspektionen) überwacht werden. In Blatt 1 der VDI 6022 werden bei Hygieneinspektionen neben Sichtkontrollen auch spezifische Abklatschproben (zur mikrobiologischen Analyse) an Luftfiltern gefordert. Im Gegensatz dazu werden gemäß Blatt 3 über Sichtkontrollen hinausgehende Untersuchungen auf Hygienemängel wie z.B. Keimwachstum oder Beschädigungen, nicht verlangt. Werden bei Hygieneinspektionen optisch feststellbare Mängel entdeckt, sind diese (falls erforderlich) mikrobiologisch zu untersuchen.

Die Vielzahl der möglichen Maßnahmen zur Erhaltung der Lufthygiene können wir hier nicht im einzelnen erörtern. Deswegen werden nur einige generelle Empfehlungen an dieser Stelle aufgeführt:

- Die Befeuchter sind so zu regeln, dass die relative Feuchte in der Anlage insbesondere an den Luftfiltern 90% rel. Feuchte nicht überschreitet. Im gewerblichen Bereich ist vorher zu prüfen, ob die produktionserforderlichen Bedingungen verändert werden.
- Die Anlage ist nach dem trockenfahren von Befeuchter und/oder Kühler abzuschalten.
- Die Klappen im Luftleitungssystem sind bei Stillstand zu schließen, damit die Anlage nicht unkontrolliert von Wind- und Auftriebskräften durchströmt wird.
- Feuchtigkeit an Luftfiltern und Schalldämpfern ist zu vermeiden.
- Bei Temperaturen $> 0^{\circ}\text{C}$ können hohe relative Luftfeuchten ($>80\%$) an Komponenten in RLT-Anlagen zu Problemen durch mikrobiologisches Wachstum führen.
- Feuchtigkeit $>90\%$ führen auch bei kurzzeitiger Überschreitung an Luftfiltern zu Problemen.
- Sind am Einbauort lang anhaltend hohe Luftfeuchtigkeiten bzw. eine Durchfeuchtung der Filter zu erwarten, sind geeignete Maßnahmen gegen Keimwachstum insbesondere auf Luftfiltern vorzusehen (z.B. durch Vorerwärmung um ca. $3 - 5^{\circ}\text{C}$).

Der Mensch ist eine Partikelschleuder

Der menschliche Körper ist eine wahre Partikelschleuder. Je nach Tätigkeit werden unterschiedliche Mengen und Partikelgrößen erzeugt. Das nachstehende Diagramm ist exemplarisch und gilt für gewöhnliche Textilbekleidung. Die Ergebnisse werden z.B. stark durch das Tragen von Reinraumkleidung beeinflusst.

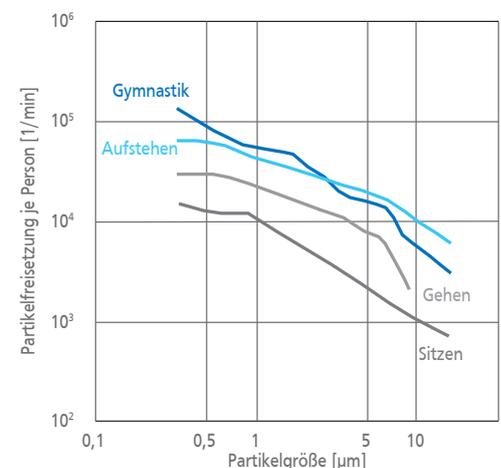
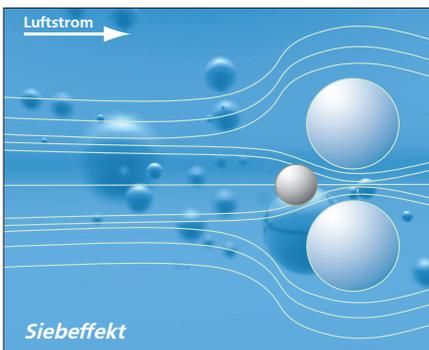


Diagramm: Partikelfreisetzung von Personen bei verschiedenen Bewegungen (Quelle: VDI 2083, Blatt 15).

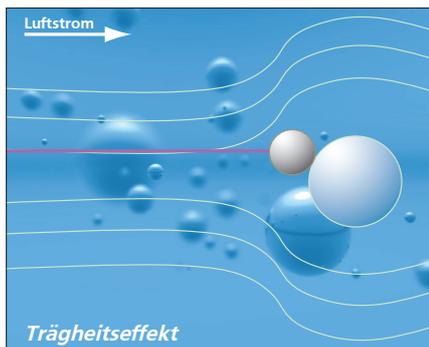


Wirkprinzipien der Partikelabscheidung

Die Fähigkeit eines Filters, Partikel abzuschneiden, beruht auf verschiedenen physikalischen und mechanischen Erscheinungen, wie Diffusion, Interception, Trägheitseffekt sowie Siebwirkung. Auch elektrostatische Kräfte zwischen den Partikeln und den Fasern haben hierbei eine Bedeutung.

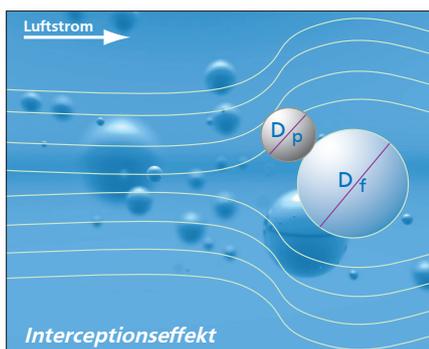
Siebwirkung

Partikel mit einem größeren Durchmesser als der freie Abstand zwischen zwei Fasern können nicht durch den Filter dringen.



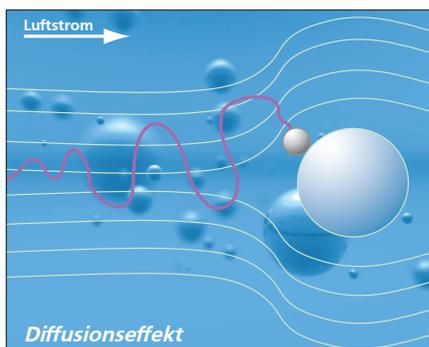
Trägheitseffekt

Größere Partikel haben zu große Trägheitskräfte, um dem Luftstrom folgen zu können, wenn dieser durch eine Filterfaser abgelenkt wird. Die Partikel bewegen sich in ihrer ursprünglichen Bahn weiter und bleiben an der Anströmseite des Filters haften. Der Trägheitseffekt nimmt mit steigender Luftgeschwindigkeit, größerem Partikeldurchmesser sowie kleinerem Faserdurchmesser, zu.



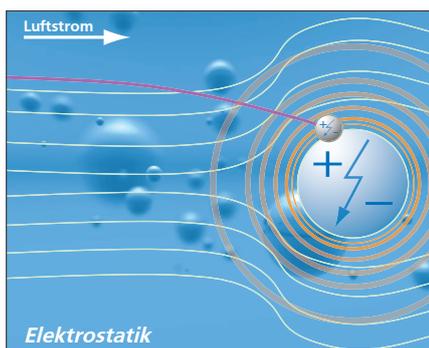
Sperreffekt (Interceptionseffekt)

Kleine, leichte Partikel folgen dem Luftstrom um die Filterfaser. Wenn der Mittelpunkt des Partikels einer Strömung folgt, die näher an die Faser kommt als der Durchmesser $[D_p]$ des Partikels, so wird dieser aufgefangen und bleibt haften. Der Sperreffekt ist unabhängig von der Luftgeschwindigkeit, soweit nicht der Unterschied so groß ist, dass sich das Strömungsbild um die Faser verändert. Mit steigendem Partikeldurchmesser, geringerem Faserdurchmesser und geringerem Abstand zwischen den Fasern nimmt der Sperreffekt zu. Ein Filtermaterial mit gutem Sperreffekt muss also so beschaffen sein, dass es eine große Anzahl feiner Fasern enthält, die gewöhnlich den gleichen Durchmesser haben wie die abzuscheidenden Partikel.



Diffusionseffekt

Partikel $< 1 \text{ [}\mu\text{m]}$ folgen nicht den Strömungslinien um die Faser. Sie werden von der Brownschen Molekularbewegung beeinflusst, d. h. sie werden von den Molekülen der Luft in Schwingung versetzt und bleiben bei Berührung mit den Filterfasern an diesen hängen. Die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel mit den Fasern aufgrund des Diffusionseffektes in Berührung kommen, nimmt im allgemeinen mit steigender Partikelgröße und zunehmender Faseranströmgeschwindigkeit ab.



Elektrostatische Anziehung

Elektrostatische Felder werden entweder in Form von Plattenkondensatoren als aktives Filterelement eingesetzt oder können Fasern von synthetischen Filtermedien bei der Herstellung aufgeprägt werden. Dadurch bildet sich um die Fasern bzw. Kollektoren ein elektrisches Feld, die jeweils komplementär geladene Partikel anzieht. Vorgeladene Elektrostatik bei Filterfasern baut sich nach Inbetriebnahme des Filters allmählich ab. Externe Umwelteinflüsse können diese Filtereffekte begünstigen oder schwächen. Gem. EN 779:2012 müssen Feinstaubfilter der Klassen F7-F9 im entladenen Zustand die definierte Mindesteffizienz (M.E.) erreichen. Filter der Gruppen ISO 16890 ePM10 bis ePM1 müssen im elektrostatisch vollständig entladenen Zustand mindestens 50% des Gruppenfraktionsabscheidegrades erreichen.

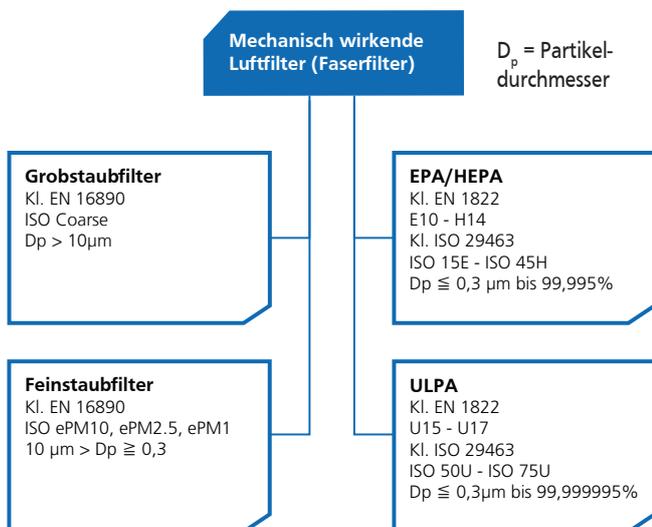
Luftfilter

Luftfilter werden zur Reinigung der Zuluft und/oder Umluft in Lüftungsanlagen sowie zur Reinigung kontaminierter Abluft beispielsweise von Kernkraftanlagen, Laboratorien und Isolierstationen benutzt. Der Bedarf an reiner Luft für industrielle Prozesse und High-Tech-Umgebungen erschließt stetig neue Anwendungsgebiete für die Luftfiltration.

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen zur Luftfiltration, deren Entwicklung bereits mehr als zweitausend Jahre zurückliegt. Bereits in der Antike erkannten Wüstenbewohner, dass Sandstaub mittels einfacher Tücher abgetrennt werden kann. Im 18. Jhd. wurden Baumwollfilter für verschiedene Zwecke, z.B. in der mikrobiologischen Forschung (Pasteur) sowie in der Goldverarbeitung zur Abscheidung von Quecksilberrauch, eingesetzt. Während des ersten Weltkrieges wurden Filter zur Abscheidung von Kampfstoffen entwickelt. Mit dem Fortschritt in Technik und Medizin und der Erforschung der Filtereffekte wurden immer effizientere Filterlösungen geschaffen. Zur Abscheidung von luftgetragenen Partikeln, Aerosolen oder Nebeln kennt die heutige Verfahrenstechnik folgende Abscheidesysteme:

- Zyklone
- Wäscher
- elektrische Abscheider
- mechanisch filternde Abscheider (Faserfilter):
 - Grobstaubfilter
 - Feinstaubfilter
 - Schwebstofffilter bzw. EPA, HEPA, ULPA Filter
- adsorbitive Filter, z.B. Aktivkohlefilter

Diese Einteilung ist unter Berücksichtigung der verschiedenen Filtermedien, der Art und Weise und der Fähigkeit der Filter Partikel abzuscheiden, also indirekt nach ihren Anwendungsgebieten, erfolgt. Weiterhin gibt es Elektrofilter, die ausschließlich nach elektrostatischen Wirkprinzipien arbeiten. Elektrofilter haben jedoch in der Lüftungs- und Klimatechnik aus Betriebs sicherheits- und Kostengründen nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung erlangt. Für die weitere Betrachtung beachten wir nur Aktivkohle- und Faserfilter. Letztere lassen sich in folgendem Schema gliedern:



Luftfilter in Form von mechanischen Faserfiltern kommen in den meisten Bereichen der Technik zum Einsatz. Die wesentlichen Einsatzgebiete liegen in der allgemeinen Raumlufttechnik aber auch in der Prozesslufttechnik. Typische Anwendungsbereiche sind:

- Klima-, Be- und Entlüftungsanlagen (Produktionsanlagen, Fabriken, öffentliche Gebäude, Büroräume, Wohnungen),
- Reinraumtechnische Anlagen (Pharmazie, Mikroelektronik, Medizin, Raumfahrt, Lebensmittelindustrie),
- Anlagen zur Emissionsminderung von toxischen oder radioaktiven Substanzen.

Ein Filter ist eine Systemkomponente innerhalb einer Lüftungsanlage und hat generell folgende Aufgaben:

- Schutz von Belüftungssystemen vor Verunreinigungen und Ablagerungen,
- Verteilung und Vergleichmäßigung von Luftströmungen,
- Verringerung der Partikelanzahlkonzentration sowie Massenkonzentration,
- Abscheidung von Geruchs- oder gasförmigen Schadstoffen (bei adsorptiven Filtern),
- Sicherstellung der Hygieneanforderung bei Belüftung von Räumen,
- Sicherstellung der Reinheitsklasse in Reinräumen.

Für den praktischen Einsatz von Luftfiltern sind bei gegebener Luftmenge der Abscheidegrad, bezogen

- auf den anfallenden Staub (max. Reinluftkonzentration),
- die Anfangsdruckdifferenz und der Druckdifferenzverlauf,
- die Standzeiten bzw. die mögliche Einsatzdauer

wesentliche Bestimmungs- und Leistungsgrößen. Diese Größen sind eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig, wobei sie sich erheblich durch das Filtermedium und die Filterkonstruktion verändern lassen. Zusätzliche Parameter, wie effektive Filterfläche, Mediumgeschwindigkeit, Packungsdichte, Flächengewicht, Filterdicke und ähnliches, sind erforderlich, um die Filterspezifikation zu beschreiben, jedoch keine Leistungsgrößen.

In einer Lüftungstechnischen Anlage kommen Luftfilter in den verschiedensten Bauformen, Filtertypen sowie Filterklassen zum Einsatz. Je nach Anwendungsfall wird die Außenluft, Zuluft, Umluft oder Abluft filtriert. Die Luftfilter werden hierbei entweder im Lüftungsgerät, im Kanalsystem oder in der Decke bzw. Wand des zu belüftenden Raums installiert. In der Reinraumtechnik werden Schwebstofffilter darüber hinaus in Lamina-Flow-Einheiten eingebaut, um für kritische Arbeitsvorgänge höchste Luftreinheiten und eine turbulenzarme Verdrängungsströmung ($V' < 0,5$ m/s) zu garantieren.

Als Grundlage für die Auswahl bzw. Auslegung von Luftfiltern (mechanischen Faserfiltern) dient die Kenntnis über den zu reinigenden Luftstrom. Dieser wird zum einen vom Arbeitsprozess und zum anderen von den Gegebenheiten der Klima- und Lüftungstechnik bestimmt. Wichtige Einflussgrößen sind zudem: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Eigenschaften der abzuscheidenden Partikel und deren Konzentration.

Die wesentliche technische Kenngröße für Faserfilter ist neben der Druckdifferenz die Filterklasse gemäß geltender Normen (EN 779, ISO 16890, EN 1822 bzw. ISO 29463).

Die zu wählende Filterklasse hängt entscheidend von der Anwendung und den zu erreichenden Partikelkonzentrationen ab. Die optimale Auswahl eines Luftfilters erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung der folgenden Kriterien:

- Filterklasse / Güteklasse / Reinraumklasse,
- Bauform,
- Art der Einspannung,
- Ausführung / Art der Dichtung,
- Ausführung / Material des Rahmens,
- Volumenstrom pro Filtereinheit,
- Abmessungen,
- Anfangsdruckverlust (Toleranz),
- Zulässiger Enddruckverlust,
- maximal möglicher Enddruckverlust,
- u.U. Berstdruck,
- Prüfvorschriften / Prüfprotokolle,
- Temperaturbereich,
- Feuchtebereich,
- andere Umwelteinflüsse,
- Art der Anströmung.

Die Filterleistung, der Druckverlust und das Staubspeichervermögen, das letztendlich die Standzeit bestimmt, sind die wesentlichsten Entscheidungskriterien zur wirtschaftlichen Auswahl eines Luftfilters. Diese Daten werden i.d.R. in entsprechenden Prüfzeugnissen festgehalten.

Grobstaubfilter

Grobstaubfilter werden heute im wesentlichen als Vorfilter für nachfolgende Filterstufen eingesetzt. Ihr Einsatzgebiet ist für Fasern und grobe Stäube im Größenbereich >10 [μm] vorgesehen.

Grobstaubfilter werden aus Glasfasern oder synthetischen Fasern, wie Polypropylen, Polyester u.A. mit einem Faserdurchmesser von etwa 30 bis 50 [μm] und einem Faserabstand von 200-400 [μm] hergestellt.

Die Abscheidung von Stäuben und Partikel mit diesen Materialien erfolgt in der Hauptsache nach dem sogenannten Trägheitseffekt und zum Teil auch Siebeeffekt. Dies bedeutet, dass man bei der Abscheidung die Trägheitskraft der Partikel ausnutzt. Diese folgen nicht der Strömungslinie des Luftstromes bei der Umlenkung um eine Filterfaser, sondern bleiben an der Anströmseite der Faser hängen. Die Abscheidung nach dem Trägheitseffekt setzt eine Luftgeschwindigkeit von 2-2,5 [m/s] durch das Filtermaterial und eine genügende Masse der Partikel voraus. Bei niedriger Luftgeschwindigkeit folgen die Partikel dem Luftstrom um die Fasern und bei höherer Geschwindigkeit erfolgt

Beispiele für Grobstaubfilter:



Filtermatten



Filterzellen



Taschenfilter

Beispiele für Feinstaub und Schwebstofffilter:



Taschenfilter



Kompaktfilter



Industrieller HEPA



ULPA Filter für Reinraumanwendungen

ein Mitreißen des Staubes. In beiden Fällen sinkt also der Abscheidungsgrad. Deshalb eignen sich Grobfilter in Abhängigkeit des verwendeten Filtermediums nur bedingt für variable Luftmengen, wie sie bei zentraler Vorfilterung oder Anlagen mit polumschaltbaren Motoren häufig vorkommen. Eine nennenswerte Abscheidung wird beim Trägheitseffekt erst bei einer Partikelgröße von über $5 \mu\text{m}$ erreicht. Ein Grobstaubfiltermaterial hat praktisch keinen Abscheideeffekt bei Partikeln unter $2-3 \mu\text{m}$. Rußpartikel, welche die größte Verschmutzung einer Lüftungsanlage und eines Gebäudes verursachen, liegen bei einer Größenordnung von $0,01-1 \mu\text{m}$ und werden nicht abgeschieden. Verschiedene Bauformen von Grobstaubfiltern haben sich bewährt u.A.:

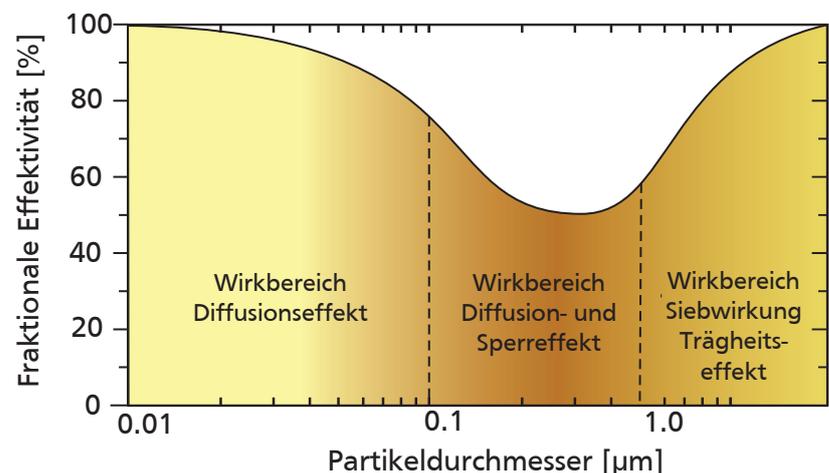
- Filtermatten (Zuschnitte / Rollenware)
- Filterzellen / Kassettenbauform
- Drahtrahmenfilter
- Taschenfilter
- Beutel bzw. Säcke
- Metallgestrickfilter

Feinstaubfilter und Schwebstofffilter

Feinstaub- bzw. Schwebstofffilter dienen der Abscheidung von partikulären Luftverunreinigungen $<10 \mu\text{m}$ und werden zunehmend im einstufigen Filterbetrieb auch zur Abscheidung von Grobstäuben verwendet. Bei Feinstaubfiltern spielen Sperr- und Diffusionseffekte mit zunehmendem Anspruch eine größere Rolle in der Abscheidemechanik. Demzufolge steigt, sofern es die Filterkonstruktion zulässt, die Effizienz gegenüber kleineren Partikelfraktionsgrößen bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten. Schwebstofffilter auch EPA (efficient particulate airfilter), HEPA (High efficiency particulate airfilter) und ULPA (Ultra Low Penetration Airfilter) oder Absolutfilter genannt, werden eingesetzt, um auch kleinste Partikel $<1 \mu\text{m}$ sicher aus Luftströmen zu entfernen. Die Luftgeschwindigkeit durch diese Filtermedien beträgt in der Regel $2-12 \text{ cm/s}$. Da der Gesamtabscheidungsgrad des Filters sich aus verschiedenen Filtrationswirkungen zusammensetzt, liegt die Annahme nahe, dass er unter gewissen Verhältnissen einen bestimmten Mindestwert aufweist.

