CFD-Analysen von Filtergeräten für Innenraumanwendungen: HYLA EST Luftreiniger

Ergon Research s.r.l.

Via Giuseppe Campani 50,

50134 Firenze (FI)

Tel./Fax: (+39) 055 5391855

DOKUMENTNUMMER ********** **VERSION: 01**
Datum: **21. Juni 2021**
TITEL: CFD-Analysen von Filtergeräten für Innenraumanwendungen: **HYLA EST Luftreiniger**
Schlagwörter:
Verfasser: **Lorenzo Mazzei** *Unterschrift*
Zusammenfassung Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des strömungsdynamischen Verhaltens eines handelsüblichen Luftreinigers in einer Innenraumumgebung mittels CFD-Simulationen. Das Szenario ist repräsentativ für einen Wohnraum mit und ohne Luftreiniger, wobei die Partikel mit einem Durchmesser zwischen PM10 und PM0,1 zu Beginn der Simulation gleichmäßig im Volumen verteilt sind. Die Studie analysiert die Trajektorien der Partikel und ihre Verweilzeit im Raum, um die Leistung des Geräts in Abhängigkeit von der Partikeldurchmesserklasse zu charakterisieren.

Geprüft von:	Genehmigt von:	Unterschrift:	Datum:
Riccardo Da Soghe	Riccardo Da Soghe	*Unterschrift*	**21. Juni 2021**

CFD-Analysen von Filtergeräten für Innenraumanwendungen: HYLA EST Luftreiniger

Indice

Einführung 3
Das Gerät 4
Das Szenario 5
Ergebnisse 8
Schlussfolgerungen 12
Anlage 13
Literaturverzeichnis 14

Einführung

Feinstaub (Particulate Matter, PM) bezeichnet ein Gemisch aus festen und flüssigen Partikeln in der Luft. Diese Partikel können aus Staub, Schmutz, Ruß oder Rauch bestehen und groß genug sein, um sie mit dem bloßen Auge zu sehen. Andere sind kleiner und werden nur mithilfe eines Mikroskops sichtbar (siehe Abbildung 1). PM10 steht für grobe Partikel mit einem Durchmesser von 10 Mikrometern oder kleiner. In den letzten Jahrzehnten konzentrieren sich die Wissenschaftler jedoch auf die ultrafeinen Partikel wie PM0,1 mit einem Durchmesser von 0,1 Mikrometern oder kleiner.

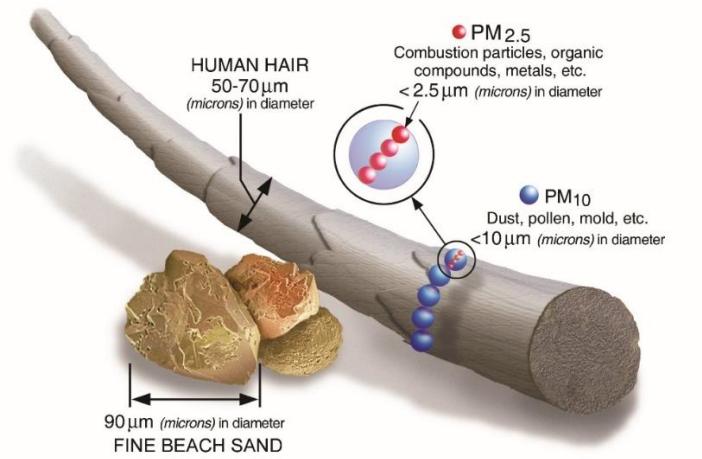

Abbildung 1: Größenvergleich von PM-Partikeln [1]

Es ist bekannt, dass die Wirkung auf den menschlichen Körper desto schädlicher ist, je kleiner der Durchmesser der Partikel ist. PM0,1 dringt teilweise durch die alveolare Kapillarmembran (Blut-Luft-Schranke) in den Körper ein, die die Luft vom Blutstrom trennt. Es wird jedoch vermutet, dass solche

Nanopartikel auch über andere Wege, wie den Verdauungsweg und die Haut, aufgenommen werden können.