Der Sperrereffekt und der Trägheitseffekt nehmen mit größerer Partikelgröße zu, während der Diffusionseffekt abnimmt. Dies bedeutet, dass es eine bestimmte Partikelgröße gibt, die von einem Filter am schwersten abgeschieden werden

Wirkbereiche der Filtereffekte



kann. Das folgende Diagramm zeigt den Zusammenhang von Partikelgröße und Wirkeffizienz der Filtereffekte.

Im Bereich 0,1 bis 0,3 μm ergibt sich also eine eingeschränkte Effizienz. Dies hängt damit zusammen, dass der Sperreffekt von der Geschwindigkeit unabhängig ist und die Diffusionsabscheidung mit steigender Partikelgröße und zunehmender Faseranströmgeschwindigkeit im Allgemeinen abnimmt. Partikel im Spektrum von 0,1 bis 0,3 μm sind unter normalen Betriebsverhältnissen in einem Schwebstofffilter am schwersten abzuscheiden. Deshalb wird bei der Klassifizierung der Filter der Leistungsgrad bei einer spezifischen Partikelgröße in besagtem Spektrum der sog. „MPPS“ (most penetrating particle size) angegeben.

Da außer dem Sperreffekt alle anderen Filtereffekte von der Luftgeschwindigkeit beeinflusst werden, ist die Herstellerangabe der Filtereffektivität zwangsläufig auf die Nennluftgeschwindigkeit bzw. Nennluftvolumenstrom bezogen. Eine entsprechende Filterprüfung mittels Partikelzählern muss bei der Nennluftmenge erfolgen. HEPA Filter können mit anderen Luftgeschwindigkeiten betrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass die Filtereffektivität bei geringerem Volumenstrom deutlich zunimmt. Sofern der Filter mit höheren Luftmengen als angegeben betrieben wird, kann die Nennwirkung bei MPPS nicht sichergestellt werden. Je nach Produktauslegung können auch geringe Überlastungen bereits dazu führen, dass die angegebene Filterklasse sich um eine Klassifizierungsstufe verschlechtert.

Folgende Bauformen haben sich für Feinstaubfilter bewährt:

- Filterzellen
- Taschenfilter
- Kompaktkassetten
- Kombinationsfilter
- Filterpatronen

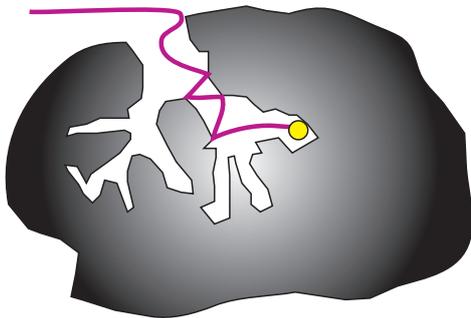
Folgende Bauformen haben sich für Schwebstofffilter bewährt:

- Filterkassetten
- Filterpatronen
- Plattenfilter (sog. Reinraumplatten)
- FFU's (Fan Filter units), Kombination aus HEPA Filter mit geregelter Lüfter und ggf. Vorfilter

Adsorption von gasförmigen Luftverunreinigungen und Gerüchen (Molekular- / Sorptionsfilter)

Zur Abscheidung (Adsorption) gas- und dampfförmiger Luftverunreinigungen, die oft gesundheitsbelastigend sind und schädlich für Menschen, Tiere und Pflanzen sein können, hat sich Aktivkohle als wirksames Mittel erwiesen. Aktivkohle wird daher in Klima- und Belüftungsanlagen zur Zuluft- und Umluftreinigung eingesetzt. Aktivkohle wird als Form-, Burch- oder Pulverkohle eingesetzt. Die Körnung von Form- und Bruchkohle liegen zwischen 0,6 und 6,3 mm je nach Anwendungsfall. Pulverkohle hat eine Körnung $<0,075$ [mm]. Aktivkohle wird aus organischen Stoffen, wie z.B. Torf, Nußschalen, Zucker u.a.m., durch Erhitzen und weiteren Spezialbehandlungen hergestellt, mit dem Ziel, die „äußere“ und „innere“ Oberfläche außerordentlich zu vergrößern. Durch Ausbildung mikroskopischer Poren und Kapillarsysteme beträgt die adsorptionsfähige Ober-

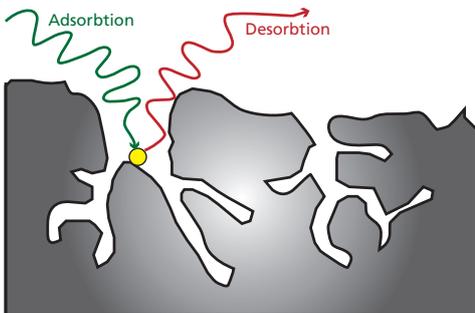
fläche bis zu 1500 [m²] je Gramm Aktivkohle. Durch diese extrem große Adsorptionsfläche ergibt sich ein ausgezeichneter Abscheidegrad und eine große Speicherfähigkeit, so dass die Standzeit oder die Nutzungsdauer entsprechend lang ist.



Die Funktion der Aktivkohle basiert im Wesentlichen auf dem Effekt der Adsorptionsdiffusion. Bedingt durch die große innere Oberfläche können Moleküle durch Adsorption aus der Luft gefiltert werden.

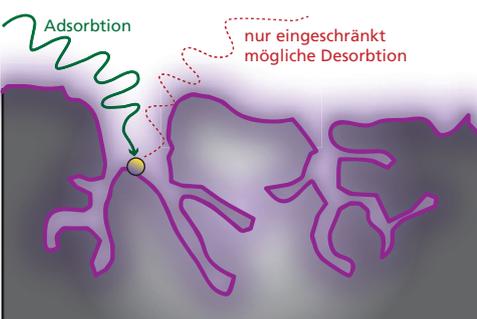
Dafür muss die belastete Luft mit der Oberfläche der Aktivkohle oder eines anderen Sorptionsmaterials in Berührung kommen. Dieser Prozess wird als Diffusion bezeichnet.

Die nebenstehende Abbildung zeigt, wie ein Molekül in ein Aktivkohlegranulat diffundiert.



In der allgemeinen Anwendungstechnik werden Moleküle von Schadgasen aufgrund der sogenannten Physisorption in der Aktivkohle gebunden. Je größer die innere Oberfläche der Aktivkohle ist, desto effektiver kann dieser Effekt wirken. Diese Form der Adsorption beruht im Unterschied zur Chemisorption darauf, dass das zu adsorbierende Molekül durch physikalische Kräfte an die Aktivkohle (oder andere Substrate) gebunden wird. Eine Energiezufuhr, wie z. B. ansteigende Temperatur, kann die Moleküle von der Filteroberfläche lösen und somit wieder freisetzen. Dieser Prozess nennt sich Desorption.

Im Gegensatz dazu ist die Chemisorption weitgehend irreversibel. Bei der Chemisorption wird das zu adsorbierende Molekül aufgrund chemischer Reaktionen an die Medienoberfläche des Substrates (z.B. Aktivkohle oder HS-Clean Pro) gebunden. Es findet eine chemische Veränderung des Adsorbents statt. Um diese chemische Reaktion zu ermöglichen, wird die Oberfläche entsprechend dem zu filtrierenden Stoff imprägniert (z.B. mit Oxidationsmitteln oder Katalysatoren).



Es gilt: Je länger die (scheinbare) Kontaktzeit ist oder je mehr Aktivkohle spezifisch eingesetzt wird, um so besser ist die Ausnutzung der Aktivkohle. Um spezielle Schadstoffe zu entfernen, werden (mit Katalysatoren) imprägnierte Aktivkohlen eingesetzt. Die Temperatur des Luftstromes sollte nicht über 50 [°C] liegen, da bereits oberhalb dieser Temperatur für flüchtige Stoffe eine Desorption eintritt. Spezielle Anwendungsfälle machen es erforderlich, die Aktivkohle mit passenden „Reaktionspartnern“ zu imprägnieren. Die Bandbreite der Imprägniermittel ist auf den jeweiligen, abzuscheidenden Schadstoff abgestimmt. Je nach Anwendungsfall kann es erforderlich sein, Aktivkohlefilter in Reihe zu schalten, um Schadgase mit multiplen Problemstoffen sicher zu adsorbieren. Die abzuscheidenden Stoffe müssen „adsorbierbar“ sein (s. Tabelle). Aktivkohle ist staubempfindlich. Es sollten daher hochwertige Staubfilter der Aktivkohle zur Abscheidung nicht gasförmiger Luftverunreinigungen vorgeschaltet werden. Als Faustregel gilt: Gase oder Dämpfe, mit mehr als drei NICHT-Wasserstoffatome per Molekül, sind gut adsorbierbar.

Tabelle über die Wirksamkeit der Aktivkohle bei folgenden Stoffen (Auswahl)

Aceton	Buttersäure	Kohlendioxid
Acetaldehyd	Chlor	Lösungsmittel
Acrolein	Chloroform	Menthol
Alkohol	Dieselöldampf	Methan
Anaesthetika	Essigsäure	Methylalkohol
Äther	Desinfektionsmittel	Merkaptane
ätherische Öle	Formaldehyd	Ozon
Äthan	Früchte	Phenol
Äthylen	Haushaltsgerüche	Phosgen
Äthylacetat	Jod	Propan
Amine	Kerosin	Schweißgeruch
Ammoniak	Körpergeruch	Tetrachlorkohlenstoff
Benzin	Kosmetika	Terpentin
Benzol	Krankenhausgerüche	Tabakgerüche
Butan	Kresol	Toluol

■ sehr gute Adsorption
 ■ gute Adsorption
 ■ geringe Adsorption
 ■ sehr geringe Adsorption



Aktivkohle

Aktivkohle wird in unterschiedlichsten Formen für die Filtration von Gasen eingesetzt:

- Granulate
- Pulverkohle
- Schäume
- Textile oder textilähnliche Filtermedien
- Platten

Folgende Bauformen haben sich für Aktivkohlefilter bewährt:

- Filterzellen (mit Granulatkohle als Schüttbett)
- Kompaktfilter mit plissierten Filtermedien
- Plattenzellen mit Aktivkohleplatten
- Kombinationsfilter (Feinstaub / HEPA / Aktivkohle)
- Adsorberanlagen mit großen Schüttbetten
200 bis >600 kg



Chemisorbatives Aluminiumoxid, imprägniert mit Kaliumpermanganat

Gängige Filternormen

Das Verhalten von Luftfiltern im Einsatz ist abhängig von vielen Randbedingungen, die sich in Vivo kaum mit vertretbarem Aufwand erfassen lassen. Wesentliche Randbedingungen sind die Staub- bzw. Partikelkonzentration, deren Zusammensetzung, die Umgebungstemperatur, Druck, Luftfeuchte u.v.m. Um Luftfilter vergleichbar zu machen, bedarf es standardisierter Laborverfahren zur In-Vitro Leistungsbestimmung. Diese unterliegen festgelegten Betriebsbedingungen, sodass Testabläufe reproduzierbar werden. Für Labortestverfahren werden idealisierte Aerosole und Teststäube verwendet. Diese haben i.d.R. nichts mit den Luftverunreinigungen gemein, denen Filter in realen Betriebsumgebungen ausgesetzt sind. Mithin reflektiert ein Laborprüfergebnis nur äußerst eingeschränkt das Filterverhalten im spezifischen Anwendungsfall. Neben einigen internationalen Normen gibt es eine Vielzahl von nationalen Prüf- und Klassifizierungsstandards, die in der Regel nicht miteinander vergleichbar sind. Im Wesentlichen haben sich weltweit die Standards ISO 16890, US ASHRAE 52.2 (Grob- und Feinstaubfilter), EN 1822 sowie US-MilStd. (EPA / HEPA /ULPA) etabliert. Die EN 779 wurde ab 2016 durch den international einheitlichen Standard ISO 16890 ersetzt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der vielen verschiedenen nationalen Standards für HEPA Filter kann die ISO 29463 herangezogen werden, deren Prüfverfahren auf der EN 1822 basieren.

EN 779, ehemalige Norm für Grob- und Feinstaubfilter

In Europa wurden Grob- und Feinstaubfilter gemäß der Norm EN 779 "Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik" geprüft und gemäß ihrer Abscheideleistung klassifiziert. Bei dieser Prüfmethode handelt es sich um eine „zerstörende“ Prüfung. Mithin ist dieses Verfahren nicht für eine individuelle Qualitätskontrolle tauglich. Die EN 779 wurde in 2018 durch die ISO 16890 ersetzt. Dieser Standard wird jedoch von Anwendern immer noch als Referenz und Bezugssystem betrachtet.

Die Prüfungen werden an Filterelementen durchgeführt die Standardgrößen gemäß EN 15805 entsprechen und für den Einbau in einen rechteckigen Kanal mit den Abmessungen 610x610 mm geeignet sind. Der Prüfvolumenstrom liegt zwischen 0,24 m³/s (850 m³/h) und 1,5 m³/s (5400 m³/h). Mittels Aufgabe eines synthetischen Prüfstaubes (ASHRAE Prüfstaub) werden im Teststand die Veränderungen des Betriebsverhaltens während des Einsatzes simuliert. Der Prüfstaub wird bei Grobstaubfiltern bis zum Erreichen des normativ festgelegten Enddrucks von 250 Pa aufgegeben. Feinstaubfilter werden bis zu einem Enddruck von 450 Pa mit Prüfstaub beaufschlagt.

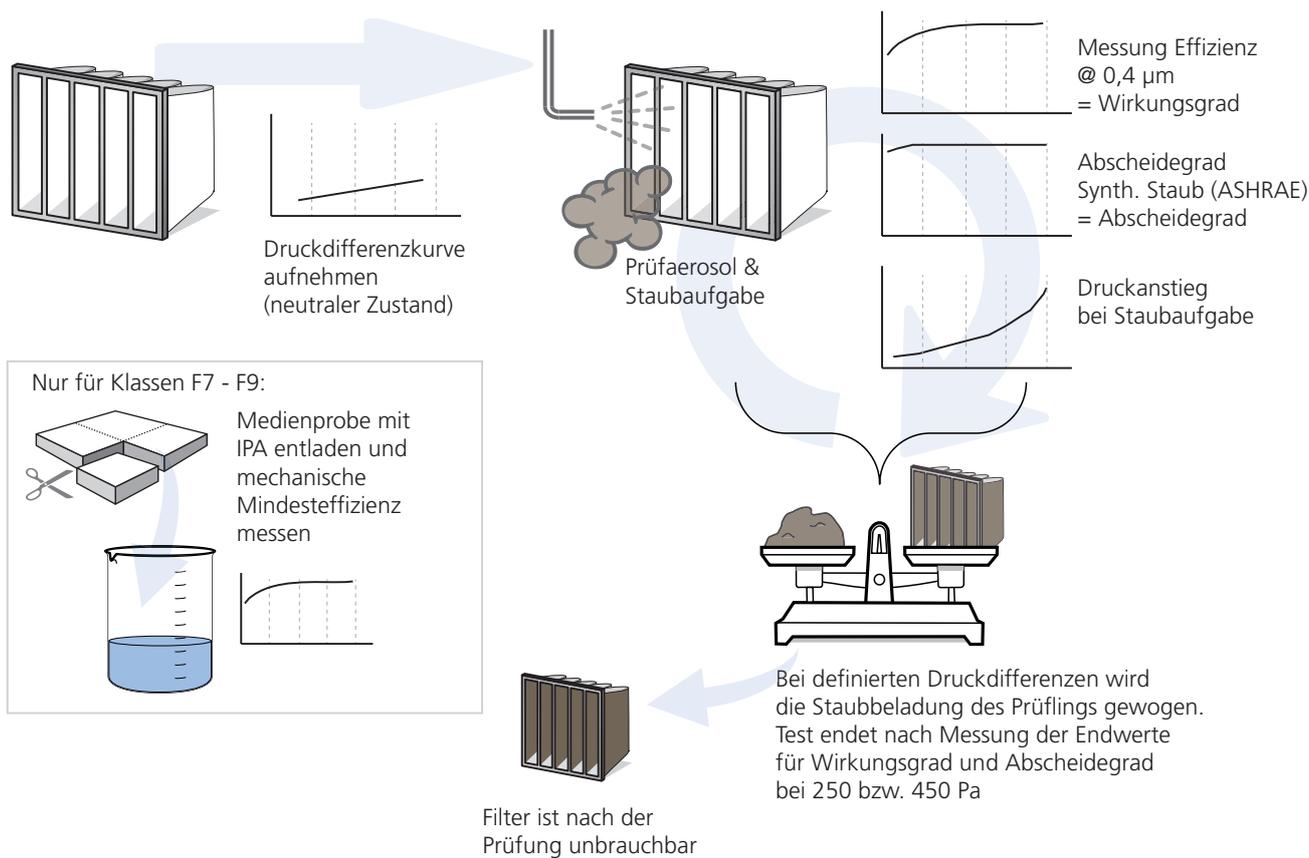
Feinstaubfilter im Geltungsbereich der EN 779 werden zudem nach deren mittleren Wirkungsgraden gegenüber der Partikelgröße 0,4 µm klassifiziert. Dazu wird der Prüfling zwischen drei Staubbelaadungsstufen mit einem synthetischen Aerosol (DEHS) beaufschlagt und die Partikelanzahlkonzentrationsdifferenz vor und hinter dem Filter gemessen. Hieraus ergibt sich der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Staubbelaadung.

Im Ergebnis hängt der Wirkungsgrad des Filters von dessen Wechselwirkung mit synthetischem Staub und synthetischem Aerosol ab.

Damit lassen sich zwangsläufig keine verlässliche Aussagen zum Filterverhalten im realen Einsatz treffen.

Wesentliche Einzelaspekte der Prüfung sind:

- Mittlerer Abscheidegrad (gravimetrisch) gegenüber synthetischem Staub
- Mittlerer Wirkungsgrad (entspricht dem anzahlbezogenen Fraktionsabscheidegrad gegenüber 0,4 µm großen Partikeln des synthetischen Prüfaerosols)
- Minimaler Wirkungsgrad (als Minimum aus allen während der Prüfung gemessenen Wirkungsgraden einschließlich der Prüfung des Filtermediums nach Behandlung mit Isopropanol)
- Anfangsdruckverlust
- Staubspeicherfähigkeit gegenüber synthetischem Staub



Der Ablauf der Prüfung gemäß DIN EN 779 ist im obigen Diagramm schematisch dargestellt. Grobstaubfilter werden gravimetrisch nach deren mittleren Abscheidegraden (A_m) gegenüber synthetischem ASHRAE-Staub klassifiziert. Diese berechnen sich aus dem Verhältnis der im Filter abgeschiedenen Staubmasse zu der insgesamt bis zum Erreichen der Enddruckdifferenz aufgegebenen Staubmasse. Feinstaubfilter werden entsprechend deren mittleren Wirkungsgraden (E_m) klassifiziert. Dazu wird das Filterelement zwischen den einzelnen Staubbiladungsschritten mit einem synthetischen, ölbasierten Aerosol beaufschlagt und die Partikelanzahlkonzentrationen vor und hinter dem zu prüfenden Filter gemessen. Aus der Differenz beider Konzentrationen, bezogen auf die an der Anströmseite gemessene Konzentration für Partikel der Größe $0,4 \mu\text{m}$, wird der Wirkungsgrad berechnet. Im Anschluss an die Prüfung wird der mittlere Wirkungsgrad als Funktion der aus den Ergebnissen der Staubbiladungsschritte ermittelten Wirkungsgrade berechnet.

Bei einigen Filtertypen wird die Abscheideleistung der eingesetzten Filtermedien in unterschiedlich hohem Maße durch elektrostatische Ladung auf den Fasern begünstigt. Elektrostatische Ladungen können den Abscheidegrad eines Filters erhöhen, ohne zusätzlichen Druckverlust zu verursachen. Unter bestimmten Betriebsbedingungen, z. B. bei hohen Luftfeuchten, bei Beaufschlagung des Filters mit massiven Konzentrationen von kleinen, aus Verbrennungsprozessen stammenden Partikeln oder mit Ölnebeln, kann die Wirkung der elektrostatischen Ladungen durch Entladungsvorgänge oder durch Abschirmung der Ladungen so beeinträchtigt werden, dass der Wirkungsgrad eines Filters während der Einsatzzeit abnimmt.

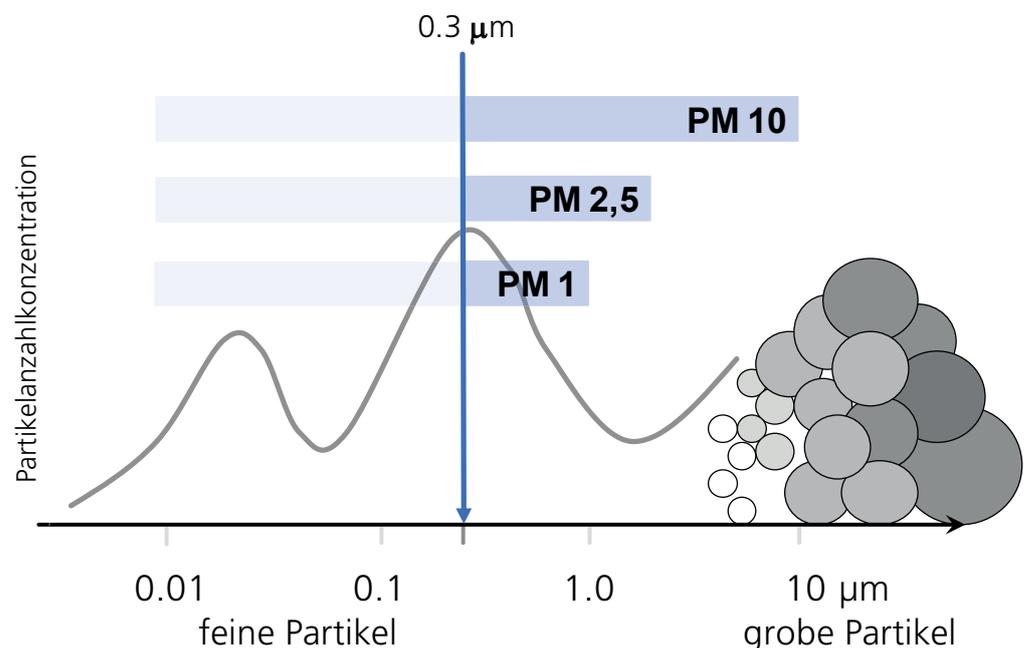
Ist hinreichend Staub in der zu filternden Luft gegeben, wird dieser Effekt durch die Zunahmen des (mechanischen) Wirkungsgrads aufgrund von Staubeinlagerung jedoch wieder kompensiert. Mit Revisionsstand 2012 für Feinstaubfilter (Gruppe F) zusätzlich die mechanische Mindesteffizienz (M.E.) als Leistungskriterium für die Klassifizierung ergänzt. Für den Nachweis der Mindesteffizienz wird eine Medienprobe in Isopropanol getaucht und anschließend wieder getrocknet. An der trockenen Flachprobe, deren potentielle elektrostatische Ladung neutralisiert wurde, wird der Fraktionsabscheidegrad gegenüber Partikeln der Größe

0,4 µm bestimmt. Die Behandlung der Medienprobe mit Isopropanol hat den Zweck, alle elektrostatischen Ladungen auf den Fasern zu neutralisieren. Der Mindestwirkungsgrad entspricht dem Minimalwert aller während der Prüfung gemessenen Wirkungsgrade (Wirkungsgrade des Filterelements vor, während und nach der Bestäubung und Wirkungsgrad der mit Isopropanol behandelten Medienprobe). Anhand der gemessenen Wirkungs- bzw. Abscheidegrade werden die geprüften Luftfilter einer Filterklasse zugeordnet.

Gruppe	Filterklasse	End-ΔP [Pa]	Durchschnittliche Staubabscheidung (Am) [%] von synthetischem Staub	Durchschnitt der Effizienz (Em) bei 0,4 µm Partikeln [%]	Mindesteffizienz gegen 0,4 µm [%]
Grob	G1	250	50 < Am < 65	-	-
	G2	250	65 < Am < 80	-	-
	G3	250	80 < Am < 90	-	-
	G4	250	90 < Am	-	-
Mittel	M5	450	-	40 < Em < 60	-
	M6	450	-	60 < Em < 80	-
Fein	F7	450-	-	80 < Em < 90	35
	F8	450	-	90 < Em < 95	55
	F9	450	-	95 < Em	75

Die EN 779 ist weithin akzeptiert und findet, z.B. auch im asiatischen Raum, ihre Anwendung. Jedoch hat das Prüfverfahren erhebliche Schwächen, da es kaum Bezug zu realistischen Einsatzbedingungen aufweist. Die Beschränkung, Feinstaubfilter lediglich gegenüber einer Korngröße von 0,4 µm zu klassifizieren sagt nichts über die Wirksamkeit gegenüber anderen Fraktionsgrößen des Partikelspektrums aus. **In 2016 ist die ISO 16890 als weltweit gültiger Standard in Kraft getreten und wird bis 2018 die EN 779 ablösen.** die Prüf- und Klassifizierungsmethodik der ISO 16890 orientiert sich wesentlich stärker an tatsächlich zu erwartenden Luftverunreinigungen bzw. deren Abscheidung.

Partikelnormalverteilung / Partikelspektrum der Feinstaubklassen gem. ISO 16890



ISO 16890 aktuelle Norm für Grob- und Feinstaubfilter

Bereits vor den 1990er Jahren wurde damit begonnen, weltweit regelmäßig die Feinstaubbelastungen zu messen. Landesumweltämter, das Umweltbundesamt sowie die WHO veröffentlichen nunmehr regelmäßig die lokalen Belastungswerte mit den Partikelspektren PM₁, PM_{2,5} sowie PM₁₀ (im Folgenden PM_x). Diese Messgrößen lassen sich jedoch mit dem derzeit gültigen Standard für die Filterklassifizierung EN 779 nicht oder nur umständlich in Bezug setzen. Bei der Filterklassifizierung gemäß EN 779 wird zum einen der Abscheidegrad von Grobstaubfiltern mit einem definierten Prüfstaub (ASHRAE) gravimetrisch bestimmt. Bei Feinstaubfiltern (Gruppe M und F) wird zudem die Effektivität des Filters gegenüber der Partikelgröße 0,4 µm gemessen. Ein Grund für die Entwicklung der ISO 16890 ist es, den Bezug von Filterwirksamkeit zu Umweltfeinstaubmesswerten zu erreichen. Die wesentlichen Aspekte der Norm (gem. derzeitigem Stand) werden im Folgenden beschrieben.

Die auslaufende EN 779:2012 klassifiziert Luftfilter entsprechend ihrem Abscheidegrad gegenüber synthetischem Prüfstaub (ASHRAE) für Grobstaubfilter der Klassengruppe G. Bei Feinstaubfiltern der Klassengruppen M und F wird zudem die Effektivitätszunahme bei der Staubbelastung gegenüber der Partikelgröße 0,4 µm (DEHS) gemessen und gemittelt. Darüber hinaus gilt für Filter der Klassengruppe F ein entsprechender Mindestwirkungsgrad. Für die Ermittlung des Mindestwirkungsgrades wird bei einer Medienprobe die potentielle Elektrostatik mittels IPA Bad entladen, um den rein mechanischen Wirkungsgrad im Eingangszustand zu ermitteln. Es wird also bei der EN779 nicht der Prüfling sondern nur eine Medienprobe auf den Mindestabscheidegrad untersucht.

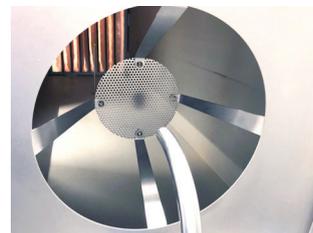
Bei der ISO 16890 ist der Prüfablauf und die Messerhebung bei der Filterprüfung vergleichbar zur EN 779. Jedoch wird die Klassifizierung nicht mittels Effizienzmessung gegenüber einer einzigen Partikelgröße (0,4 µm) sondern gegenüber den Feinstaubspektren PM_x erhoben. Für die Klassifizierung werden neben der Partikelgrößenverteilung in Roh- und Reingas auch die Fraktionsabscheidegrade (Effizienzwert E) gemäß der ISO 16890 angewendet. Die Terminologie der ISO 16890 beinhaltet:

Metrik	Beschreibung
d_i	Untere Grenze des Partikeldurchmessers in der Größenklasse i in µm
d_{i+1}	Obere Grenze des Partikeldurchmessers in der Größenklasse i in µm
\bar{d}	Geometrischer Mittelwert der Partikeldurchmesser der Größenklasse i in µm
Δd_i	Breite der Größenklasse i in µm
E_i	Anfangswirkungsgrad des unbehandelten Filterelements für die Größenklasse i in %
$E_{D,i}$	Anfangswirkungsgrad des mit Isopropanol entladenen Filterelements für die Größenklasse i in %
$E_{A,i}$	Arithmetischer Mittelwert aus E_i und $E_{D,i}$

Die ISO 16890 gruppiert die Filter gemäß Ihren Wirkungsgraden gegenüber den Partikelspektren PM_x (siehe Tabelle Klasseneinteilung gem. ISO 16890). Die Partikelspektren beinhalten jeweils alle gemessenen Partikel deren Größe kleiner oder gleich 1, 2,5 oder 10 µm ist. Die kleinste gemessene Fraktionsgröße ist hierbei 0,3 µm.

Die Klassifizierung gemäß ePM_x ergeben sich aus den gemittelten Wirkungsgraden. Diese ergeben sich aus den Einzelwerten $E_{A,i}$ sowie E_{min} (ePM_x). E_{min} wird im elektrostatisch entladenen Zustand (mittels Isopropanolgasgemisch) des Filtermediums ($E_{p,i}$) gemessen. Für die Bestimmung von E_{min} (ePM₁) und $E(ePM_1)$ werden alle Größenklassen von 0,3 µm bis einschließlich 1 µm herangezogen. Dementsprechend sind die Spektren für PM_{2,5} und PM₁₀ je 0,3 - 2,5 µm bzw. 0,3 - 10 µm. Für alle Messwerte des Protokolls werden nur die Leistungsdaten des unbestaubten Filtermediums betrachtet. Somit gibt das Klassifizierungsmodell der ISO 16890 im Unterschied zur EN 779 nur Anfangswerte an bzw. bewertet diese. Die ISO 16890 gibt damit keine Informationen zum Verhalten der Effizienz bei Staubbelastung an.

Staubbelastung
EN 779 / ISO 16890



mit Prüfstaub belasteter
Taschenfilter



Für die Filterprüfprotokolle sind alle in der Tabelle Klasseneinteilung gem. ISO 16890 aufgeführten Wirkungsgrade mit den Messwerten-E(ePMx) angegeben. Diese sind in Pentaden gerastert. Die Messwerte werden hierfür abgerundet und die Filterklasse ergibt sich aus der entsprechenden Einordnung.

Die Klasseneinteilung wird gemäß dieser Tabelle vorgenommen:

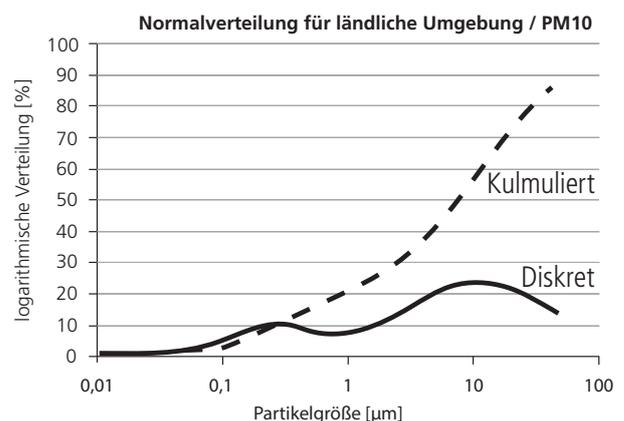
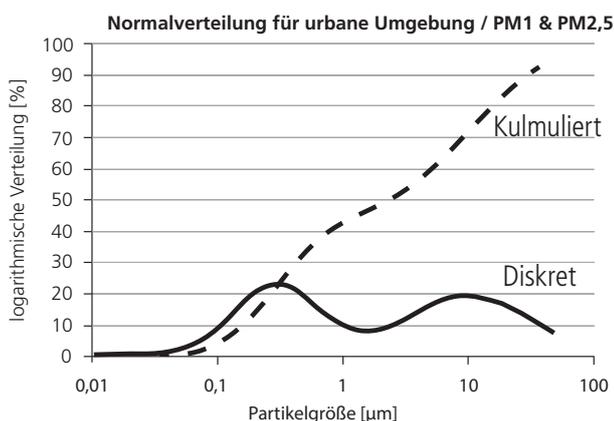
Gruppe	Anforderungsmerkmal					Klassifizierungswert
	E_{\min} ePM1	E ePM1	E_{\min} ePM2,5	E ePM2,5	E ePM10	
ISO Coarse	-	-	-	-	< 50%	ges. Wirkungsgrad
ISO ePM10	-	-	-	-	>= 50%	E(ePM10)
ISO ePM2,5	-	-	>= 50%	>= 50%	-	E(ePM2,5)
ISO ePM1	>= 50%	>= 50%	-	-	-	E(ePM1)

Die Klassifizierung der Filter im Geltungsbereich der Norm ist über die Metrik des Prüfprotokolls eindeutig. Es werden die Mittelwerte vom Wirkungsgrad des Prüflings im Lieferzustand sowie im elektrostatisch entladenen Zustand ermittelt und auf die nächstliegende Pentade abgerundet.

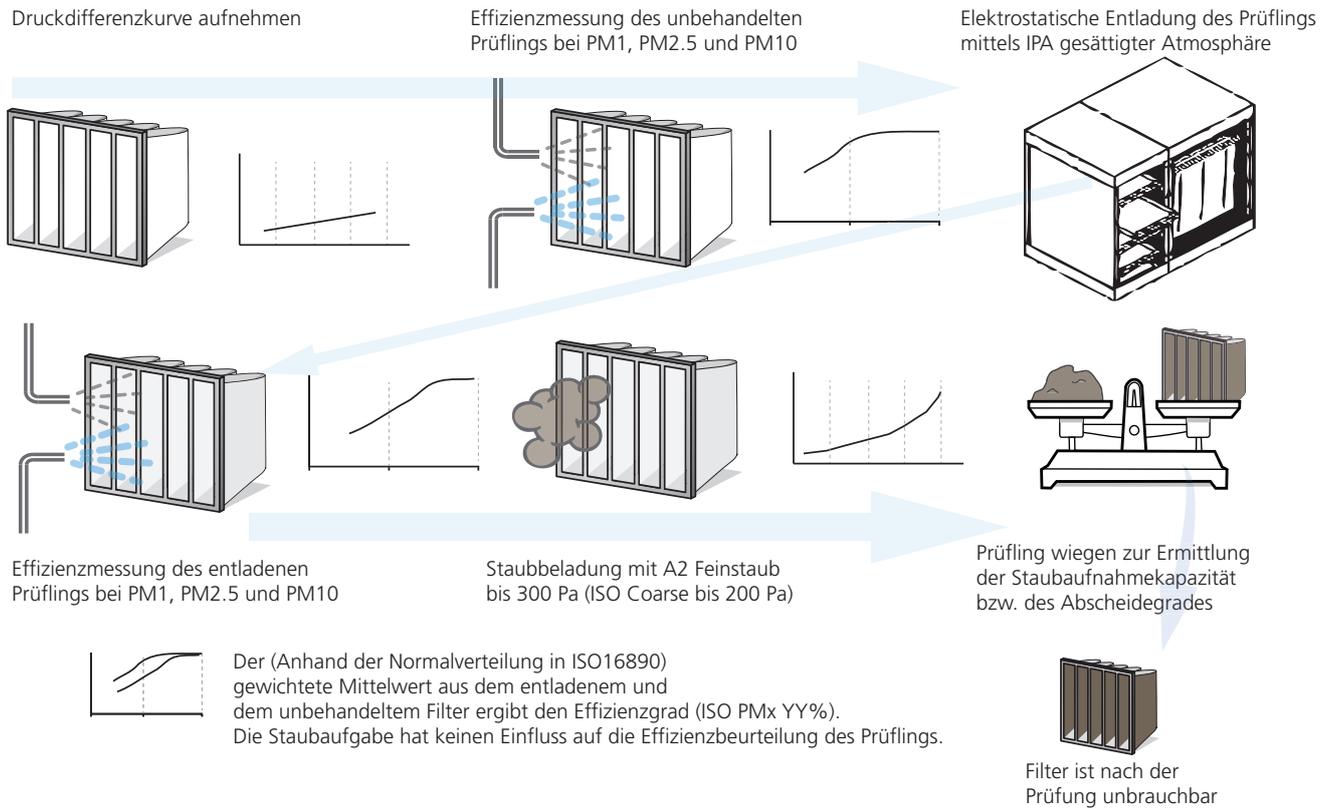
Bei der ISO 16890 ist A2 Fine Prüfstaub (gem. ISO 12103) zur Bestimmung des Wirkungsgrades (gravimetrisch) vorgesehen. Dieser Prüfstaub besteht zu >97% aus Siliziumoxid (Quarz) und anderen Oxiden. Das spezifische Gewicht des Staubes ist deutlich höher als das des problematischen ASHARE Staubes (EN 779), dessen spezifisches Gewicht Schwankungen unterliegen kann.

Die Effizienz gegenüber Partikeln wird bis zu einer Größe von 1 µm mit DEHS Aerosol gemessen. Für die Messbereiche PM2,5 und PM10 wird zudem KCL-Aerosol verwendet. Somit ist sichergestellt, dass in den Messbereichen von Partikeln >1 µm jeweils genügend hohe Partikelkonzentration für eine vertrauenswürdige Messung vorhanden sind.

Im Gegensatz zur EN 779 wird die elektrostatische Entladung bei der ISO 16890 klar definiert und sieht vor den vollständigen Prüfling zu entladen. Der entladene Prüfling wird erneut einer Partikelmessung in den Fraktionsbereichen unterzogen. Im Ergebnis wird der Mittelwert zwischen Werkszustand und neutralisierter Elektrostatik ermittelt. Die Leistungen der Fraktionsabscheidegrade sind entsprechend ihrer Relevanz gem. den in der Norm spezifizierten Normalverteilungen (Diagramme siehe unten) gewichtet.



Der Ablauf einer Prüfung gem. ISO 16890 ist im folgenden Diagramm schematisch dargestellt.



Eine einfache "Übersetzung" der Klassen ISO 16890 zu EN779 scheidet an den sehr unterschiedlichen Mess- und Bewertungsverfahren. Ein normierter Schlüssel existiert bisher nicht. Mit Revision der VDI 6022-1 vom Januar 2018 werden folgende Filterklassen in Anlehnung an die DIN EN 16 798-3 für RLT Anlagen empfohlen:

Außenluftqualität nach VDI 6022 Blatt 3a)	Qualitätsanspruch ZUL 1 (sehr hoch)	Qualitätsanspruch ZUL 2 (hoch)	Qualitätsanspruch ZUL 3 (mittel)
AUL 1 (sauber)	ISO ePM10 50 % + ISO ePM1 50 %	ISO ePM1 50 %	ISO ePM1 50 %
AUL 2 (belastet)	ISO ePM2,5 65 % + ISO ePM1 50 %	ISO ePM10 50 % + ISO ePM1 50 %	ISO ePM10 50 % + ISO ePM1 50 %
AUL 3 (hoch belastet)	ISO ePM1 50 % + ISO ePM1 80 %	ISO ePM2,5 65 % + ISO ePM1 50 %	ISO ePM10 50 % + ISO ePM1 50 %

Die Abbildung zeigt einen EN 779 / ISO 16890 Prüfstand.

1. Aufbereitung (Staub- & Aerosolaufgabe)
2. Partikelmessung Rohgas
3. Prüfling
4. Partikelmessung Reingas



Eurovent 4/21 Energieklassen für ISO 16890 ePMx Filter

Das Thema Energieeffizienz bleibt dauerhaft eines, dem sich jeder zunehmend stellen muss. Der Bereich Gebäudetechnik bietet seit jeher vielfältige Möglichkeiten für Optimierung und Einsparung von Energie. Die Notwendigkeit zur Einsparung tritt mit jeder Steigerung der Energiekosten immer deutlicher in das Bewusstsein der Verbraucher. Die Betriebskosten (Strom für Lüfter u. Ventilatoren) von Filtern betragen meist 60 - 90% der Gesamtkosten für die Filtration. Damit sind die Anschaffungskosten eines Filter im Vergleich zu den Betriebskosten, deutlich geringer. Der Stromverbrauch einer Lüftungsanlage ist unter anderem abhängig vom Luftwiderstand und der Konstruktion des Lüftungssystems. Filter bieten als Teil der Lüftungsanlage, bedingt durch den variablen Widerstand, erhebliches Potential zur energetischen Optimierung und somit zur Senkung der Betriebskosten.

In der Filterindustrie ist das Thema „energieeffizienter Filter“ nicht neu und wird bereits seit Ende der 60er Jahre des vergangenen Jahrhunderts immer wieder thematisiert. In der Tat lassen sich die Energiekosten von Filtereinsätzen unter Laborbedingungen hinreichend gut berechnen. Mit dem passenden Modell lassen sich Filter auch, wie nunmehr üblich, in Energieklassen, z.B. A, B, C usw., bestimmen. Eurovent 4/21 ist ein Modell zur Energieklassifizierung. Es ermittelt, stark vereinfacht ausgedrückt, den Gesamtenergieverbrauch eines Filters während der anzunehmenden Einsatzzeit der in Bezug zur Filterklasse bewertet wird.

Der Energieverbrauch eines Filters über die Einsatzzeit im Modell errechnet sich gemäß folgender Formel, wobei für Faktoren wie Betriebsdauer und Wirkungsgrad allgemein angenommene Mittelwerte angesetzt werden.

Der Energiebedarf eines Luftfilters errechnet sich wie folgt:

$$W = \frac{q_v \times \Delta p}{3600 \times 1000 \times \eta} \times t$$

W = Energiebedarf in kWh

q_v = 3400 m³/h (Nennvolumenstrom EN 779)

Δp = Betrag der Druckdifferenz über die Einsatzzeit, ermittelt aus der Druckzunahme vom Anfangsdruckverlust bis zu einem Enddruckverlust von 450 Pa bei Staubaufgabe von Prüfstaub unter Laborbedingungen. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens würde den Rahmen dieser Unterlagen sprengen.

t = 6000 Betriebsstunden (Annahmewert bis Filterwechsel)

η = 0,5 - dies entspricht einem fiktiven elek. Wirkungsgrad des Lüfters von 50%. Die Bandbreite der im Einsatz befindlichen Lüfter liegt tatsächlich bei <25 bis zu 80%. Die Richtlinie geht von einem Mittelwert von 50% aus.

Für unseren Taschenfilter HS-AirSynErgy 88 ergibt sich gem. dem Modell „Eurovent 4/21“ ein Druckdifferenzbetrag von 83 Pa über die Einsatzdauer. Eingesetzt in die vorgenannte Formel ergibt dies einen Energieverbrauch von W= 940 kWh. Was wiederum gemäß dem Eurovent-Rechenmodell entsprechend der untenstehenden Tabelle die Klassifizierung „A“ ergibt. In unseren Unterlagen kennzeichnen wir nur Produkte, welche die Energieklasse „A“ vergleichbar Eurovent 4/21 erfüllen. HS-Luftfilterbau GmbH tritt für offene und frei verfügbare Standards ein. Das Euroventenergieklassifizierungsmodell ist proprietär und die Anwendung bedingt eine kostenintensive Zertifizierung mit laufenden Kosten, ohne signifikante Vorteile für den Anwender zu bieten. Daher wenden wir den Standard an, ohne unseren Kunden die Kosten hierfür aufzubürden, dürfen aber unsere Produkte nur als „vergleichbar“ kennzeichnen.