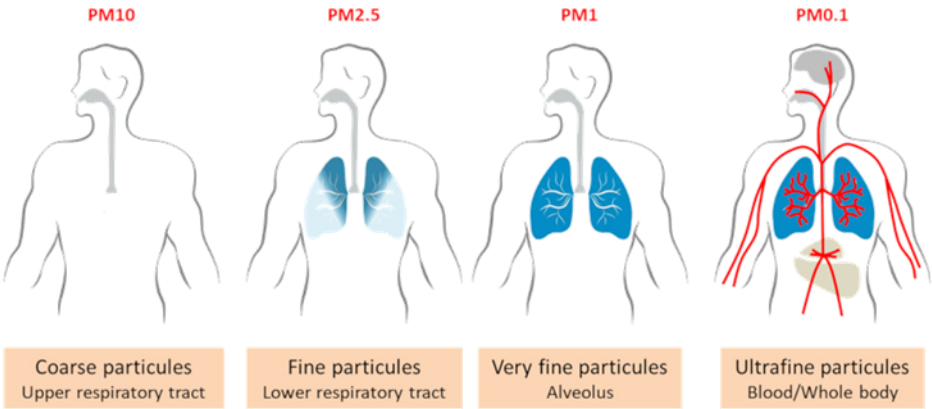

Abbildung 2: Grad der Wechselwirkung von PM-Partikeln mit dem menschlichen Körper [2]

Das Gerät

Der Untersuchungsgegenstand ist der HYLA EST Luftreiniger [3], ein von HYLA entwickeltes Gerät für Haushaltsanwendungen. Aus Abbildung 3 lassen sich einige Details des Geräts ablesen. Das Filtersystem basiert auf der Wasseraufbereitung. Die Luft wird durch Gitter im oberen Teil des Gehäuses angesaugt und in einen Behälter im unteren Teil geleitet, wo sie mit hoher Geschwindigkeit durch das Wasser gedrückt wird. Hier sorgt eine Art „Geysir-Effekt“ dafür, dass sich die Luft (und der Staub) mit dem Wasser vermischt, wodurch eine Mischung entsteht, die die Partikel einfängt. Auf der Oberseite des Behälters befindet sich ein rotierender Abscheider, der mithilfe der Zentrifugalkraft das Wasser und den aufgefangenen Staub von der gereinigten Luft trennt, die schließlich durch ein Gitter am hinteren Teil des Geräts austritt. Was die Durchflussmenge betrifft, so arbeitet das Gerät im Reinigungsmodus mit einer Durchflussmenge von 15,9 L/s. Zusätzlich zu dieser Bedingung (in dieser Untersuchung HYLA ON genannt) wird eine weitere Bedingung berücksichtigt, bei der sich der Luftreiniger nicht im Raum befindet (HYLA OFF)

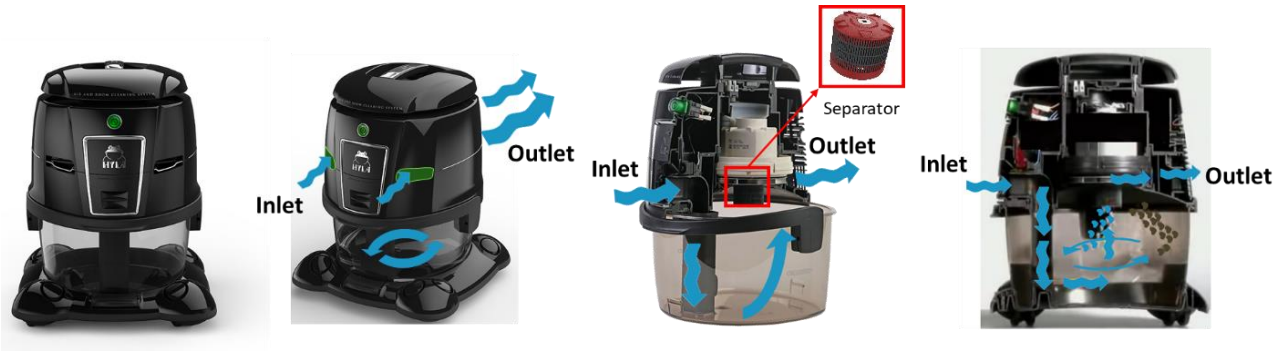

Abbildung 3: Das Gerät HYLA EST.

Das Szenario

Die virtuelle Umgebung, in der das Gerät getestet wurde, wird durch ein Wohnzimmer von 4 m x 4 m x 2,5 m dargestellt, was 16 m^2 und 40 m^3 entspricht (siehe Abbildung 4), einschließlich einer Mutter auf einem Sofa, einem Baby, das auf dem Boden spielt, und anderen Möbelstücken wie Regale mit einem Fernseher und einem kleinen Couchtisch. Das für den Umfang der Studie relevanteste Objekt ist jedoch der Luftreiniger, der sich in der Ecke des Raumes nahe der Tür befindet.