Eine Energieklassifizierung für Luftfilter ist nach unserer Auffassung auch nicht in jedem Fall sinnvoll, da gängige Modelle dem unbedarften Anwender glauben machen der Energievorteil zeige sich garantiert. Bei vielen Anwendungen ist es meist jedoch so, dass die Modelldaten nur eine Indikation über den potentiellen Energieverbrauch liefern.

Ein Filter ist kein in sich geschlossenes System und der energetische Wirkungsgrad einer Anlage ist von weit mehr Einflüssen als dem Filter abhängig. Insofern ist man nicht gut beraten nur nach der Energieklasse zu entscheiden - insbesondere dann, wenn betreffende Lüftungsanlagen nicht über geregelte Lüfter verfügen oder Filter aus Hygienegründen in kurzen Intervallen gewechselt werden müssen.

Energieeffizienzklassen in Bezug auf den durchschnittlichen jährlichen Energieverbrauch (AEC) für Filterklassen gem. ISO 16890 geprüft bei 3400 m³/h bei 6000 h Betriebszeit:

für epM10	A+	A	B	C	D	E
AEC in kWh/a ePM ₁₀ und ePM _{10 min} ≥50%, M _x = 400 g (AC fine)						
50 & 55%	450	550	650	750	1100	>1100
60 & 65%	500	600	700	850	1200	>1200
70 & 75%	600	700	800	900	1300	>1300
80 & 85%	700	800	900	1000	1400	>1400
>90%	800	900	1050	1400	1500	>1500

für epM2.5	A+	A	B	C	D	E
AEC in kWh/a ePM _{2.5} und ePM _{2.5 min} ≥50%, M _x = 250 g (AC fine)						
50 & 55%	700	800	950	1300	1900	>1900
60 & 65%	750	850	1000	1350	1950	>1950
70 & 75%	800	900	1050	1400	2000	>2000
80 & 85%	900	1000	1200	1500	2100	>2100
>90%	1000	1100	1300	1600	2200	>2200

für epM1	A+	A	B	C	D	E
AEC in kWh/a ePM ₁ und ePM _{1 min} ≥50%, M _x = 200 g (AC fine)						
50 & 55%	800	900	1050	1400	2000	>2000
60 & 65%	850	950	1100	1450	2050	>2050
70 & 75%	950	1100	1250	1550	2150	>2150
80 & 85%	1050	1250	1450	1800	2400	>2400
>90%	1200	1400	1550	1900	2500	>2500

Die Angaben beziehen sich auf Filter der Baugröße 592x592 mm gem. EN 15805.

EN 1822 und ISO 29463 Normen für HEPA und ULPA Filter

Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA Filter) liefern die höchsten Abscheidegrade im Rahmen der mechanischen Luftfiltration. Filter im Geltungsbereich dieser Norm werden als finale Filterstufe in sensiblen Prozessen, wie z.B. Reinräumen, OP-Decken, Isolatoren, Sicherheitswerkbänken und anderen Zuluftbereichen mit höchsten Ansprüchen an Sicherheit und Abscheideleistung eingesetzt. Daneben werden diese Filter in auch der sicherheitsrelevanten Abluftbehandlung eingesetzt, z.B. bei Ölnebel- und Rauchgasabsaugung, Asbestsanierung oder Endstufen bei Enstaubung uvm.

Diese Filter schützen Umwelt, Menschen sowie Produkte vor Luftverunreinigungen mit sehr geringen Partikelgrößen, z.B. Schwebstoffe wie Bakterien, Viren, nanoskopische Stäube.

Die wesentlichen Leistungsdaten eines Schwebstofffilters sind:

- Nennvolumenstrom (auf diesen beziehen sich alle Leistungsangaben)
- Anfangsdruckdifferenz
- Gesamtabscheidegrad (integraler Abscheidegrad) gegenüber der Partikelgröße mit der höchsten Penetration (MPPS; Most Penetrating Particle Size)
- Lokale Abscheidegrade gegenüber der Partikelgröße mit der höchsten Penetration (MPPS)
- Leckfreiheit (keine Unterschreitung von lokalen Mindestabscheidewerten) ab Klasse H13 bzw. ISO 29463 ISO 35 H

Das Einsatzprofil von Schwebstofffiltern stellt hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung und Leistungsprüfung, sowohl beim Filterhersteller als in der Regel auch bei der qualifizierenden Messung nach dem Einbau bzw. im Einsatz. EN 1822 und ISO 29463 gliedern die Filter in folgende Filterklassen:

Gruppe	Filterklasse		Integralwert		Lokalwert / Leckgrenze	
	EN 1822	ISO 29463	Abscheidegrad für MPPS in %	Durchlassgrad für MPPS in %	Abscheidegrad für MPPS in %	Durchlassgrad für MPPS in %
E (EPA)	E10	-	≥ 85	≤ 15	-	-
	E11	ISO 15 E	≥ 95	≤ 5	-	-
	-	ISO 20 E	≥ 99	≤ 1	-	-
	E12	ISO 25 E	≥ 99,5	≤ 0,5	-	-
	-	ISO 30 E	≥ 99,9	≤ 0,1	-	-
H (HEPA)	H13	ISO 35 H	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
	-	ISO 40 H	≥ 99,99	≤ 0,01	≥ 99,95	≤ 0,05
	H14	ISO 45 H	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
	-	ISO 50 U	≥ 99,999	≤ 0,001	≥ 99,995	≤ 0,005
U (ULPA)	U15	ISO 55 U	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
	-	ISO 60 U	≥ 99,9999	≤ 0,0001	≥ 99,9995	≤ 0,0005
	U16	ISO 65 U	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
	-	ISO 70 U	≥ 99,99999	≤ 0,00001	≥ 99,9999	≤ 0,0001
	U17	ISO 75 U	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001

Weltweit gibt es eine Reihe von nationalen Standards zur Prüfung und Klassifizierung von Schwebstofffiltern wie z.B. US-Mil Std 282, ASME AG-1, ANSI/UL 586, IEST-RP-CC001.4 und andere. Die Europäische Prüfnorm EN 1822 bzw. die im wesentlichen darauf basierende ISO 29463 haben sich weltweit als anerkannter Standard für die Prüfung und Klassifizierung durchgesetzt.

Die EN 1822 Prüfung beinhaltet drei Prozessschritte. Im ersten Prozessschritt muss zunächst die Partikelgröße mit dem größten Durchlassgrad (most penetrating particle size / MPPS) bestimmt werden. Hierfür wird das Filtermedium zunächst mit einem polydispersen Prüfaerosol beaufschlagt und der Fraktionsabscheidegrad mittels diskreter Zähler, z.B. optische Partikelzähler oder Kondensationskernzähler, bei verschiedenen Partikelgrößen bestimmt. Als Prüfaerosol kommt in der Regel DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) zum Einsatz. Andere ebenfalls fluidbasierende Alternativen sind PAO (Poly Alpha Olefin oder DOP (Di-Octyl-Phtalat). Letzteres findet kaum noch Verwendung, da es im Verdacht steht krebserregend zu sein. Aus dem Messverlauf ergibt sich eine Korngröße mit dem höchsten Durchlassgrad. Diese ist für den Prüfungsverlauf die Korngröße zur Effizienzbestimmung. Bei Membranfiltern, z.B. aus ePTFE, oder äußerst sensiblen Anwendungsbereichen werden auch solide Aerosole mit Partikeln aus PSL (Polystyrol-Latex) zur Abscheidegradbestimmung verwendet.

Im zweiten Schritt wird das Filterelement auf Leckfreiheit geprüft. Meist sind die Filtermedien empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen. Je nach Toleranzschwankung können die Filtermedien während der Produktion minimale Leckagen erleiden. Ebenso kann es während der Fertigung zu Leckagen bei Verklebungen kommen. Selbst kleinste Leckagen führen zu lokal stark erhöhten Partikeldurchlässen in den Reingasbereich und in der Folge entspricht der Filter nicht der geforderten Spezifikation. Daher ist es unerlässlich, jeden Filter bei Fertigungsende einer Einzelprüfung auf Leckfreiheit zu unterziehen. Dies gilt für alle HEPA und ULPA Filter der Klassen EN 1822 H13 bis U17 bzw. ISO 29463 ISO 35 H bis ISO 75U.

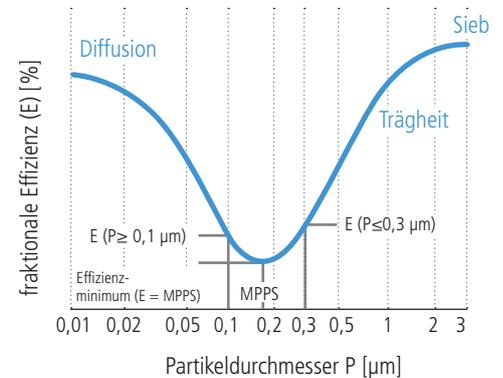
Dazu wird das Filterelement bei Nennvolumenstrom mit Prüfaerosol beaufschlagt. Dessen Korngrößenverteilung entspricht im Mittelwert MPPS. Verfahrbare, isokinetische Sonden detektieren die Partikelkonzentrationen über die gesamte Abströmfläche. Zeitgleich werden die Partikelanzahlkonzentrationen der anliegenden Aerosolkonzentrationen auf der Anströmseite gemessen. Aus den Einzelvergleichswerten werden die lokalen Abscheidegrade bzw. Penetrationsraten ermittelt.

Überschreitet die lokal gemessene Penetration den in der Norm für jede Filterklasse definierten Grenzwert (siehe Tabelle S.26) an keiner Stelle, gilt das Filterelement als leckfrei. Zusätzlich wird der Druckverlust des Filterelements bei dem anliegenden Prüfvolumenstrom gemessen. Die Prüfdokumentation muss zudem die Messlufttemperatur, die relative Luftfeuchte sowie den barometrischen Druck aufweisen.

Wird während des Scantests eine Leckstelle detektiert, gibt das System automatisch ein Leckprotokoll mit den Lagekoordinaten der Leckstellen aus. Die Norm erlaubt es dem Hersteller Leckstellen zu reparieren. Dies erfolgt in der Regel durch vergießen der Leckstelle im Filtermedium mit Polymeren, z.B. Polyurethan, Epoxid oder Cyanacrylaten. Es dürfen nicht mehr als 0,5 % der gesamten Filterfläche versiegelt werden. Nach der Reparatur wird das Filterelement durch einen weiteren Scanvorgang erneut auf Leckfreiheit geprüft.

Als dritter Schritt wird der integrale Abscheidegrad für das gesamte Filterelement bzw. dessen Abströmfläche bestimmt. Die einzelnen, während des Scantests gemessenen Effizienzergebnisse werden integral gemittelt. Sofern dies aufgrund der Geometrie nicht möglich ist, kann der integrale Abscheidegrad durch eine Einzelpunktmessung mit feststehenden Sonden bestimmt werden. Die Messgenauigkeit ist dabei jedoch erheblichen Schwankungen unterlegen.

Typische Effizienzkurve eines faserbasierenden Filters in Abhängigkeit der Filtereffekte. Deren Zusammenwirken ist im MPPS-Bereich am schlechtesten, so dass Partikel in diesem Größenspektrum den Filter am ehesten durchdringen können.



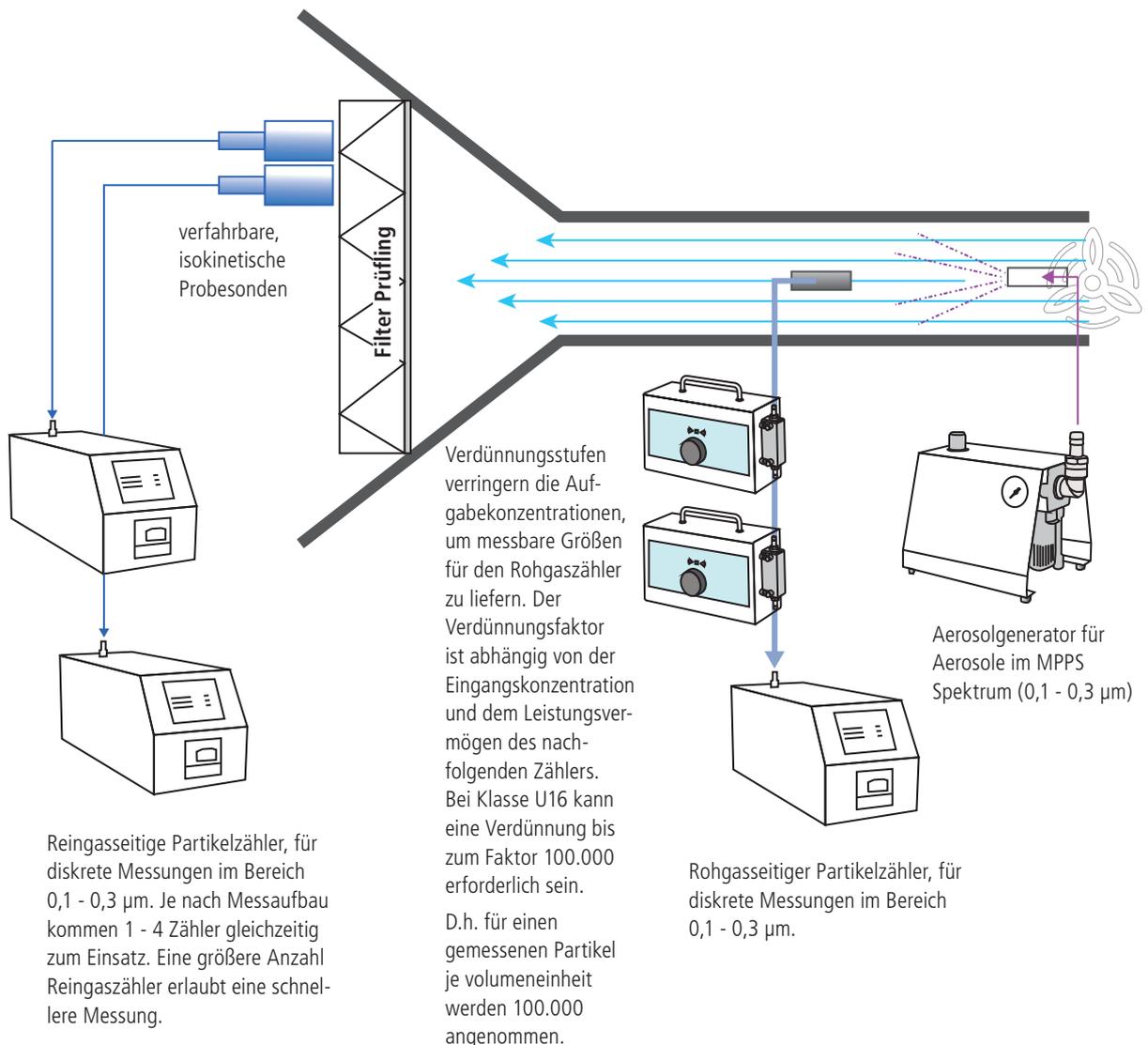
MPPS: Most Penetrating Particle Size
Effizienzminimum

Foto: Scanteststand gem. EN1822 bzw. ISO 29463



Neben dem Scantest ist auch der sogenannte Ölfadentest für Filter der Klassen H13 und H14 bzw. ISO 35H bis ISO 45H zulässig. Die Leckfreiheit wird hier mittels eines Ölnebels dessen mehrheitliche Partikelgrößen im Bereich 0,3 bis 0,5 µm liegen nachgewiesen. Der Ölnebel wird mit ca. 1,3 cm/s durch den Prüfling geleitet. Leckagen und Schwachstellen in der Filterintegrität lassen den Nebel hindurch. Dieser steigt Reinluftseitig als gut sichtbarer Nebelfaden auf und indiziert eine Leckage. Dieser Test eignet sich ebenfalls gut für Filter, deren Geometrie keinen Scantest zulässt wie z.B. Filterpatronen, Filter mit V-förmigen Filterpaketen (z.B. Kompaktfilter). Als Basis für den Ölnebel können Paraffine, Weißöl oder Nebel für Strömungsvisualisierung in Reinraumumgebungen dienen. Die ISO 29463 beschreibt zusätzlich für HEPA Filter die Messung mittels Photometer als weitere Methode zur Prüfung der Leckfreiheit. Hier kann im Sinne der Norm jedoch kein Abscheidegrad gemäß MPPS bestimmt werden, da Photometer keine diskreten Messungen der Partikelgröße ermöglichen. Der abschließende Testbericht bescheinigt die Leckfreiheit und führt die Messdaten auf. Diese sind abhängig vom gewählten Prüfverfahren. Die Zuordnung zu dem einzelnen Prüfling erfolgt über individuelle Seriennummern. EPA-Filtern werden i.d.R. nicht einzeln, sondern im Rahmen einer Baumusterprüfung geprüft. Der vergleichsweise hohe Durchlassgrad erlaubt keinen einfachen Ölfadentest, da hier die Ölnebel quasi ungehindert durchtreten und das Scannen ist für diese eher niederen Abscheideleistungen i.d.R. zu aufwendig. Die Überprüfung des Abscheidegrades wird nicht einzeln wie für HEPA und ULPA Filter, sondern als Mittelwert aus einzelnen stichprobenartigen Messungen des Abscheidegrades für die Baureihe ermittelt.

EN 1822-4 Scantest



EN 1822-4 Scantestbericht

Wenn der zu prüfende Filter für leckfrei befunden wird und die Abscheidegrade das Leistungsminnium erfüllen, wird ein Testbericht erzeugt. Dieser enthält alle relevanten Prüfdaten und ist weitestgehend selbsterklärend.

Die Prüfbedingungen geben neben den Grunddaten auch Aufschluss über das verwendete Prüfaerosol sowie die mittlere Partikelkonzentration der diese Messung zugrunde liegt.

Das Lecksignal zeigt die höchste gemessene Einzelpenetrationsrate in absoluten Zahlen an (hier 124). Der Wert in Klammern gibt an, ab welcher Schwellenüberschreitung von Einzelmesswerten ein potentielles Leck angenommen wird (hier 138).

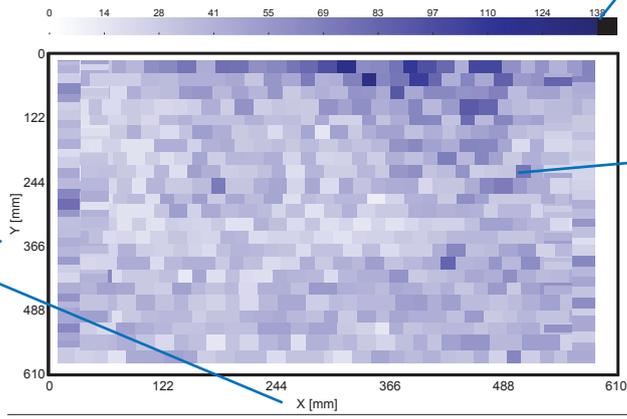
Über das XY-Koordinatensystem können Stellen mit hohen Penetrationsraten und Leckagen am Filter schnell erkannt und wenn nötig mittels Versiegelungsmasse beseitigt werden.



17136

Prüfbericht gemäß EN 1822-4
Test report according to EN 1822-4
Rapport de test selon EN 1822-4

Filterdaten / Filter data / Fiches techniques					
Artikel-Nummer Part no. Numero du filtre	Bezeichnung Filter type Type du filtre	Serien-Nummer Serial no. Numero de production	Prüfdatum Date of test Date du test	Prüfer Operator Operateur	
40-06100610-M069D586	Mikro SF-AL H14	S-11522	2014-07-22	PRA	
Filterabmessung (L x B x T) Filter dimensions (L x W x D) Dimensions du filtre (L x l x P)	Nennvolumenstrom Nominal flow rate Debit d'air nominal	Anfangsdruckdifferenz Initial pressure drop Perte de charge initiale	2014-02861		
610 x 610 x 69mm	560m³/h	108Pa			
Filterklasse Filter class Classe de filtration	Minimaler integraler Abscheidegrad Minimum integral efficiency Minimum efficacité intégrale	Minimaler lokaler Abscheidegrad Minimum local efficiency Minimum efficacité locale	Kommentar Comment Comment		
HEPA H14	99.9950000%	99.9750000%			
Prüfbedingungen / Test Conditions / Conditions de test					
Prüfvolumenstrom Test flow rate Debit de test	Prüfaerosol Test aerosol Aerosol de test	Partikelgröße Particle size Taille de particule	Rohgaskonzentration Upstream concentration Concentration amont	Temperatur Temperature Température	Rel. Feuchte rel. Humidity Humidité rel.
560m³/h	DEHS	0,10 - 0,30µm	6,58E+3#/cm³	27,2°C	57,6%
Prüfergebnisse / Test results / Résultats de test					
Klassifizierung gemäß Testergebnis Classification by test result	Integraler Abscheidegrad Integral efficiency Valeur intégrale d'efficacité	Minimaler Abscheidegrad Minimum efficiency Minimum valeur d'efficacité	Druckdifferenz Pressure drop Perte de charge		
HEPA H14	99.9953715%	99.995325%	116Pa		
Maximum (Leak signal) Maximum (Leak signal) Maximum (Signal du fuite)	Anzahl der gefundenen Leckstellen Number of leaks detected	Lecktest gemäß EN 1822-4 Leakage test to EN 1822-4	bestanden/passed/accepté		
124 (138)	0				



Der Farbgradient zeigt die Intensität der Partikelpenetration in Korrelation zum Lecksignal. In diesem Fall wären Einzelergebnisse mit einem Durchlass >= 138 Partikel als potentielles Leck zu betrachten.

Die Kacheln entsprechen jeweils einer Messsondenfläche, deren Färbung die Penetrationsrate anzeigt. Je dunkler die Färbung, desto höher die Penetration. Eine Einzelfläche hat eine Größe von 30x30 mm. Somit ist auf den ersten Blick die Effizienztopographie erkennbar.

Produktlabel für Filter mit Scantest der HS-Luftfilterbau GmbH

Die Produktaufkleber enthalten alle Prüfdaten aus dem Scantest sowie ein Diagramm, das sämtliche Messungen als 2D-Diagramm ausgibt, welchem die Daten des obigen 3D Diagramms aus dem Testbericht zugrunde liegen. Die Luftrichtung gibt die Richtung an in die der Test erfolgte. Bis auf wenige Ausnahmen, z.B. Filter mit ePTFE Filtermedien, können HEPA und ULPA Filter in beide Richtungen Angeströmt und betrieben werden.

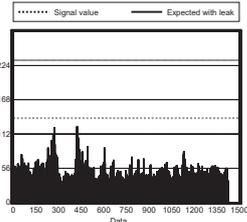
SER.-#: S-11522
TST: 17136

Air Flow Direction

HEPA-Filter, Mikro SF-AL H14, EN1822: H14

Artikel-Nr. / Part-No.:	40-06100610-M069D586	Prüfaerosol / Test aerosol:	DEHS
Abmessungen (L x B x T) / Dimensions (L x W x D):	610 x 610 x 69 [mm]	Partikelgröße / Particle size:	0,10 - 0,30 [µm]
Abscheidegrad / Efficiency DIN EN 1822:	>= 99,9950000 [%]	Rohgaskonzentration / Upstream concentration:	6,58E+3 [#cm³]
Anfangsdruckdifferenz / Initial pressure drop:	108 [Pa]	Nennvolumenstrom / Nominal air flow:	560 [m³/h]
Temperaturbeständigkeit / Temperature resistance:	65 [°C]	Integraler Abscheidegrad / Integral separation:	99,9953715 [%]
Seriennummer / Serial-No.:	S-11522	Minimaler Abscheidegrad / Minimal separation:	99,995325 [%]
Auftrags-Nr. / Order-No.:	2014-02861	Leckstellen / Number of leaks:	0
Testdatum / Test date (Operator):	2014-07-22 (PRA)	Lecktest / Leakage test:	Bestanden / Passed





EN 1822-4 Ölfadentest

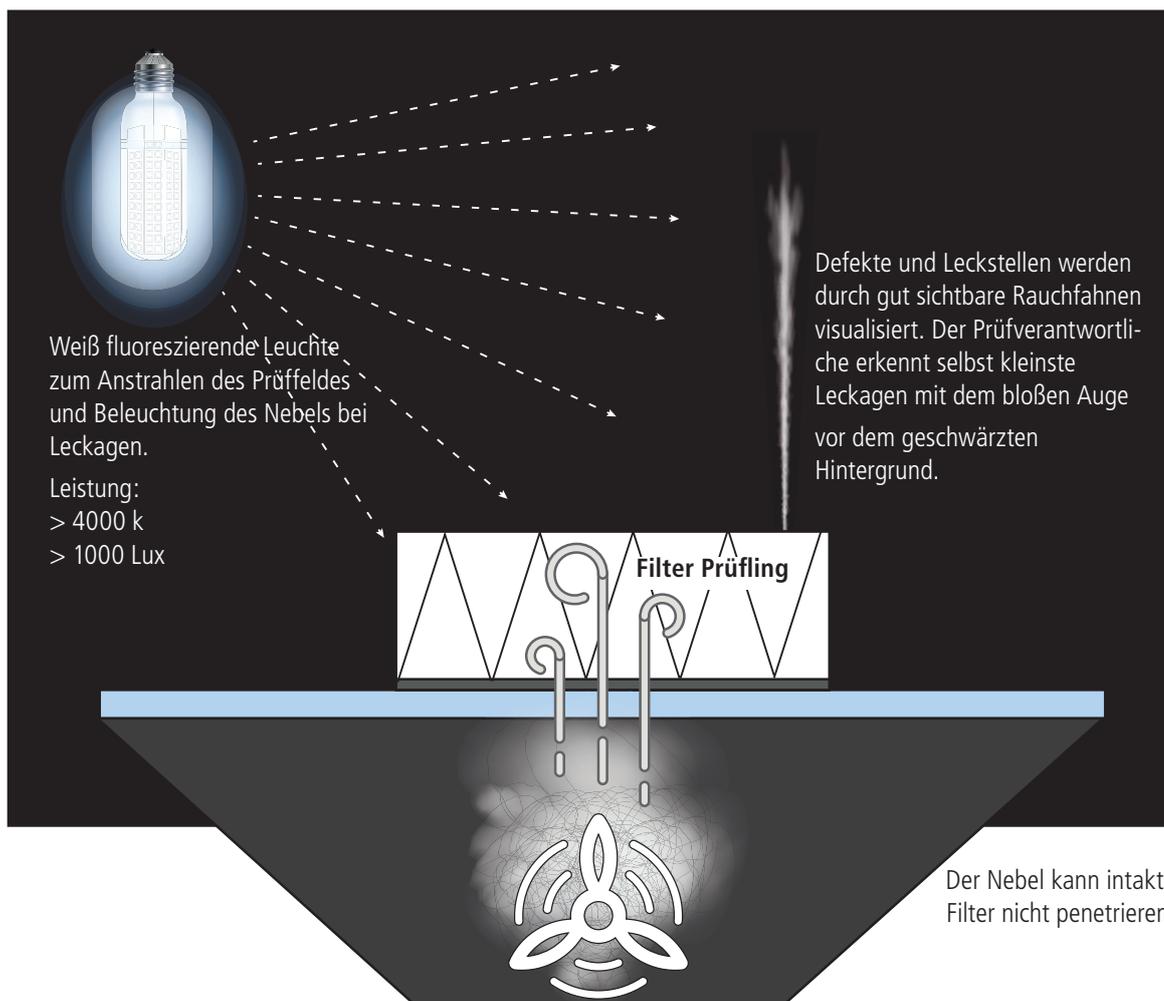
HEPA Filter mit V-förmiger Filtergeometrie können beispielsweise nicht gescannt werden und müssen per Ölfadentest geprüft werden.



Der Ölfadentest ist eine sichere, schnelle und einfache Methode zur Endprüfung von HEPA Filtern und wird i.d.R. für industriell genutzte Filter verwendet, die z.B. bei Absauganlagen und Belüftungssystemen mit turbulenter Strömung eingesetzt werden. Außerdem wird der Ölfadentest für Filter genutzt, welche aufgrund ihrer Geometrie nicht gescannt werden können. Der Ölfadentest ist ein qualitatives Prüfverfahren, bei dem die Leckfreiheit visuell nachgewiesen wird. Daher ist es für die Durchführung äußerst wichtig, das Prüfpersonal regelmäßig zu schulen und die erforderliche Nachweisgrenze des Verfahrens regelmäßig mit Referenzfilterelementen mit genau definierten Lecks, die anhand des Scan-Verfahrens festgestellt wurden, zu prüfen.

Neben der Leckfreiheit wird nur die Druckdifferenz bei dem Nennvolumenstrom sowie der integrale Abscheidegrad des Filters ermittelt. Bei der Prüfung wird der Filter von einem polydispersen Öltröpfchenaerosol mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 1,3 cm/s angeströmt, die zur Optimierung des Verfahrens variiert werden kann. Der Filter wird horizontal und abgedichtet in dem Prüfstand fixiert. Durch die Prüffilteraufnahme darf kein Teil der Querschnittsfläche des Filters verdeckt sein. Das polydisperse Prüfaerosol hat einen Medianwert der Partikeldurchmesser die zwischen 0,3 und 1,0 µm liegen.

Unkontrollierte Luftströmungen aus der Umgebung sind abzuschirmen. Die Umgebung des Filters ist abzudunkeln und der Beobachtungshintergrund zu schwärzen. Unter diesen Voraussetzungen sind Lecks an deutlich sichtbaren, aus den Leckstellen austretenden Ölfäden zu erkennen. Eine Leckfreiheit nach EN 1822-4 definierten Grenzwerten für Filter bis Klasse H14 besteht dann, wenn keine sichtbaren Ölfäden auftreten.



Weiß fluoreszierende Leuchte zum Anstrahlen des Prüffeldes und Beleuchtung des Nebels bei Leckagen.

Leistung:
> 4000 k
> 1000 Lux

Defekte und Leckstellen werden durch gut sichtbare Rauchfahnen visualisiert. Der Prüfverantwortliche erkennt selbst kleinste Leckagen mit dem bloßen Auge vor dem geschwärzten Hintergrund.

Filter Prüfling

Der Nebel kann intakte Filter nicht penetrieren.

Nebel mit Korngrößenverteilungsmedian im Bereich 0,3 - 1 µm wird generiert und mit einer Abströmgeschwindigkeit von ca. 1,3 cm/s durch den Filter geleitet.

ISO 29461 Ansaugfiltersysteme von Rotationsmaschinen

Luftfiltersysteme spielen eine entscheidende Rolle im Betrieb von Rotationsmaschinen wie z.B. bei Gasturbinen zur Stromerzeugung. Probleme wie Abrasion, Fouling und Korrosion treten besonders auf, wenn Salz oder andere Partikel in die Maschine gelangen, da Verunreinigungen die Betriebseffizienz einer Turbine erheblich beeinträchtigen können.

Die Klassifizierung von Filtern im Rahmen der ISO 29461 umfasst die Filterklassen ISO T1 bis ISO T13. Dabei orientieren sich die Filterklassen ISO T1 bis ISO T9 an den Prüfverfahren gemäß ISO 16890, während die Filterklassen ISO T10 bis ISO T13 auf das Prüfverfahren gemäß ISO 29463 Bezug nehmen. Die Ergebnisse der Prüfungen basieren somit auf den aktuellen Prüfstandards für Filter im Bereich der allgemeinen Raumlufttechnik (in der Normenreihe ISO 16890) sowie für Schwebstofffilter (in der Norm EN 1822 Teil 1 bzw. der Normenreihe ISO 29463).

Die folgende Tabelle bietet einen Überblick über die Filterklassen gemäß ISO 29461 und zeigt deren Bezug zu den etablierten Referenznormen auf.

Filterklasse ISO 29461	Filtergruppe ISO 16890 EN 1822	Fraktionswirkungsgrade gem. ISO 16980			EN 1822 Wirkungsgrad MPPS
		gravimetrischer Anfangsabscheidegrad A_{100}	ePM10	ePM2,5 _{min}	
T1	ISO Coarse	20 % < A100 < 50 %			
T2		≥ 50 %			
T3		≥ 70 %			
T4		≥ 85 %			
T5	ISO ePM10	≥ 50 %			
T6	ISO ePM2,5	≥ 50 %			
T7	ISO ePM1	≥ 50 %			
T8		≥ 70 %			
T9		≥ 85 %			
T10	EPA	≥ 85 %			
T11		≥ 95 %			
T12		≥ 99,5 %			
T13	HEPA	≥ 99,95 %			

In Abhängigkeit der zu Prüfenden Filterklasse wird der Prüfablauf folgendermaßen durchgeführt

- Prüfung der Anfangsdruckdifferenz
- Ermittlung des gravimetrischen Anfangsabscheidegrads im Vergleich zur aufgenommenen Masse an Prüfstaub für die Filterklassen ISO T1, ISO T2, ISO T3 und ISO T4 Schäume
- Ermittlung des Fraktionsabscheidegrads für die Filterklassen ISO T5 und ISO T6
- Konditionierung (elektrostatische Entladung) für die Ermittlung des Fraktionsabscheidegradminimums für die Filterklassen ISO T7, ISO T8 und T9
- Gegebenenfalls Ermittlung des Abscheidegrads im MPPS für hocheffiziente Luftfilter der Filterklassen ISO T10, ISO T11, ISO T12 und ISO T13
- Staubbeldatungstest zur Ermittlung des Staubspeichervermögens



Zur Erfassung der Filtereffizienz nimmt die Prüfung von Luftfiltern gemäß ISO 29461 Bezug auf die Prüfverfahren gemäß ISO 16890 und ISO 29463 resp. EN1822. Allerdings existieren Unterschiede beim Ablauf der Prüfung, welche im Folgenden für die Filterklassen T1 bis T4, T5 bis T9 und T10 bis T13 genauer erläutert werden.

Filterklassen ISO T1 - ISO T4 gemäß ISO 29461

Gemäß der aktuellen ISO 16890 Norm werden Luftfilter der ISO Coarse Gruppe anhand ihres Anfangsabscheidegrads bei einer zugeführten Staubmasse von 30 g ISO Fine-Staub (auch bekannt als L2-Staub gemäß ISO 15957 oder A2 gemäß ISO 12103-1) klassifiziert. Im Gegensatz dazu sieht die ISO 29461-1 Norm vor, dass eine Staubmasse von 100 g verwendet wird. Bei dieser Norm werden die Filter der Coarse-Gruppe nicht mehr als ISO Coarse kategorisiert, sondern in die vier Filterklassen ISO T1, ISO T2, ISO T3 oder ISO T4 eingeteilt. Die grundlegenden Informationen bleiben in beiden Normen unverändert.

Filterklassen ISO T5 - ISO T9 gemäß ISO 29461

Alle Filter in der ISO ePM10-Gruppe gemäß ISO 16890 erhalten nach der neuen ISO 29461-1 Norm die Klassifizierung ISO T5, während Filter in der ISO ePM2,5-Gruppe die Klassifizierung ISO T6 erhalten.

In der ISO ePM1-Gruppe gemäß ISO 16890 unterscheidet die neue ISO 29461-1 Norm auch feinere Unterschiede und definiert die Filterklassen ISO T7, ISO T8 und ISO T9. Hierbei ist zu beachten, dass die feinere Unterscheidung in der ISO 16890 innerhalb aller drei ISO ePMx-Gruppen auf gerundeten PMx-Abscheideeffizienzen basiert, die aus Durchschnittswerten der Fraktionsabscheidegrade resultieren, die sowohl an unbehandelten als auch an mit Isopropanoldampf konditionierten Filtern ermittelt werden. Die Prüfung des konditionierten Luftfilters zielt darauf ab, eventuelle Abscheideeffekte durch elektrostatische Ladungen auf den Fasern des Filtermediums zu berücksichtigen. Es ist zu beachten, dass die elektrostatische Ladung je nach Art des Filtermaterials auf dem Prüfstand eine hohe Abscheideleistung zeigen kann, während die tatsächliche Abscheideleistung in realen Anwendungen oft geringer ausfällt.

Die Unterteilung der ISO 29461-1 in die drei Klassen ISO T7 bis ISO T9 innerhalb der ePM1-Gruppe basiert hingegen auf der Unterscheidung der ePM1,min-Werte und bewertet somit ausschließlich die Filterwirkung ohne Berücksichtigung einer möglichen elektrostatischen Aufladung.

Filterklassen ISO T10 - ISO T13 gemäß ISO 29461

EPA- und HEPA-Schwebstofffilter der Klassen ISO T10 bis ISO T13 nach ISO 29461-1 korrespondieren mit den Filterklassen E10 bis H13 nach EN 1822-1, orientieren sich aber an den Verfahren der ISO 29463

Im Rahmen der ISO 29463-1 Klassifizierung gibt es keine direkte Entsprechung für ISO T10 bzw. E10. Stattdessen entsprechen die Klassen ISO T11, ISO T12 und ISO T13 den Filterklassen ISO 15E, ISO 25E und ISO 35H gemäß ISO 29463-1.



Filterwechsel bei einer Gasturbine in Bangkok, Thailand. Je Turbine werden bei der Hauptfilterstufe dieser Anlage je 540 Luftfilter vom Typ HS-Deka Pak GT der Klasse ISO 29463:T9 eingesetzt.

Staubspeichervermögen

Bezüglich der Staubbelastung schreibt die ISO 29461-1 für Filter der Coarse-Gruppe einen maximalen Enddruckverlust von 375 Pa vor. Für Filter der ePMx-Gruppen sowie für EPA- und HEPA-Filter beträgt der maximale Enddruckverlust im Zuge der Staubbelastungsprüfung gemäß dieser Norm 625 Pa.

Im Gegensatz dazu legt die ISO 16890-3 für Filter der Coarse-Gruppe einen maximalen Enddruckverlust von 200 Pa fest. Für Filter der ePMx-Gruppen wird ein maximaler Enddruckverlust von 300 Pa angegeben, wobei die Staubbelastung für Filter der ISO ePMx-Gruppen optional ist.

Die ISO 29463 für Schwebstofffilter hingegen enthält keine Vorgaben zur Staubbelastung. Eine Staubbelastungsbetrachtung für Schwebstofffilter mag bei der ISO 29461-1 zu falschen Annahmen führen, da Schwebstofffilter im Allgemeinen als reine Partikelfilter und nicht als Staubfilter eingesetzt werden. EPA und HEPA Filter werden quasi stets durch gute Vorfilter geschützt, so dass der Wert für die Staubbelastung nicht unbedingt eine Messgröße für die Filterleistung oder Standzeitabschätzung sein kann.

Volumenstrom

In Bezug auf die vorgesehenen Enddruckverluste ist zu beachten, dass die ISO 16890 eigentlich einen Volumenstrombereich von 900 m³/h bis 5400 m³/h festlegt. In der Regel wird der Test jedoch bei 3400 m³/h durchgeführt, sofern der Filterhersteller keinen anderen Nominalvolumenstrom angibt.

Die ISO 29463 hingegen gibt keine spezifischen Vorgaben bezüglich des Volumenstrombereichs, und der Test sollte beim Nominalvolumenstrom durchgeführt werden. Die neue ISO 29461-1, die sich auf statische Zuluftfilter im Gasturbinenbereich bezieht, legt einen Volumenstrombereich von 850 m³/h bis 8500 m³/h fest. Wenn die Filter daher möglicherweise bei einem höheren Volumenstrom getestet werden, als dies in den Normen üblicherweise der Fall ist, auf die sich die ISO 29461-1 bezieht, ist es logisch, dass auch höhere Enddruckverluste vorgegeben werden. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass die Obergrenze von 8500 m³/h in der ISO 29461-1 ein sehr hoher Wert ist, der für die meisten Anwendungen im Bereich der Gasturbinenzuluftfiltration unrealistisch ist. Eine derartige hohe Volumenstrombelastung pro einzelner Filtereinheit ist in den meisten Anwendungen außerhalb von Verdichter-, Gasförderstationen oder Offshore-Öl-Plattformen selten anzutreffen.

ISO 10121-3 Klassifizierungssystem für Gasphasenfilter zur Behandlung von Außenluft



Es gibt einen zunehmenden Einsatz und Bedarf an Gasphasenfiltration in allgemeinen Filtrationsanwendungen. Es ist davon auszugehen, dass dieser Bedarf aufgrund der zunehmenden Luftverschmutzung mit gasförmigen Luftverunreinigungen in der Welt und des wachsenden Bewusstseins, dass Lösungen für diese Probleme in Form von Filtrationsvorrichtungen oder, technischer ausgedrückt, Molekularfiltern (englisch: gas-phase air cleaning devices in der Norm mit GPACD abgekürzt) verfügbar sind, rasch zunehmen wird. Die Leistung der Lösungen hängt in hohem Maße von der Leistung des verbauten Gasphasen-Luftreinigungsmediums (GPACM) ab. Dennoch sind die Anwendungen und die Leistung der Lösungen den Anwendern und Lieferanten solcher Medien und Geräte oft nur unzureichend bekannt. Medientests können auch geeignet sein, Daten für reale Anwendungen zu liefern, wenn bei den Tests tatsächlich niedrige Konzentrationen (< 100 ppb) und längere Expositionszeiten ($>$ Wochen) verwendet werden können, vorausgesetzt, dass die geometrische Konfiguration, die Packungsdichte und die Strömungsbedingungen des kleinen Testmusters denjenigen entsprechen, die in realen Anwendungen verwendet werden. Solche Tests sind jedoch nicht im Anwendungsbereich von ISO 10121 enthalten.

Kompaktfilter HS-Carbo Pak² AK
Filterklassen ISO 10121

O ₃	MD65
NO ₃	vLD60
SO ₃	vLD30
Toluol	MD75
Ḃ	3400 m ³ /h

Die ISO 10121-1 definiert Schnittstellenstandards zwischen Medienlieferanten und Herstellern von Luftreinigungsgeräten sowie für Endkunden in Bezug auf lose Füllmedien (z.B. Aktivkohle, aktiviertes Aluminiumoxid, Zeolithe etc.). ISO 10121-2 dient als standardisierte Schnittstelle zwischen Lieferanten von Luftreinigungsgeräten und Endkunden, die kosteneffiziente Methoden für die Gasphasenfiltration suchen. Der Prüfstandard ISO 10121-3 legt Anforderungen und Prüfverfahren für die Reinigung von Gasphasen fest, die in der Raumlufttechnik zum Einsatz kommen. Bietet die ISO 10121-3:2022 ein eigenes Klassifizierungssystem für Molekularfilter bzw. gas-phase air cleaning devices (GPACD).

Um die Leistungsfähigkeit eines Aktivkohlefilters zu ermitteln, wird die Prüfung von Molekularfiltern gemäß ISO 10121-3 mit den Testgasen Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffdioxid (NO₂) und Toluol (C₇H₈) absolviert.

Ozon (O₃)

Im Fokus steht insbesondere die Wirkungsweise von anfallendem Ozon im Bodenbereich. Beispielsweise ist Sommersmog, welcher durch Reaktionen von Gasen und Sonnenlicht erzeugt wird, eine der häufigsten Quellen für Ozon. Die Luftgüteleitlinie der WHO weist einen Grenzwert von maximal 60 µg/m³ als mittlere Konzentration über einen Sechs-Monats-Zeitraum aus.

Stickstoffdioxid (NO₂)

Stickstoffdioxid tritt größtenteils durch die Verbrennung von Kraftstoff im Verkehrsbereich, Transportwesen sowie in der Industrie auf. Der empfohlene WHO-Grenzwert liegt auf das Jahr betrachtet bei einer mittleren Konzentration von maximal 10 µg/m³.

Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefeldioxid ist ein stark riechendes, farbloses Gas. SO₂ wird beispielsweise durch Verbrennungsprozesse von Kraftstoffen wie Öl und Kohle oder beim Schmelzen von Mineralerzen, die Schwefel enthalten, freigesetzt. Die Luftqualitätsrichtlinie der WHO empfiehlt eine mittlere Konzentration von täglich höchstens 40 µg/m³.

Toluol (C₇H₈)

Toluol wird gemäß ISO 10121-3 als Referenzgas für flüchtige organische Verbindungen (VOC = Volatile Organic Compounds) eingesetzt. Natürliche Quellen von VOC sind überwiegend im Bereich der Vegetation wie Wäldern, Ozeanen etc. zu finden. Anthropogene, vom Menschen ausgelöste Quellen werden dagegen im Verkehrssektor und durch industrielle Prozesse hervorgerufen.

Zur Klassifizierung gemäß ISO 10121-3 wird die Adsorptionsleistung eines Aktivkohlefilters gegenüber den zuvor benannten Schadgasen ermittelt. Dabei ist für jedes Schadgas jeweils ein Aktivkohlefilter identischen Bautyps zu verwenden, an dem die Prüfung mit der jeweiligen Spezies durchgeführt wird, um das Prüfergebnis nicht durch andere Substanzen zu beeinflussen. Während der Prüfung werden folgenden Klassifizierungsmerkmale erfasst:

- Anfangseffizienz
- aufgenommene Kapazität an Schadgas und Einteilung in die Klassen LD, MD, HD
- durchschnittliche Effizienz des Testfilters
- Druckdifferenz (optional)

Die Anfangseffizienz ergibt sich mit Durchbruch des Prüf gases durch den Testfilter. Die aufgenommene Kapazität des Schad gases wird als Masse [g/m²] oder als Stoffmenge [mol/m²] an durchströmender Menge an Prüf gas durch den Aktivkohlefilter erfasst. Dabei sind die in Stoffmenge erfassten Einstufungen mit 1,5, 6 und 24 für alle Testgase identisch und erhöhen sich jeweils um den Faktor 4 über die Filterklassen Light Duty (LD), Medium Duty (MD) oder Heavy Duty (HD). Auf die Masse bezogen wird das Ranking ebenfalls in Light, Medium und High Duty eingeteilt. Allerdings sind bei den Gasen unterschiedliche Molekülmassen zu beachten, sodass die zu erzielenden Werte je nach Testgas voneinander abweichen:

Gas	DN [mol/GPACD Anströmfläche], n/m ²			DN [g/GPACD face area], g/m ²		
	LD [n]	MD [n]	HD [n]	LD [g]	MD [g]	HD [g]
O3	1,5	6	24	72	288	1152
NO2	1,5	6	24	96	384	1538
SO2	1,5	6	24	69	276	1104
Toluol	1,5	6	24	138	553	2211

Mit Adsorption der Schadgase sinkt die Effizienz der Testfilter im Verlauf der Beladung. Die Effizienz der Testfilter wird gemessen, bis die Abscheideeffizienz der Spezies (Gase O3, NO2 etc.) bei jedem Einzelprüfling der Messreihe unter 50% fällt. Der Test wird dann gestoppt und es folgt final die Zuteilung in die Leistungsgrade:

Klasse		Anwendungsbereich
vLD	Very Light Duty	Einstiegsklasse für Anwendungen ohne spezifische Anforderungen. Abscheideleistung liegt unter 50%
LD	Light Duty	für geringe Konzentration oder kurzzeitige Ereignisse (z.B. Waldbrand, kurzzeitiger Smog)
Md	Medium Duty	für mittlere Schadgaskonzentrationen wie sie z.B. in Urbanen regionen mit hohem Verkehrsaufkommen auftreten.
HD	Heavy Duty	für kritische Anwendungen mit hohen Schadgasbelastungen (Arbeitsplatzabsaugung von Gefahrstoffen) oder höchsten Anforderungen an die Luftreinheit der (Prozess-)Zuluft.

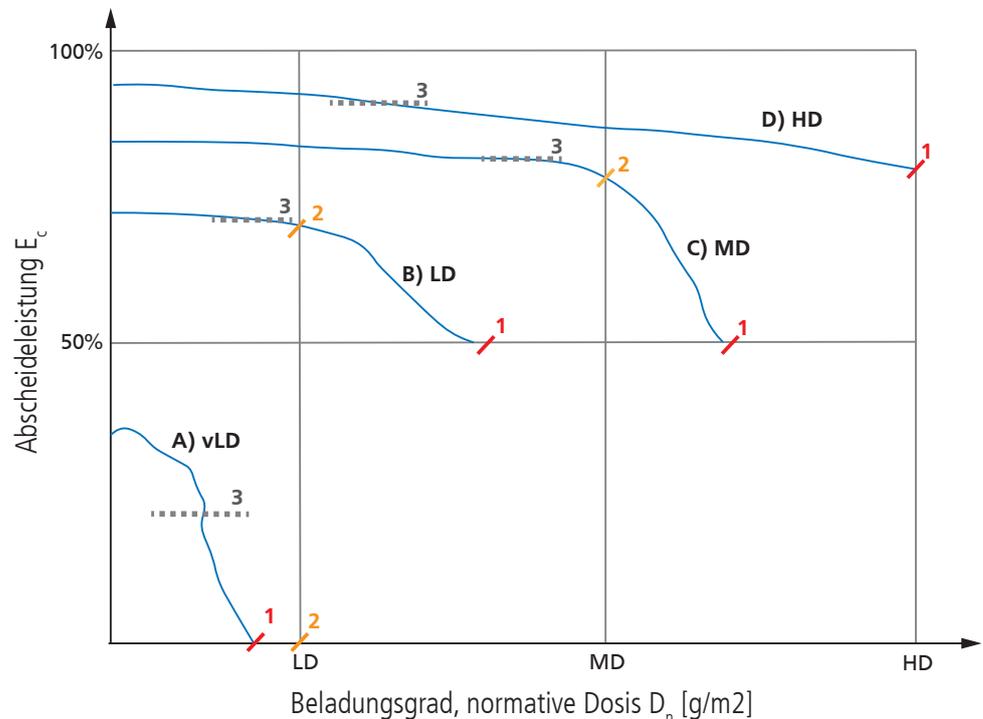
Light Duty (LD), Medium Duty (MD) oder Heavy Duty (HD) sowie die Zuweisung des Werts gemäß der durchschnittlichen Effizienz, welcher in 5%-Schritten abgerundet wird. Für Aktivkohlefilter mit einer Effizienz ≤50 % existiert noch die Filterklasse very Light Duty (vLD).



Patronenfilter HS-AKP 26, wird je nach Bedarf mit passenden Filtersubstraten befüllt.

Die Erfassung der Anfangsdruckdifferenz und Enddruckdifferenz gemäß ISO 10121-3 wird empfohlen, ist aber nicht zwingend erforderlich, da die Adsorption von Schadgasen in der Regel kaum zu einem nennenswerten Anstieg der Druckdifferenz eines Aktivkohlefilters führt.

Hier ein Beispiel für Klassifizierungsergebnisse aus der Norm:



1. Testende
2. Endpunkt für die Berechnung der integralen Abscheideleistung E_z [%]
3. E_z [%] für die jeweilige Beladungskurve (A, B, C, und D)

Abscheidegradkurve A: Der Aktivkohlefilter hat eine Anfangseffizienz von ca. 35% und diese fällt auf 0% ab bevor der Beladungsgrad für LD erreicht wird. Daher erreicht dieser Filter bei der Prüfspezies nur Klasse vLD

Abscheidegradkurve B: Die Anfangsabscheideleistung erreicht ca. 70% und im Verlauf der Beladung fällt die Effizienz zwischen LD und LD unter 50% womit der Test beendet wird. Damit erreicht der Filter die Klasse LD und die Effizienz errechnet sich aus E_z in Linie 3 der betreffenden Kurve.

Abscheidegradkurve C: In diesem Beispiel liegt die initiale Anfangsabscheideleistung bei ca. 80% und fällt zwischen den Punkten MD und HD unter 50% womit der Test beendet wird. Der Filter erreicht die Klasse MD. Die Effizienz ergibt sich aus E_z in Linie 3 der betreffenden Kurve.

Abscheidegradkurve D: Hier liegt die Anfangsabscheideleistung des Prüflings bei ca. 90%. Über den Beladungsgrad fällt die Kurve bis zum Erreichen der HD Spezifikation nicht unter 50%. Für die E_z Berechnung wird die Effizienz bei Erreichen der HD Schwelle zugrundegelegt. Der Filter erreicht die Klasse HD. Die Effizienz ca. 85% ergibt sich aus E_z in Linie 3 der betreffenden Kurve.

Die ISO 10121-3 vereinfacht die Leistungsbeurteilung von Aktivkohlefiltern für den Anwender insbesondere in Bezug auf die Lebensdauer entsprechender Filterlösungen.

Vielfach dienen Aktivkohlefilter für die Abscheidung von VOC's (volatile organic components - wie z.B. Lösemitteln). Die ISO 10121-3 nutzt die Toulolbeladung als gasförmige Referenz für die Abscheideleistung von VOC's. Dies ist mag für die meisten Anwendungen hinreichend sein. Es empfiehlt sich jedoch im Zweifel auch spezifische Gasphasen die im Fokus des Einsatzspektrums stehen, hinsichtlich der Abscheideleistung untersuchen zu lassen.

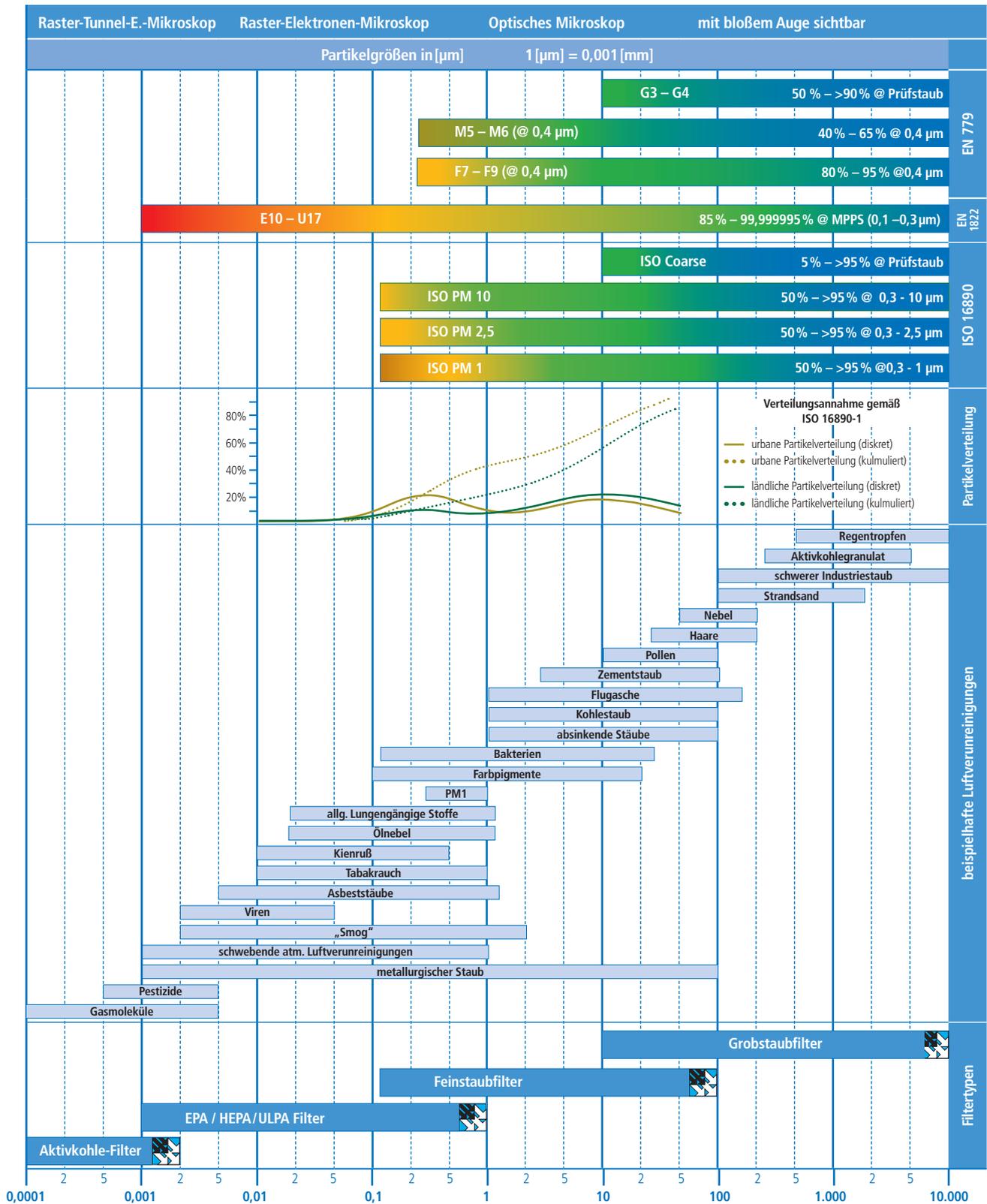
Für die Auslegung prozessspezifischer Adsorbtiionsfilterlösungen empfehlen wir stets Experten zu Rate zu ziehen. Die ISO 10121-3 betrachtet nur gängige und allgemeine Gasphasen. Spezielle Modifikationen wie z.B. Imprägnierungen mit Katalysatoren um gezielt gegen schwierig abzuschheidende Luftverunreinigungen zu wirken sind nicht Teil der dieser normativen Betrachtung.



Übersicht der gängigen Filternormen, Fraktionsgrößen & Abscheidemöglichkeiten

nachfolgende Tabelle zeigt zusammenfassend die marktgängigen Normen und deren entsprechenden Klassifizierungen. Das Diagramm gibt einen Überblick über Fraktionsbereiche von verschiedenen staub- und partikelförmigen Luftverunreinigungen. Um diese aus Luftströmen zu entfernen stehen dazu im Kontext die anwendbaren Filternormen sowie mögliche Filtrationslösungen.

EN 779 Gruppe G	EN 779 Gruppe M und F	ISO 16890	EN 1822	ISO 29463	US-Mil.Std.	EN 60335
Grobstaubfilter Abscheidegrad Am (Gewicht) Enddruck 250 [Pa]	Feinstaubfilter mitl. Wirkungsgrad Em = 0,4 [µm] Enddruck 450 [Pa]	ISO coarse: Abscheidegrad Gewicht (AM) ISO ePMx Effizienz in [%] gegen Fraktionsgrößen	HEPA- und ULPA- Filter Anfangsabscheidegrad A Prüfaerosol DEHS, PSL, POM MPPS 0,1-0,3 [µm]	HEPA- und ULPA- Filter Anfangsabscheidegrad A Prüfaerosol DEHS, PSL, POM MPPS 0,1-0,3 [µm]	Schwebstofffilter Anfangsabscheidegrad A Prüfaerosol DOP >0,3 [µm]	Schwebstofffilter maximaler Durchlassgrad D in [%]
50 % < Am < 65 % G1 A < 65 %	M.E. = Mindesteffizienz, Anfangseffizienz im elektrostatisch entladenen Zustand.	ISO Coarse 15 %				
50 % < Am < 65 % G2		bis				
50 % < Am < 65 % G3		ISO Coarse 65 %				
90 % < Am G4		ISO Coarse >=65 %				
	40 % < Em < 60 % M5	ISO ePM10 50 % bis ISO ePM10 70%				
	60 % < Em < 80 % M6	ISO ePM10 60 % bis ISO ePM2.5 50%				
	80 % < Em < 90 % M.E.: 35 % F7	ISO ePM1 50 % bis ISO ePM1 65%				
	90 % < Em < 95 % M.E.: 55 % F8	ISO ePM1 65 % bis ISO ePM1 75 %				D < 1 % L 200 mg/m ³ Quarzstaub 90% 0,2-2µm
	95 % < Em M.E.: 70 % F9	ISO ePM1 80 % bis ISO ePM1 90 %	A(integr.) > 85 % E10			
			A (integr.) > 95 % E11	ISO 15 E	95 %	D < 0,1 % M 200 mg/m ³ Quarzstaub 90 % 0,2-2 µm
			A(integr.) > 99,5 % E12	ISO 25 E	99,97 %	
			A(integr.) > 99,95 % H13 A(lokal) > 99,75 %	ISO 35 H	99,99 %	D < 0,005 % H
			A(integr.) > 99,995 % H14 A(lokal) > 99,975 %	ISO 45 H	99,999 %	Paraffinölnebel 90 % < 1 µm
			A (integr.) > 99,9995 % U15 A(lokal) > 99,9975 %	ISO 55 U		
			A(integr.) > 99,99995 % U16 A(lokal) > 99,99975 %	ISO 65 U		
			A(integr.) > 99,999995 % U17 A(lokal) > 99,99999 %	ISO 75 U		



Viren	Tabak	Bakterien	Ölnebel	Tonerstaub	Sporen	Pollen	Haare	Grobstaub
0,002 – 0,05 [µm]	0,01 – 1 [µm]	0,2 – 25 [µm]	0,3 – 5 [µm]	5 – 20 [µm]	10 – 25 [µm]	10 – 100 [µm]	20 – 200 [µm]	100 – 2000 [µm]

Anwendungsgebiete entsprechend der Filterklassen

Die Normenteilung hilft dem gelegentlichen Anwender nicht unbedingt bei der richtigen Auswahl der Luftfilter. Folgende Tabellen können mit den aufgeführten Beispielen zur Auswahl angewendet werden. In diesem Zusammenhang sollte auch die VDI 6022 „Hygienische Anforderungen an Raumlufotechnische Anlagen“ Beachtung finden. Diese Richtlinie empfiehlt den Einsatz von mindestens 2 Filterstufen für RLT-Anlagen. Die erste Stufe soll dabei mindestens der Klasse EN 779:M5 bzw. ISO ePM10 ≥ 50 % entsprechen die zweite mindestens EN779:F7 bzw. ISO ePM2,5 ≥ 65 % oder ISO ePM1 ≥ 50 % möglichst jedoch EN 779:F9 bzw. ISO ePM1 ≥ 80 %

Laut Richtlinie VDI 6022 sollen die Filter der ersten Stufe spätestens alle 12 Monate, die der zweiten spätestens alle 24 Monate aus Hygienegründen ausgetauscht werden, auch wenn die angegebene Endruckdifferenz noch nicht erreicht wurde.

Ebenfalls sollten alle 24 Monate verschlissene Dichtungen an den Filterhalterungen ausgetauscht werden. Hier ist es sinnvoll die Filter anstatt der Filteraufnahmen mit Dichtungen auszustatten. Dies erspart den oft mühseligen Austausch in den Filtergehäusen. Die meisten Filterhersteller können kostengünstig Filter mit bereits aufgeschäumten Dichtungen liefern.

Der Verschmutzungsgrad der Filter muss regelmäßig kontrolliert werden, da die Staubbelastung der Rohluft durch verschiedene Ereignisse, z. B. Baustellen etc., schwanken kann. Die VDI 6022 ist gem. § 4 des dArbeitsschutzgesetzes und §§ 5, 53 der Arbeitsstättenverordnung umzusetzen.

Anwendungsgebiete (Mindestforderungen) für Grob- und Feinststaubfilter mit verschiedenen Abscheidegraden entsprechend ISO 16890.

Filterklassen:	ISO 16890: ISO Coarse 15 % bis ISO Coarse 45 %	ISO 16890: ISO Coarse >45 % bis ISO ePM10 >50 %	ISO 16890: ISO ePM 10 >65 %
Allgemeines	<ul style="list-style-type: none"> unwirksam gegenüber Rauch und Teilchen, die Flecken verursachen (Ruß, Ölnebel usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> beschränkte Abscheidung von Pollen minimale Wirkung gegenüber Rauch und Teilchen, die Flecken verursachen (Ruß und Ölnebel) 	<ul style="list-style-type: none"> Abscheidung von Pollen beschränkte Wirkung gegenüber Rauch und Teilchen, die Flecken verursachen (Ruß und Ölnebel) Anlagen mit Entfeuchtung
Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> Zuluftanlagen mit geringen Ansprüchen an die Reinheit der Luft Klimageräte in Fenstern Flusenabscheidung Vorfiltration Schaltanlagen mit passiver Kühlung 	<ul style="list-style-type: none"> Zuluftanlagen mit geringen Ansprüchen an die Reinheit der Luft Klimageräte in Fenstern Flusenabscheidung Vorfiltration Schaltanlagen mit aktiver Kühlung Feinsandabscheidung 	<ul style="list-style-type: none"> Vorfilter vor Feinfiltern Vorfilter im Bereich Offshore, z. B. Seaspray Abluftfilter vor Wärmetauschern

Anwendungsgebiete (Mindestforderungen) für Fein- und Feinststaubfilter mit verschiedenen Abscheidegraden entsprechend ISO 16890 bzw. DIN EN 1822 resp. ISO 29463.