Die Raumtemperatur wird mit 25 °C angenommen, während für die Personen und Gegenstände im Raum unterschiedliche Temperaturwerte gelten, um die natürliche Konvektion, die sich aus dem temperaturbedingten Auftriebseffekt ergibt, auch bei Abwesenheit des Luftreinigers nachzubilden. So werden das Fenster auf 25 °C, der Fernseher auf 40 °C sowie die Mutter und das Baby auf 35 °C eingestellt.

Für die durch das Fenster eintretenden Partikel wurden drei verschiedene Klassen von Durchmessern untersucht: PM10, PM2,5 und PM0,1. Die Partikel sind in derselben Abbildung bereits wenige Sekunden nach dem Start der Simulation sichtbar. Aufgrund des Mangels an zusätzlichen Daten zur Filtrationseffizienz des Systems wird von einer idealen Leistung ausgegangen, was bedeutet, dass der gesamte vom Abscheider aufgefangene Staub entfernt wird und keine Partikel auf der Rückseite des Geräts wieder austreten.

Wie bereits erwähnt, werden in diese Untersuchung zwei Bedingungen aufgenommen: das Gerät arbeitet im Reinigungsmodus (HYLA ON) und das Gerät befindet sich nicht im Raum (HYLA OFF).

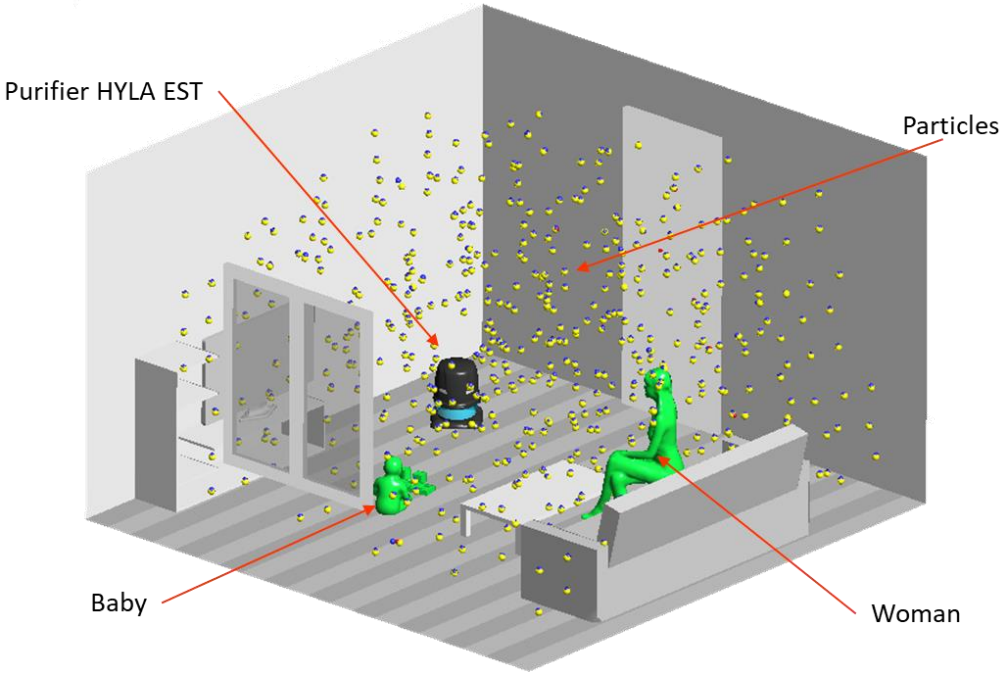

Abbildung 4: Untersuchte Umgebung

Numerische Methodik

Die in dieser Untersuchung verwendeten Tools gehören zu der von ANSYS angebotenen kommerziellen Software-Suite. Das Berechnungsgitter (Abbildung 5) wurde mithilfe von ANSYS Meshing als tetraedrisches Netz mit 2,4 Millionen Elementen und etwa 0,4 Millionen Knoten angelegt. Es wurden feinmaschigere Bereiche in der Nähe des Luftreinigers hinzugefügt, um den Geschwindigkeitsgradienten in diesem Bereich genauer abzubilden.