Filterklassen:	ISO 16890: ISO PM10 >60 % bis ISO PM2,5 <70 %	ISO 16890: ISO PM2,5 < 65 % bis ISO PM1 >80 %	ISO 16890: ISO PM 1 >85 %
Allgemeines	<ul style="list-style-type: none"> Abscheidung von Pollen beschränkte Wirkung gegenüber Rauch und Teilchen, die Flecken verursachen (Ruß, Ölnebel usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> wirkungsvoll gegenüber allen Staubarten, einschl. Teilchen, die Flecke verursachen (Ruß und z.T. Ölnebel) teilweise wirkungsvoll gegenüber Tabakrauch in dem oberen Abscheidungsbe- reich nur teilweise wirkungsvoll gegenüber Keimen 	<ul style="list-style-type: none"> sehr wirkungsvoll gegenüber Teil- chen, die Flecken verursachen, wie Ruß und Ölnebel wirkungsvoll gegenüber Keimen
Anwen- dungen	<ul style="list-style-type: none"> Zuluft- und Teilklimaanlagen für Schulen, Küchen, Archiven, feinmechanische Werkstätten Kühlung von Räumen für Aufzugmaschinen Luftvorhang für Lebensmittel- geschäfte Erwärmung von Kirchen, Turn- und Sporthallen durch Warmluft Klimatisierung von Restaurants und Sälen Lebensmittelgeschäfte Zuluft für Farbspritzkabinen 	<ul style="list-style-type: none"> Teil- und Vollklimaanlagen für Laboratorien, Kranken- pflegeräume, Büros, Theater, Schlachtereie Telekommunikationsanlagen, optische Werkstätten, Rund- funk- und Fernsehstudios, EDV- Räume Zuluft für Farbspritzkabinen 	<ul style="list-style-type: none"> Fertigungstätten für Arzneimittel, optische und elektronische Fertigungsräume, Ställe in Tierversuchsanstalten, Laboratorien, Zuluft für Datenverarbeitungsmaschinen, Untersuchungsräume Zuluft für radiologische Labo- ratorien Vorräume für Sterilisier- und Operationsräume

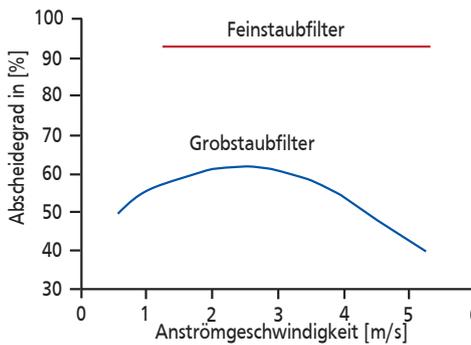
Schwebstofffilter dienen der Filtration kleinster Partikel (< 1 µm) und werden sowohl für die Zuluft als auch für die Filtration kontami- nierter Abluft oder als Vorfilter für Aktivkohlesysteme verwendet. Schwebstofffilter müssen grundsätzlich durch eine Vorfiltrationsstufe vor größeren Partikeln (> 1 - 3 µm) geschützt werden. Natürlich gilt auch hier – je besser die Vorfiltration, desto länger die Standzeit.

Filterklassen:	EN 1822: E10 - E12 ISO 29463: ISO 15 E - ISO 30 E	EN 1822: H13 - H14 ISO 29463: ISO 35 H - ISO 45 H	EN1822: H14 - U17 ISO 29463: ISO 50 U - ISO 75 U
Allgemeines	<ul style="list-style-type: none"> Diese Filtergruppe weist einen hohen Abscheidegrad von Keimen, radioaktivem Staub, allen Arten von Rauch und Aerosolen auf. 	<ul style="list-style-type: none"> Diese Filtergruppe weist einen sehr hohen Abscheidegrad von Keimen, radioaktivem Staub, allen Arten von Rauch und Aerosolen auf. 	<ul style="list-style-type: none"> Diese Filtergruppe mit dem erreich- baren höchsten Abscheidegrad eignet sich für Bereiche, in denen die Luftreinheit eine ausschlaggebende Rolle spielt.
Anwen- dungen	<ul style="list-style-type: none"> Konstantklimaräume für hohe Messgenauigkeit (Eichräume) Speziallabors mit besonders hohen Ansprüchen an reine Luft (Fotoindustrie, Elektronik) Sterilisierräume „Reine Räume“ und „Reine Arbeitsbänke“ Zuluft für Kernkraftwerke Montage- und Prüfräume für die Uhrenindustrie Klimatisierung von Restaurants und Sälen Lebensmittelgeschäfte Zuluft für Farbspritzkabinen 	<ul style="list-style-type: none"> Sterilisierkästen „Reine Räume“ und „Reine Arbeitsbänke“ Tierversuchsanstalten mit hoher Infektionsgefahr (be- sondere keimfreie Räume) Sterile Abfüllstationen für die Arzneimittelindustrie Mikrotechnik, Mikroelektronik und Halbleiterfabrikation Abluftfiltration aus nuklear- technischen Anlagen Abscheidung von Ölnebeln zur Einhaltung Sicherheitsre- levanter Grenzwerte 	<ul style="list-style-type: none"> sterile OP- Säle Isolatoren „Reine Räume“, Reine Arbeitsbänke Klasse 100 Laboratorien mit großer Arbeitskapazität Reinraumanwendungen ISO 14644-1 Klasse 1 bis 4 Sterile bakteriologische Labo- ratorien Tierversuchsanstalten Filter für Schwebeteilchen in Gasschutzanlagen Abluft von Infektionsstationen Chip- und Wafertechnik

Standzeit der Filter

Die Standzeit der Filter hängt von vielen Faktoren ab, von denen hier nur einige dargestellt werden sollen. Beispielsweise ist die effektive Filterfläche bei Taschenfiltern etwa 10- bis 25-fach so groß wie seine Ansichtsfläche. Die Geschwindigkeit durch das Filtermaterial beträgt nur ca. 0,1 [m/s] und die Strömung ist praktisch laminar, d. h. der Druckabfall steht in proportionalem Verhältnis zur Luftgeschwindigkeit.

Abscheidegrad als Funktion der Luftgeschwindigkeit für einen Fein- bzw. Grobstaubfilter.



Je nach der Filterkonstruktion kommen weitere Druckverluste hinzu, die im Verhältnis zum Quadrat der Luftgeschwindigkeit stehen. Durch ungeeignete Konstruktion, wie z.B. zu dichte Falten, zu kleine Abmessung des Lufteintritts usw., kann dieser Druckabfall überragende Bedeutung erhalten. Bei Schwebstofffiltern ist die effektive Filterfläche 25-100 mal so groß wie die Ansichtsfläche. Der gesamte Druckabfall steht in der Regel in direktem Verhältnis zur Luftgeschwindigkeit. Bei Grobstaubfiltern ist der Druckabfall, infolge der hohen Geschwindigkeit, in der Regel proportional zum Quadrat der Luftgeschwindigkeit.

Je höher die zulässige Widerstandserhöhung ist, desto mehr Staub kann der Filter aufnehmen. Bei Feinstaubfiltern wird im Allgemeinen eine Erhöhung um 100-200 [Pa] bzw. dem dreifachen der Anfangsdruckdifferenz empfohlen. Je nach dem Gesamtwiderstand der Anlage und der zulässigen Volumenstromschwankungen sind auch höhere Werte vertretbar, ohne dass der Filtereffekt abnimmt. Für Grobstaubfilter sollte man keine größere Erhöhung des Druckes zulassen als 100-150 [Pa], da die Gefahr besteht, dass bereits aufgefangener Staub wieder mitgerissen wird. Schwebstofffilter können je nach Größe und Ausführung einen Endwiderstand von 500-1500 [Pa] erreichen.

Die Standzeit der Filter steht nicht in direktem Verhältnis zu dem erreichten Endwiderstand. Der Widerstand steigt gegen Ende der Betriebszeit des Filters rasch an. Die Luftmenge des Filters, d. h. die Luftgeschwindigkeit durch das Filtermaterial, hat einen großen Einfluss auf seine Standzeit. Bei niedriger Luftgeschwindigkeit sinkt der Anfangswiderstand und eine größere Staubmenge kann bis zu einem gegebenen Endwiderstand von dem Filter aufgenommen werden. Zudem verlangsamt sich die Sättigung des Filters, da die Staubbilastung je Zeiteinheit bei geringem Luftdurchsatz kleiner ist. Umgekehrt nimmt die Standzeit des Filters bei stärkerer Belastung ab.

Für Feinstaub- und Schwebstofffilter aus Glasfaserfiltermedium kann man, je nach Bauform Abweichungen von Nennbelastung bis zu +20 % und -90 % zulassen, ohne dass der Filtereffekt sich nennenswert verschlechtert. Für Grobstaubfilter dagegen sind keine größeren Abweichungen von der Nennluftmenge zulässig. Der Filtereffekt der Grobstaubfilter beruht gerade darauf, dass die Partikel eine bestimmte Geschwindigkeit durch das Filtermaterial haben müssen. Das aufgeführte Diagramm zeigt, wie der Abscheidegrad eines Grobstaubfilters bzw. eines Feinstaubfilters sich bei verschiedenen Belastungen ändert.

Für Aktivkohlefilter sind Standzeitvoraussagen äußerst schwierig. Die Einsatzparameter der Kohlen hängen von den zu beseitigenden Problemstoffen ab. Während bei Grob- und Feinstaubfiltern die Druckdifferenzerhöhung als Maß für den Verschmutzungsgrad dienen kann, sind die Verfahren zur Standzeitevaluierung der Aktivkohle etwas aufwändiger. Bei Abscheidung harmloser Gerüche kann man von der Faustregel für menschliche Sensorik ausgehen „wenn's stinkt - wechseln“. Andere Verfahren sind: Die Dokumentation der Gewichtszunahme

über regelmäßige Intervalle. Nimmt die Kohle nicht mehr an Gewicht zu, ist sie erschöpft. Bei problematischen Filtraten (toxisch, radioaktiv) werden über Probensammler oder Bypassproben Teile der eingesetzten Kohle regelmäßigen Analysen unterzogen. Verschiedene chemische Verfahren geben dann Aufschluß über den Zustand der Kohle und die weitere Haltbarkeit. Die Standzeit von Aktivkohlen variiert stark mit den gegebenen Einflüssen.

Staubkonzentration, Form und Größenverteilung der Partikel in atmosphärischer Luft

Eine Erhöhung der Staubkonzentration hat eine Verringerung der Standzeit des Filters zur Folge. Die Staubkonzentration in atmosphärischer Luft sowie auch die Korngrößenverteilung schwanken sehr je nach Bebauung, Verkehr, Windrichtung, Jahreszeit, Lage des Luftansaugens usw. Die Außenluft enthält eine Vielzahl von Partikeln unterschiedlichster Größe (siehe nebenstehendes Diagramm).

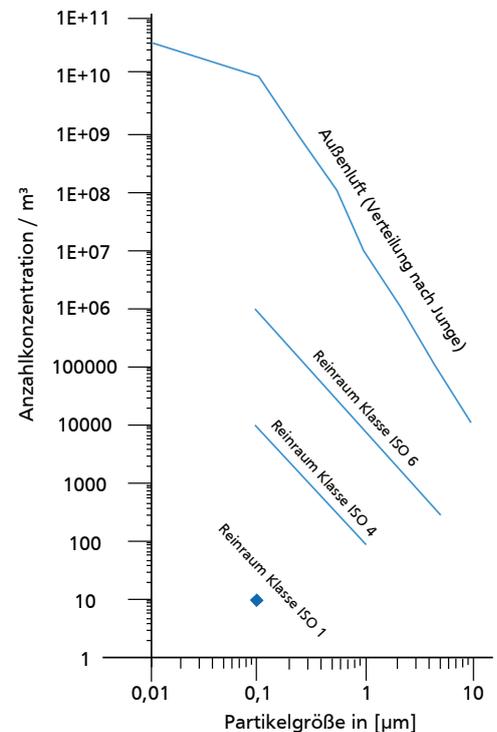
Im Laufe der letzten Jahre hat die geschätzte durchschnittliche Staubkonzentration im Vergleich zu früheren Berechnungen abgenommen. Ein anderer Umstand, der eine große Rolle spielt, ist die Umluftmenge, die gefiltert wird. Oft geht man davon aus, dass die Umluft reiner ist als die Außenluft und dass die Standzeit der Filter für Umluftanlagen demzufolge länger sein müsste. Die Umluft enthält normalerweise weniger Mengen Ruß und schwärzende Partikel. Dagegen können in ihr mehr Textilfasern, grobkörniger Staub oder keimverseuchte Partikel vorkommen und zu einer höheren Staubkonzentration beitragen. Textilfasern beeinträchtigen ein Feinstaubfilter nicht in gleich hohem Maße wie einen Grobstaubfilter, der in der Regel als Filterzelle (Z-Filter), Taschenfilter oder Planfilter (Filtermatte), ausgeführt wird. Bei Letzterem legen sich die Fasern auf die Oberfläche und versperren damit den Filter.

Bei Feinstaubfiltern, die selbst aus feinen Fasern bestehen und eine große effektive Filterfläche aufweisen, haben die Textilfasern nicht den gleichen Einfluss auf die Standzeit. Sie bilden vielmehr selbst einen weiteren Teil des Filtermaterials. Dazu kommt, dass die Geschwindigkeit durch ein Feinstaubfilter je nach Bauform nur etwa ein zwanzigstel der Geschwindigkeit durch ein Grobstaubfilter beträgt. Aus dem Vorstehenden ergibt sich, dass es sehr schwierig ist, repräsentative Werte bei Staubkonzentrationsmessungen zu erhalten und auf diese Weise die Standzeit eines Filters zu berechnen.

Je feiner der abzuscheidene Staub ist, desto schneller sättigt sich der Filter und seine Standzeit wird verkürzt. Faseriger Staub bleibt leicht auf der Filteroberfläche hängen und verschleißt die Luftwege durch den Filter. Dadurch erhöht sich der Widerstand ziemlich rasch, wenn die Filterfläche, wie bei Grobstaubfiltern, klein ist.

Auch die Partikelform ist von Bedeutung für die Verstopfung von Filtern. Deshalb ist der Aufbau des Filtermaterials ein wichtiger Faktor, wenn der Filter bzw. das Filtermedium in seiner vollen Tiefe wirksam sein soll. Dies ist eine der Ursachen dafür, dass reine „Siebfilter“ bzw. Membranen, deren Poren kleiner als die abzuscheidenden Partikel sind, keine Verwendung finden. Ein solcher Filter würde sehr schnell verstopfen. Andererseits sollte die Tiefenwirkung eines Filters nicht überschätzt werden. An der Anströmseite bildet sich oft auf dem Filtermaterial Staubschicht von mehreren Millimetern Höhe, sodass das Material nicht immer in voller Tiefe ausgenutzt werden kann. Andererseits verbessert dieser „Staubkuchen“ auch die Effektivität des Filters, da sich hier eine weitere Sperrschicht ergibt, an der sich ebenfalls Partikel ablagern.

Diagramm über die normale Partikelkonzentration-Größenverteilung in der Außenluft und Vergleich zu Partikelkonzentrationsgrenzen für Reinraumklassen gem. ISO 14644-1.



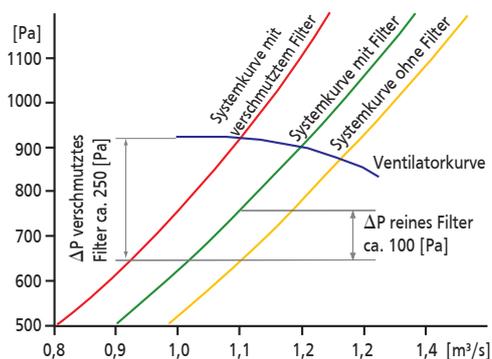
Die feinen Staubpartikel, welche die größte Verschmutzung verursachen, sind verhältnismäßig leicht und stellen einen großen Teil des atmosphärischen Staubes dar. Filtersysteme, die hauptsächlich nach dem Trägheitsprinzip arbeiten, können diese leichten, voluminösen Partikel nicht immer zufriedenstellend abscheiden. Feinstaubfilter scheidet den größten Teil solcher leichten Rußpartikel und anderer organischer Stoffe ab, deren Abscheidung in erster Linie gewünscht wird.

Die sichersten Grundlagen für die Auslegung von Filteranlagen erhält man durch Probenahme an Ort und Stelle und Bestimmung der Staubkonzentration sowie der Art und Korngröße des Staubes. Augenblickswerte sind in der Regel völlig wertlos, denn man braucht vielmehr Mittelwerte über längere Zeiträume.

Staubspeichervermögen und Abscheidegrad der Luftfilter

Wenn zwei Filter das gleiche Staubspeichervermögen besitzen, hat der bessere Filter eine kürzere Standzeit, weil er in derselben Zeit mehr Staub aufnimmt. Das Staubspeichervermögen eines Filters ist ein Begriff, der sehr oft missbraucht wird. Die einschlägigen Normen beschreiben die Bestimmung des Staubspeichervermögens der Filter. Darunter wird die Fähigkeit der Filter verstanden, synthetischen Staub bis zu einer bestimmten Druckerhöhung über dem Filter aufzunehmen.

Beispiel für die Änderung der Luftleistung in einer Anlage mit reinem bzw. verschmutztem Filter



Allzu oft wird der Fehler begangen, aufgrund des Staubspeichervermögens des Filters und seines Abscheidegrades hinsichtlich synthetischen Staubes die Standzeit des Filters in einer Anlage zu berechnen. Es besteht keine Vergleichbarkeit zwischen synthetischem und atmosphärischem Staub. Man kann somit nicht sagen, dass ein Filter mit besserem Staubspeichervermögen gegenüber synthetischem Staub, auch eine längere Standzeit in atmosphärischer Luft aufweist als ein anderer Filter mit niedrigeren Werten.

Im Labor kommen Staubkonzentrationen vor, die um mehr als das hundertfache die in der Praxis üblichen Werte übersteigen. Bei höheren Konzentrationen erhält man eine Agglomeration von kleinen Partikeln, die in atmosphärischer Luft niemals erreichbar ist.

Abhängigkeit Volumenstrom zu Filterwiderstand in einer lufttechnischen Anlage

In der Regel ist der Filter der einzige Teil einer Anlage (abgesehen vom Gebläse), der den Volumenstrom beeinflusst. Mit fortschreitender Verschmutzung des Filters erhöht sich der Widerstand des ganzen Systems und der Betriebspunkt des Ventilators verschiebt sich. Die zulässige Durchflussänderung in dem System, der Betriebspunkt und die Charakteristik des Ventilators sowie der Gesamtdruck der Anlage bestimmen die zulässige Widerstandserhöhung des Filters.

Für eine genaue Bestimmung der Durchflussänderungen in einer Anlage sind die Ventilator Kennlinien zu Hilfe zu nehmen. Gegeben ist die Systemkurve der Anlage, teils mit Filter teils ohne. Angenommen, die Drehzahl des Ventilators ist so gewählt worden, dass bei reinem Filter ein Förderstrom von 1,2 [m³/s] erreicht wird. Der Druckabfall des Filters beträgt dann 100 [Pa]. Wird es für zulässig gehalten, dass der Volumenstrom auf 1,10 [m³/s] sinkt, so kann man eine lotrechte Linie bei 1,10 [m³/s] ziehen und feststellen, dass der Filter ausgetauscht werden sollte, wenn der Druckabfall auf 250 [Pa] gestiegen ist.

Der Dimensionierungswiderstand der Filter ist unter Berücksichtigung des Charakters und des Betriebspunktes des Ventilators zu wählen. In den meisten Fällen genügt es, mit dem Mittelwert des Anfangs- und des Endwiderstandes zu rechnen. Falls gewünscht, kann ein konstanter Volumenstrom mit Hilfe einer manuell oder automatisch gesteuerten Klappe, eines drehzahlgeregelten Motors oder durch Austausch nur eines Teils der Filterzellen bei jedem Wechsel, aufrechterhalten werden.

Volumenstromänderungen bei Verschmutzung der Filter betragen in einer Anlage bei 100 [Pa] Widerstandzunahme der Filter in der Regel weniger als ± 5 [%]. Bei Feinstaubfiltern ist die Luftverteilung über die ganze Filterfläche gleichmäßig, sodass man direkt hinter dem Filter Heiz- und Kühlbatterien und Befeuchtungseinrichtungen anschließen kann. Bei automatischen Rollbandfiltern und anderen planen Filtermedien ist in der Regel eine Druckausgleichskammer zwischen dem Filter und den nachfolgenden RLT-Einrichtungen erforderlich. Ohne diese wäre die Luftverteilung in den erwähnten Anlagenteilen ungleichmäßig, die Luftheritzer können teilweise einfrieren und geben weniger Leistung ab. Es ist auch möglich, dass aus dem Luftbefeuchter Wassertropfen mitgerissen werden.

Handhabung von Luftfiltern

Beim Umgang mit Luftfiltern für raumluftechnische Bereiche gilt es einige grundlegende Regeln zu beachten.

Lagerung:

- Filter sind trocken zu lagern, am besten ohne Kontakt zu Wänden oder Böden.
- Filter sollten bis zum Einsatz in der Originalverpackung belassen werden.
- Die Lagerbereiche für Luftfilter dürfen nicht Gefahr laufen, durch kondensierende Feuchte ein bakterienfreundliches Milieu zu bieten.
- Nasse oder feuchte Filter sollten auf keinen Fall verwendet werden und müssen entsorgt werden. Selbst wenn die Filter wieder getrocknet sind, stellen sie in RLT Anlagen ein Gesundheitsrisiko dar.

Filterwechsel:

- Wir empfehlen bei einem Filterwechsel Schutzoverall, Feinstaubatemmaske (FFP2), ggf. auch Schutzbrille und Handschuhe zu tragen.
- Die RLT-Anlage muss während des Filterwechsels ausgeschaltet werden.
- Vergewissern Sie sich vor dem Einbau frischer Filterelemente, dass die Filterelemente frei von Verarbeitungsfehlern sind.
- Prüfen Sie Aufnahmerahmen und anlagenseitige Dichtungen auf Verschleiß.
- Prüfen Sie, ob in der Anlage Spuren von Korrosion oder anderer Anzeichen kondensierender Feuchte vorhanden sind. Wenn Nässe / Korrosion vorhanden ist muss die Ursache abgestellt werden.
- Gebrauchte Filterelemente sind möglicherweise mit Gefahrstoffen und / oder gesundheitsschädlichen Konzentrationen von Mikroorganismen belastet und stellen ein Risiko dar.
- Entsorgen Sie gebrauchte Filterelemente umgehend. Lagern Sie gebrauchte Filterelemente nicht in Bereichen, wo es zu Vermischung mit frischen Filtern oder Gesundheitsgefährdungen, z. B. in der Nähe von Nahrungsmitteln, kommen kann.