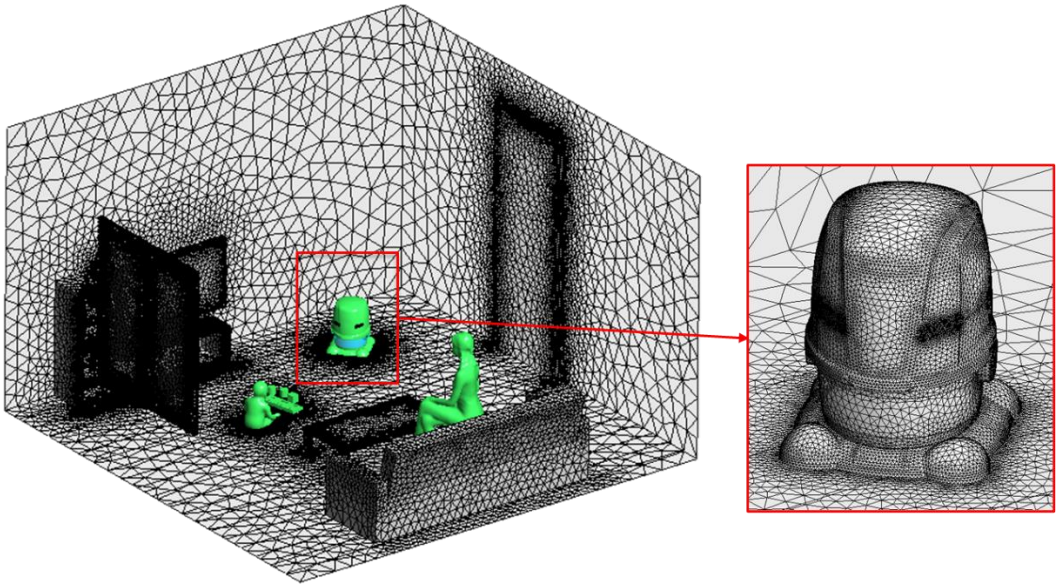

Abbildung 5: Berechnungsgitter

Die Simulationen wurden mit Fluent Release 2019 R3 durchgeführt [4]. Der numerische Aufbau wurde basierend auf dem neuesten Stand der Literatur und den bisherigen Erfahrungen der Autoren gewählt [5]. Luft wurde als ideales Gas angesehen, wobei ihre Eigenschaften aufgrund der geringen Temperaturunterschiede als Konstanten betrachtet wurden. Gravitationseinflüsse wurden berücksichtigt. Für die Euler-Phase wurden die Auswirkungen der Turbulenz auf das Strömungsfeld in Übereinstimmung mit den bisherigen Erfahrungen mithilfe des „k-ε"-Turbulenzmodells berücksichtigt [6–8]. Der Luftauslassbereich des Luftreinigers wurde als Massenstromeinlass betrachtet, während der Lufteinlassbereich als Massenstromauslass betrachtet wurde. Der angewandte Massendurchfluss ist auf beiden Flächen gleich, um den Massenausgleich zu gewährleisten. Alle Wände werden als rutschfest, glatt und adiabatisch behandelt, mit Ausnahme der Personen, des Fernsehers und des Fensters, auf die eine feste Temperatur angewendet wurde. Die Partikelbewegung wurde mit dem Lagrangeschen Particle Tracking gelöst. Der verfolgte Ansatz beinhaltet eine 1-Wege-Kopplung, wobei das Eulersche Strömungsfeld den Lagrangeschen Transport beeinflusst, ohne dass das Vorhandensein von Partikeln einen Einfluss auf ersteres hat (aufgrund ihrer geringen Größe). In der Modellierung wurde das stochastische Tracking berücksichtigt, wobei dafür das „Discrete Random Walk"-Modell verwendet wurde. Die Partikel werden als gleichmäßig im Raum verteilt und mit einer Geschwindigkeit von Null initialisiert. Die Population wurde als monodispers (d. h. Durchmesser mit konstantem Wert) betrachtet und in die drei Klassen PM10, PM2,5 und PM0,1 unterteilt. Die Partikel wurden als kugelförmig behandelt und

für alle Oberflächen wurde eine Fallenbedingung für den Partikelkontakt berücksichtigt (d. h. der Partikel wird entfernt, wenn er eine Oberfläche erreicht), außer für Wände und Decke, die als reflektierend betrachtet werden.
Die stationären Simulationen wurden mithilfe des SIMPLE Solver bis zur Konvergenz der Berechnung durchgeführt. Anschließend wurde die Lagrangesche Berechnung als Postprocessing auf dem Eulerschen Feld durchgeführt, um die Bewegung der Partikel zu verfolgen.

Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Partikel nach dem Eintritt in den Raum ist in Abbildung 6 qualitativ dargestellt. Die Abbildung zeigt die Momentaufnahmen der dreidimensionalen Position der Partikel unter Berücksichtigung von drei verschiedenen Zeitpunkten mit einem Intervall von 10 Minuten (von links nach rechts) und den beiden Betriebsbedingungen (von oben nach unten). Die Partikel werden in wechselnder Größe und Farbe angezeigt, um den Unterschied im Durchmesser hervorzuheben: PM10 (groß, gelb), PM2,5 (mittelgroß, blau), PM0,1 (klein, rot). Die Szenarien gehen zu Beginn von der gleichen Bedingung aus, weichen aber später allmählich voneinander ab. Es zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Partikelmenge, wenn der Luftreiniger aktiv ist.

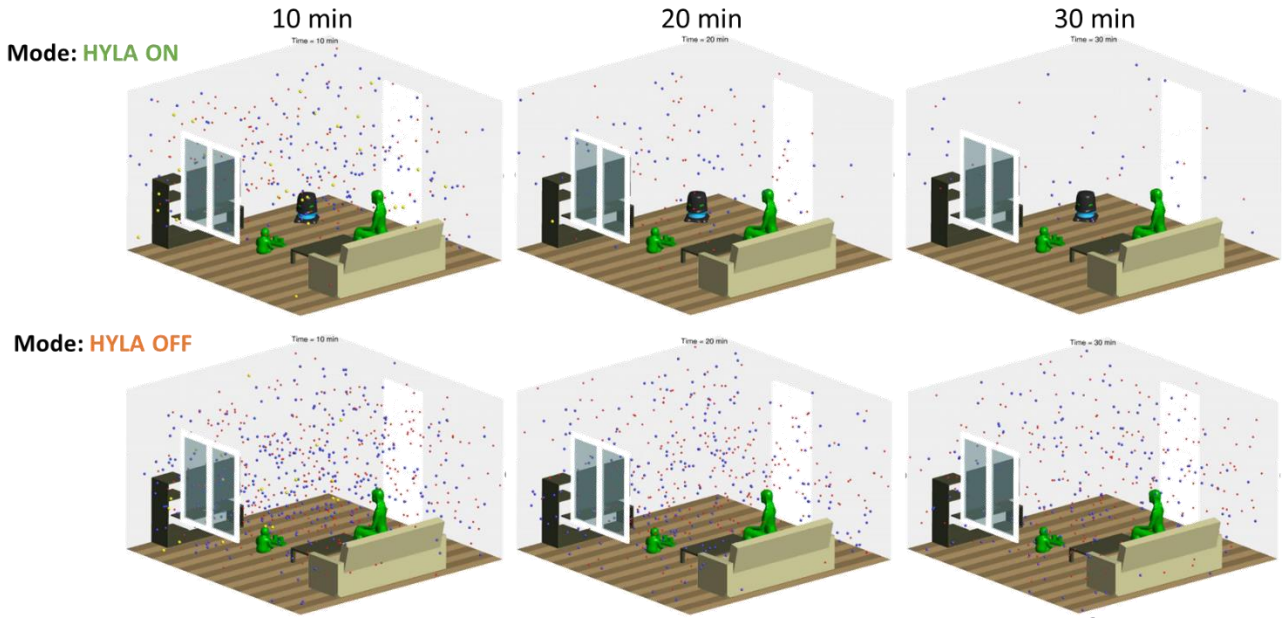

Abbildung 6: Qualitative zeitliche Entwicklung der Partikel in Abhängigkeit von der Betriebsart für PM10 (groß, gelb), PM2,5 (mittelgroß, blau) und PM0,1 (klein, rot)