Kompaktfeinstaubfilter (Fremdfabrikat) im Überlastbetrieb bei ca. 1200 Pa. Ohne umgehenden Filterwechsel ist ein weiterer Betrieb dieser Anlage unwirtschaftlich.



- Verwenden Sie kein gebrauchtes, aber noch nutzbar erscheinendes Filterelement erneut für andere Einsatzbereiche!

Handhabung Schwebstoff- und Kompaktfilter:

- Achten Sie beim Auspacken von Schwebstofffiltern darauf, die Dichtungen nicht zu beschädigen. Aufgeschäumte Dichtungen können leicht durch Scherkräfte zerstört werden.
- Vermeiden Sie die Berührung der Filteroberfläche. Diese ist sehr empfindlich und kann bereits durch unachtsame Berührung beschädigt werden.
- Selbst kleinste Beschädigungen der Filteroberfläche machen Schwebstofffilter unbrauchbar. Versuchen Sie nicht, die Beschädigung zu beheben, wenn Ihnen kein Messgeräte zur nachfolgenden Prüfung der Abscheideleistung zur Verfügung steht.
- Schwebstofffilter sind z.T. sehr schwer, unhandlich und sperrig (610x610x292 mm wiegt ca. 16 kg). Filterwechsel und Lagerbewegungen sollten Sie daher ggf. mit zwei Personen durchführen.
- Prüfen Sie den korrekten Sitz des Filtern im Gehäuse, da Verkantungen zu Bypassen führen können.
- Für Filtereinsätze bei sicherheitsrelevanten Anlagen, wie z. B. Deckenauslass OP-Raum, Prozessluft Pharma etc., empfiehlt sich der Einsatz eines Dichtsitzprüfgerätes um den bypassfreien Einbau zu garantieren, sofern eine Partikelmessung nicht onehin erfolgen muss.



Beispiel für einen kapitalen Wartungsfehler - die Taschenfilter wurden "liegend" eingesetzt und haben Kontakt zu Kondenswasser. Die Filterwand ist energetisch und in Bezug auf die Filterleistung ineffizient. Zudem droht ein Hygieneproblem, da einzelne Filtertaschen kontakt zu Feuchte haben. Dies begünstigt Keimwachstum in den Filtern.

Handhabung Taschenfilter:

- Achten Sie darauf, dass die Filtermedien beim Einbau nicht durch scharfe Kanten oder Werkzeuge aufgerissen werden. Beschädigte Filter können i.d.R. nicht repariert werden und sind zu entsorgen.
- Achten Sie beim Einbau darauf, dass alle Filtertaschen vertikal ausgerichtet sind. „Liegende“ Filtertaschen werden nicht optimal durchströmt und können ggf. Kontakt zu kondensierender Feuchte haben.
- Einklemmte Filtertaschen müssen befreit werden, sonst kann die Filterfläche nicht vollständig ausgenutzt werden.
- Tragen Sie beim Hantieren mit Taschenfiltern aus Glasfasermedien eine Schutzmaske. Die Faserstäube können Augen- und Lungenwege reizen.

Entsorgung gebrauchter Filterelemente:

- Filterelemente aus Klima- und Lüftungsanlagen für Zu- und Umluftbetrieb sind i.d.R. als Haus- bzw. Gewerbemüll zu behandeln.
- Ab- und Prozessluftfilter sind i.d.R. mit problematischen Filtraten belastet und müssen entsprechend der Entsorgungsvorschriften der zutreffenden Gefahrstoffe behandelt werden.

Stichworte

Abrieb: Spezielle Form der Partikelemission, die auf das mechanische Abtragen von Material bei reibender Bewegung zurückgeht.

Abriebfestigkeit: In der Reinraumtechnik unbedingt erforderliche Eigenschaft von Oberflächen der verwendeten Baumaterialien, Geräte und Inventare.

Abscheidegrad: Er bemisst die Abscheideleistung eines Filters oder Filtermediums gegenüber Partikeln in einem Luftstrom und gibt den Anteil des zurückgehaltenen, synthetischen Staubes in Prozent an. Zum Einsatz kommt hier der Ashrae-Prüfstaub.

Aerosol: In Luft verteilte, fein dispergierte, feste oder flüssige Materie (Luftkolloid).

Abströmseite / abströmseitig: Die Seite des Filters, auf der der durch den Filter gereinigte Gasstrom austritt.

Anfangsdruckdifferenz: Die Anfangsdruckdifferenz ist der Druckverlust in Pa (Pascal) des unbestäubten Filters bei 100 % Nennvolumenstrom.

Anfangswirkungsgrad: Der Anfangswirkungsgrad beschreibt die Effizienz des unbestäubten Filters gegenüber einer definierten Korngröße. Bei EN 779 konformen Filtern wird diese mit DEHS gegen 0,4 [μm] bestimmt. Da die Effizienz eines Faserfilters i.d.R. mit zunehmender Staubaufnahme steigt, ist dieser Wert für die Filterplanung bei anspruchsvollen Anwendungen erheblich. Grobstaub- und Taschenfilter können um $> 20\%$ geringere Anfangswirkungsgrade als der Nominalwert (mittlerer Wirkungsgrad) aufweisen. Bei Kompaktfeinstaub- und Schwebstofffiltern weicht der Anfangswirkungsgrad konstruktionsbedingt nur minimal vom Mittelwert ab.

Antistatische Ausrüstung: Ausrüsten der Oberflächen bzw. der Materialien, sodass eine schwache elektrische Leitfähigkeit entstehende statische Aufladungen ausschließt.

Anströmseite / anströmseitig: Als Anströmseite wird die Seite des Filters bezeichnet, auf die der mit Partikeln verunreinigte Gasstrom auftrifft.

Anströmgeschwindigkeit: Luftgeschwindigkeit, mit der Filterelemente angeströmt werden. Wegen der unvermeidbaren Flächenverluste ist diese im Allgemeinen etwas höher als die Geschwindigkeit der turbulenzarmen Verdrängungsströmung.

Ashrae-Staub: Dieser synthetische Prüfstaub besteht aus einer Mischung von Feinstaub, Baumwollfasern und Ruß.

ASHRAE*-Test: Luftfilter-Prüfverfahren nach ASHRAE 52-68 (USA), bei dem der Prüfling abwechselnd mit ASHRAE-Staub, zur Bestimmung des gravimetrischen Abscheidgrades, und mit natürlichen Luftaerosol, zur Bestimmung des Wirkungsgrades durch die verfärbende Wirkung der Aerosolpartikel beaufschlagt wird.

(*ASHRAE: American Society of Heating, Refrigeration and Airconditioning Engineers)

Aufnahmerahmenkonstruktion: Rahmenwerk aus winkligen Profilen oder geschweißten Konstruktionen, in die die Filterelemente (Taschen-, Kas-

setzen-, Schwebstofffilter) eingesetzt und mit den zur Aufnahmerahmenkonstruktion gehörenden Anpreßvorrichtungen gleichmäßig dicht in die Filtersitze gepreßt werden.

Behaglichkeit: Aus den Zustandswerten und physischen sowie psychischen Faktoren resultierender Bereich von Temperatur und Feuchte sowie Luftgeschwindigkeit, innerhalb dessen ein „Normalmensch“ keine unbehaglichen Erscheinungen (Kälte, Hitze, Zug) wahrnimmt.

DEHS: Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat ist ein Prüfaerosol für Feinstaub- und Schwebstofffilter.

Dichtheit: Der Zustand in dem alle Filterelemente luftdicht in der Aufnahmerahmenkonstruktion sitzen und alle in der Filterwand bzw. die Filterdecke eingebauten Filterelemente keine Lecks haben.

Dichtheitsprüfung: Übertragung des Lecktests auf die Filterwand bzw. die Filterdecke.

Dichtsitzprüfgerät: Gerät zur Messung von Bypässen an Dichtungen von Filtern. Eine Dichtsitzprüfung ist bei Schwebstofffiltern im Geltungsbereich der DIN 1946 vorgeschrieben. Je nach Typ ist ein Filterelement mit einer sog. Dichtsitzprüfrillendichtung oder einer im Aufnahmerahmen vorgesehenen Einrichtung zur Dichtsitzprüfung vorhanden.

Dichtung: Auf dem Filterelement aufgebrachtes dauerelastisches Teil, das sich auf den Filtersitz legt und nach dem Anpressen des Filterelements eine luftdichte Verbindung zwischen Filterelement und Aufnahmerahmenkonstruktion bewirkt.

DOP-Test: Nach Mil.Std. 282 (USA): Prüfmethode zum Prüfen von Schwebstofffiltern (Stückprüfung) mit Hilfe eines thermisch erzeugten DOP-(Diocetylphthalat-) Nebels mit nahezu einheitlichem Partikeldurchmesser von 0,3 [µm]. Die Bestimmung der Aerosolkonzentration vor und hinter dem Prüfling geschieht mit Aerosol-Photometern oder Partikelzählern.

Druckdifferenz: Differenz der statischen Drücke vor und hinter einem Filter. Die Druckdifferenz ist bei konstanter Anströmgeschwindigkeit ein Maß für die Staubbelastung (auch Filtersättigung).

Durchlassgrad: Wird im allgemeinen statt Abscheide-, Wirkungs- oder Entstaubungsgrad bei Schwebstofffiltern gebraucht. Der Durchlassgrad D (in %) ist gegeben durch die Differenz 100 minus Abscheidegrad (bzw. Wirkungs- oder Entstaubungsgrad). Es ist immer anhand der Testmethode zu prüfen, ob der Durchlassgrad massenbezogen (Natrium-Flame-Test) oder partikelbezogen DEHS-Test (Methoden unter Benutzung von Partikelzählern) ist.

Enddruckdifferenz: Maximale, für den Filter in einer Anlage zulässige Druckdifferenz, die in der Mehrzahl der Fälle von der Anlage und ihrem Ventilator gegeben ist. Die maximale Filterdruckdifferenz, die Grenze für Staubdurchbruch oder mechanische Beschädigungen, liegt oft weit höher.

Erstluft: Die Luft, die nach ihrem Austritt aus einem Schwebstofffilter noch nicht mit einer Kontaminationsquelle oder mit dem von ihr ausgehenden Kontaminationskörper in Berührung gekommen ist.

Feuchte: Gehalt der Luft an Wasserdampf in Gramm pro Kilogramm trockene Luft. Andere Angaben: Relative Feuchte in %, Taupunkt oder psy-

Dichtsitzprüfgerät von HS-Luftfilterbau GmbH



chrometrische Differenz, die mit einem feuchten Thermofühler gegenüber einem trockenen ermittelt wird.

Filter: Vorrichtung zum Entfernen von Verunreinigungen aus Fluiden.

Filterwand (Filterdecke): In der Reinraumtechnik werden die Schwebstofffilter zu Filterwänden (für Querstrom) bzw. zu Filterdecken (für Fallstrom) so in einer Aufnahmerahmenkonstruktion zusammengefasst.

Fraktionsabscheidegrad: Ist der für einen bestimmten Partikelgrößenbereich, eine so genannte Fraktion, festgelegte Abscheidegrad.

HEPA Filter: Engl. High-Efficiency-Particulate-Airfilter, dt. HOSCH-Filter zur hocheffizienten Partikelabscheidung bis 99,995 % bei MPPS (0,1 - 0,3 μm).

Horizontalstrom: Die turbulenzarme Verdrängungsströmung wird waagrecht geführt.

Hosch-Filter: Deutsche Abkürzung für „Hochleistungs-Schwebstofffilter“, der im kritischen Abscheidebereich (etwa 0,1 - 0,3 μm) einen Durchlassgrad $> 0,05$ % hat.

Laminar Air Flow: Engl. für turbulenzarme Verdrängungsströmung, die nicht laminar im strengen Sinne ist (auch: unidirectional air flow oder uniform air flow).

Leck: Stelle im HEPA Filterelement, an der lokal an der Filteroberfläche auftretende Aerosoldurchlassgrad den der Umgebung wesentlich überschreitet. Oft wird eine Stelle in einem Filterelement als Leck bezeichnet, wenn dort der lokale Durchlassgrad über dem gem. Norm zulässigen Lokaldurchlasswert liegt.

Lecktest: Untersuchung des Filterelements auf Lecks mit Hilfe eines DEHS-Prüfaerosols und eines Partikelzählers (i.d.R. mit Partikelgröße 0,1 - 0,3 [μm]). Alternativ ist der Ölfadentest bis Klasse EN 1822:H14 zulässig. Bei diesem Verfahren wird Nebel generiert und mit geringer Geschwindigkeit ($\sim 1,3$ cm/s) durch den Filter gegeben. Leckstellen sind durch reinluftseitig auftretende Ölfäden erkennbar.

Luftduschen: Vorrichtung zum Abblasen der reinen Kleidung vor dem Betreten des reinen Raumes. Ihre Wirkung ist umstritten.

Luftzustand: Durch Temperatur, Feuchte und Druck wird der Luftzustand im allgemeinen gekennzeichnet; oft werden diese Werte um den der Luftgeschwindigkeit erweitert.

Mittlerer Abscheidegrad: Der mittlere Abscheidegrad gegenüber synthetischem Staub ist das berechnete Mittel der Einzelwerte des Abscheidegrades gegenüber synthetischem Staub. Er wird in Prozent angegeben.

Mittlerer Wirkungsgrad: Der mittlere Wirkungsgrad gegenüber dem Prüfaerosol DEHS ist das berechnete Mittel der Einzelwerte des Wirkungsgrades gegenüber dem Prüfaerosol DEHS. Er wird in Prozent angegeben.

Nennvolumenstrom: Der Nennvolumenstrom gibt die Luftmenge pro Zeiteinheit an, für die das Filterelement ausgelegt ist.

Partikel: Teilchen festen oder flüssigen Aggregatzustands beliebiger Art, Dichte und Form. In der Reinraumtechnik ist der Begriff „Partikel“ auf die begrenzt, deren Durchmesser $\leq 0,5 \mu\text{m}$ ist.

Partikelbewegung: Die auf einen Partikel einwirkenden Kräfte, verursachen eine Partikelbewegung, die nicht mit derjenigen der Luftströmung übereinstimmen muss. Abweichungen können von Restturbulenzen (Quertransport), Wirbelströmungen, Sedimentation unter dem Einfluß der Schwerkraft des Partikels, oder Coulomb'schen Kräften, bei elektrisch geladenen Partikeln in elektrischen Feldern, herrühren.

Partikelemission: Unvermeidbare Abgabe von Partikeln bei beliebigen Tätigkeiten.

Partikelkonzentration: Die Konzentration aller luftgetragenen Partikel in der Volumeneinheit Raumluft, d.h. im Kubikmeter (auch im Liter oder im Kubikfuß = 28,3 ltr.).

Partikelzähler: Gerät zum Nachweis einzelner Partikel, die frei fliegen, ein Messvolumen durchqueren und dort einen Teil des sie beleuchtenden Lichts streuen. Die Intensität des Streulichts ist ein Maß für den Partikeldurchmesser. Das Kalibrieren erfolgt mit den kugelförmigen Teilchen einer Polystyrol-Latex, die ihrerseits mikroskopisch vermessen werden. Mit elektronischen Maßnahmen (Diskriminator mit verschiedenen Ansprechschwellen und diesen Ansprechschwellen zugeordneten Zählern) lassen die Partikelzähler eine Bewertung der Partikelkonzentration als Summenhäufigkeit in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser zu.

Quertransport: Die Restturbulenz der turbulenzarmen Verdrängungsströmung hat eine Partikelausbreitung quer zur Strömungsrichtung zur Folge. Nach Messungen von Horting liegt der Ausbreitungswinkel bei $15 - 20^\circ$. Dies spricht für eine Quertransportgeschwindigkeit von $\sim 10 \text{ cm/s}$ bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $\sim 30 \text{ cm/s}$.

Reiner Raum: Ein Rein- oder Reinraum ist ein Raum, in dem die Konzentration luftgetragener Teilchen sehr gering gehalten wird. Er ist ein in seiner Reinheit durch besondere Maßnahmen kontrollierter Arbeitsbereich, in dem ein oder mehrere reine Arbeitsplätze vorhanden sind. An den Arbeitsplätzen arbeitende Personen befinden sich innerhalb des reinen Bereiches.

Reine Werkbank: Im Allgemeinen ein, in Sonderfällen auch mehrere, reine Arbeitsplätze, die so angeordnet sind, dass die an ihm bzw. an ihnen beschäftigte Person außerhalb, des in seiner Reinheit kontrollierten Arbeitsbereiches, platziert ist.

Reinheitsgrad der Raumluft: Partikelkonzentration, im Allgemeinen Zahl der Partikel mit einem Partikeldurchmesser von $0,5 \mu\text{m}$ und größer je Kubikmeter Raumluft.

Reinraumklasse: Durch Abstufung des Reinheitsgrades entstehende Klassifizierung. Die Reinheitsklasse dient im Allgemeinen zur Kennzeichnung der Anforderungen an die Raumluft oder zum Nachweis des Einhaltens dieser Anforderungen. Sie sind nach ISO 14644-1 festgelegt (ehemals US Fed.Std. 209E) mit folgenden Klassen:

Reinraumklasse gemäß EN ISO 14644-1 mit maximaler Partikelanzahl pro m³ der Größe:

ISO Kl.	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
1	10					
2	100	24	10			
3	1.000	237	102	35		
4	10.000	2.370	1.020	352	83	
5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	
6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
7				352.000	83.200	2.930
8				3.520.000	832.000	29.300
9				35.200.000	8.320.000	293.000

Reinraumtechnik: Die Technik, Fertigungsschritte, Produktionstufen oder andere gegenüber Verunreinigungen empfindliche Tätigkeiten unter den Bedingungen besonderer äußerer Reinheit durchzuführen.

Sedimentation: Bewegung des Partikels im Schwerfeld der Erde. Zwischen etwa 100 µm und etwa 1 µm gilt das Stokes-Gesetz, nachdem sich eine konstante Sedimentationsgeschwindigkeit einstellt, die der Dichte des Partikel-Materials und dem Quadrat des Stokes-Durchmessers des Partikels proportional ist. Ein Partikel mit einem Stokes-Durchmesser von 10 µm und einer Dichte entsprechend der des Wassers sedimentiert mit 3 mm/s, eines mit 1 µm mit 0,3 mm/s.

Schwebstofffilter: siehe HEPA Filter

Sodium-Flame-Test nach Brit. Std. 3921: Veraltete Prüfmethode zum Prüfen von Schwebstofffiltern (Stückprüfung) mit Hilfe eines aus verdünnter Natriumchloridlösung erzeugtem NaCl-Aerosols mit Partikeldurchmesser im Bereich von 0,05 - 2 µm. Die Konzentrationsbestimmung erfolgt mit Hilfe spektralanalytischer Methoden (Gelbfärbung einer Flamme).

Staubspeicherfähigkeit: Wenn ein Filter bis zu einer gewissen Druckdifferenz (Enddruckdifferenz) mit Staub beladen wird, bezeichnet man die Fähigkeit eines Filtermediums, während der Dauer des Beladungsvorgangs eine gewisse Staubmasse einzulagern, als Staubspeicherfähigkeit. Sie wird in Gramm bei der statischen und in Gramm pro Quadratmeter [g/m²] bei der dynamischen Prüfung angegeben.

Turbulenz: Statistisch verteilte, ungeordnete Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit, die quantitativ als Turbulenzgrad angegeben werden kann. Turbulenz darf nicht mit Wirbeln verwechselt werden.

Turbulenzarme Verdrängungsströmung: Strömungsform, bei der der gesamte zur Strömungsrichtung senkrecht liegende Raumquerschnitt mit gleichförmiger Geschwindigkeit von der Raumluft durchströmt wird. Die Strömung entspricht einer gleichgerichteten Kanal-Anlaufströmung mit großer Reynold-Zahl. Verunreinigungen in der Raumluft werden verdrängt.

Turbulenzreiche Strahlströmung: Strömungsform, bei der die Zuluft als Strahl in den Raum eingeblasen wird. Der Strahl erzeugt eine innere Zirkulationsströmung (das etwa 10- 40 fache des eingeblasenen Volumenstromes!). In den turbulenten Randzonen des Strahls vermischt sich die Zuluft mit der Raumluft. In der Raumluft vorhandene Verunreinigungen werden verdünnt.

Vertikalstrom: Die turbulenzarme Verdrängungsströmung wird senkrecht geführt.

Vorfilter: Luftfilter mit geringerer Abscheidewirkung, die zur Entlastung nachgeschalteter Feinfilter eingesetzt werden.

Wirkungsgrad: Der Wirkungsgrad wird in Prozent angegeben und gibt wie der Abscheidegrad den Anteil des zurückgehaltenen Staubes an. Der Test erfolgt i.d.R. mit DEHS Prüfaerosol bei verschiedenen Staubsättigungsgraden des zu prüfenden Filters. Bei zunehmender Staubsättigung steigt auch die Effizienz des Filters. Die Mittelwerte der Effizienzen bei verschiedenen Staubsättigungspunkten ergeben einen durchschnittlichen Wirkungsgrad. Dieser ist immer höher als der Anfangswirkungsgrad.

Literaturhinweise

- Recknagel, Sprenger, Schramek: „Taschenbuch für Heizung + Klima Technik“, Oldenbourg Industrieverlag München, ISBN 3-486-26450-8
- „Reinraumtechnik“. Mit Beiträgen zahlreicher Fachwissenschaftler (VDI-Buch) von Lothar Gail, Hans-Peter Hortig
- NAFA „Guide to Air Filtration“, ISBN 1-884152-00-7
- NAFA „Installation, Operation and Maintenance of Air Filtration Systems“, ISBN 1-884152-01-6
- Fachzeitschrift „Filtrieren und Separieren“, VDL - Verlag GmbH Verlag & Dienstleistungen
- Fachzeitschrift „CCI Print“, Promotor Verlags- u. Förderungsgesellschaft mbH, GW ISSN 1860-6598

LUFTFILTERBAU
GMBH



HS-Luftfilterbau GmbH
Bunsenstraße 31
D-24145 Kiel
Germany

Tel.: +49 (0) 431 71953 0
Fax: +49 (0) 431 71953 30

info@luftfilterbau.de