Um den Einfluss der Betriebsart und des Durchmessers der Partikel besser zu verstehen, kann man sich auf die in Abbildung 7 gezeigten Diagramme beziehen, die den kumulativen Trend der Verweilzeit der Partikel im Raum zeigen. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass der Effekt des Partikeldurchmessers die Variation von Größenordnungen in der Verweilzeit beinhaltet. Dieser Effekt bestätigt, dass Partikel mit kleinerem Durchmesser dazu neigen, deutlich länger in der Schwebe zu verbleiben.
Außerdem kann man feststellen, wie sich die Betriebsart des Luftreinigers hauptsächlich auf die Verweilzeit der kleinsten Partikel (PM2,5 und PM0,1) auswirkt, während für die größten (PM10) nur eine minimale Abweichung zwischen den Kurven besteht. Dieser Effekt ist durch die Eigenschaften dieser Partikel begründet, die aufgrund ihres größeren Gewichts dazu neigen, sich früher abzulagern, ohne vom Gerät aufgenommen zu werden, wenn sie weit genug entfernt sind. Wie erwartet ist der Trend auch hier generell asymptotisch, mit Verweilzeiten, die sich exponentiell verlängern, um 10 % der verbleibenden Partikel im Raum zu entfernen.

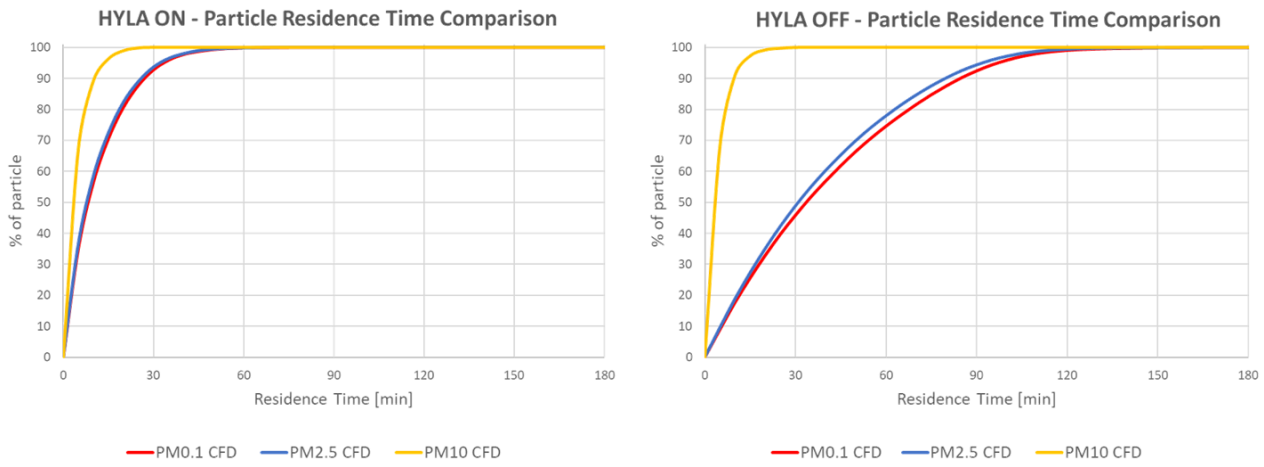

Abbildung 7: Kumulative Verteilung der Verweilzeit von Partikeln für die beiden Betriebsbedingungen, abhängig vom Partikeldurchmesser

Die kumulativen Verteilungen wurden in Abbildung 8 neu dargestellt, um den Einfluss des Luftreinigers auf jede Durchmesserklasse besser hervorzuheben. Auch hier zeigen die PM10-Partikel einen geringen Einfluss der Betriebsart und eine geringe Verweilzeit aufgrund der schnellen Ablagerung. Der Luftreiniger ist in der Lage, einen Teil der Population aufzunehmen, aber seine Anwesenheit führt auch zu einigen Störungen des Strömungsfelds im Raum. Die von der Geräterückseite erneut eingeleitete Luft kann den natürlichen Ablagerungsprozess in der Tat verlangsamen und damit den Entfernungsprozess ausgleichen. Partikel der Größen PM2,5 und

PM0,1 werden stattdessen sehr stark durch den Luftreiniger beeinflusst, mit einer deutlichen Reduzierung bei eingeschaltetem Gerät.
Zusätzlich wurde die Verweilzeit extrahiert, um 90 % der Partikel zu berücksichtigen. Wie aus der Abbildung ersichtlich, werden PM10-Partikel in 10 bis 11 Minuten entfernt, ohne dass der Luftreiniger eine wesentliche Rolle spielt. Die kleinen Partikel werden durch den Luftreiniger jedoch in weniger als 30 Minuten entfernt (im Vergleich zu 80 bis 85 Minuten ohne Luftreiniger).

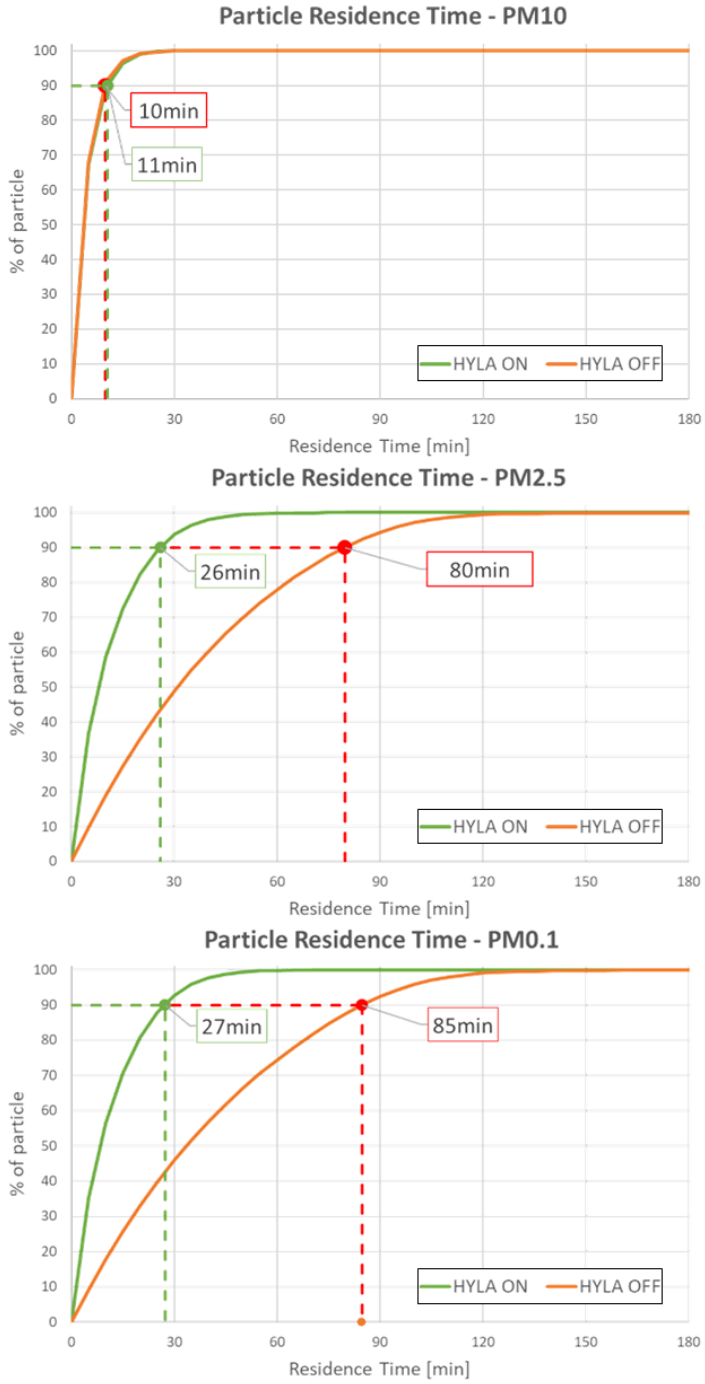

Abbildung 8: Kumulative Verteilung der Verweilzeit von Partikeln für die drei Partikeldurchmesserklassen, abhängig von der Betriebsbedingung

Um die Auswirkung der Betriebsart basierend auf dem Partikeldurchmesser besser quantifizieren zu können, wurden die in Abbildung 8 berichteten Daten weiter ausgearbeitet, um die Reduzierung der maximalen Verweilzeit abzuleiten, die erforderlich ist, um die ersten 90 % der Partikel im Raum zu entfernen. Die Ergebnisse, die mithilfe von Histogrammen in Abbildung 9 hervorgehoben werden, zeigen, dass die Partikel im Allgemeinen desto länger in der Luft schweben, je kleiner ihr Durchmesser ist. Die Aktivierung des Luftreinigers (HYLA ON) hat einen geringen Effekt auf PM10, jedoch einen signifikanten für PM2,5 (-67,3 %) und PM0,1 (-67,8 %).

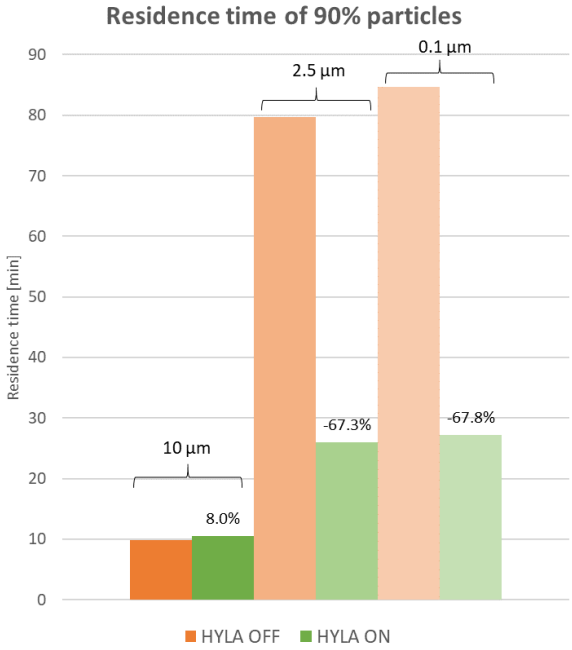

Abbildung 9: Verweilzeit von 90 % der Partikel in Abhängigkeit von der Betriebsbedingung und dem Partikeldurchmesser

Schlussfolgerungen

Dieser Bericht fasst die wichtigsten Ergebnisse der CFD-Analysen zusammen, die zur Charakterisierung eines Luftreinigers für zu Hause durchgeführt wurden. Die virtuellen Tests wurden in einem Wohnzimmer durchgeführt, in dem die Partikel als gleichmäßig im Raum verteilt initialisiert und anschließend durch die natürliche Konvektion im Raum bewegt werden. Die Studie liefert daher eine repräsentative Abschätzung des Einflusses des Geräts auf den Verbleib und die Verweildauer der Partikel. Die Leistung wurde unter Berücksichtigung zweier Szenarien, nämlich

abwesender/anwesender Luftreiniger, und drei Klassen von Partikeldurchmessern, nämlich PM10, PM2,5 und PM0,1, charakterisiert.
Obwohl die Ergebnisse durch mehrere willkürliche Entscheidungen beeinflusst werden, einschließlich des Layouts des Raums und der Position des Luftreinigers, ist die verwendete Berechnungsmethode robust und basiert auf Modellen und Eingaben, die aus der wissenschaftlichen Literatur und früheren Erfahrungen der Verfasser abgeleitet wurden.
Letztlich lassen sich die wichtigsten Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Die Dynamik von Partikeln wird maßgeblich von ihrem Durchmesser beeinflusst.
- Die schwersten Partikel (PM10) lagern sich aufgrund ihres größeren Gewichts schneller ab und können vom Luftreiniger kaum aufgenommen werden, vor allem, wenn dieser weit von der Partikelquelle entfernt steht.
- Die leichtesten Partikel (PM2,5 und PM0,1) bleiben zwar länger in der Schwebe, können aber andererseits von der Luft transportiert und somit leichter vom Luftreiniger aufgenommen werden.
- Ohne Luftreiniger variiert die Verweilzeit der ersten 90 % der Partikel zwischen etwa 10 Minuten (PM10) und 80 bis 85 Minuten (PM2,5 und PM0,1).
- Mit Luftreiniger reduziert sich die Verweildauer von 90 % der kleinsten Partikel (PM2,5 und PM0,1) um bis zu 67 %.

Auf der Grundlage der bei dieser numerischen Studie gewonnenen Daten kann daher festgestellt werden, dass das Gerät bei einer Verwendung, die mit den in der Studie getroffenen Annahmen übereinstimmt, bei der Entfernung von Partikeln mit einer Größe zwischen PM2,5 und PM0,1 besonders effektiv ist. Diese Arten von Partikeln sind für die menschliche Gesundheit besonders relevant, da sie im Gegensatz zu schwereren Partikeln dazu neigen, in der Luft zu schweben, ohne sich abzulagern, und tief in die Lungenbläschen einzudringen. Im Vergleich zu der Bedingung ohne bzw. mit abgeschaltetem Luftreiniger führt der Betrieb des Luftreinigers zu einer Reduzierung der Partikelverweilzeit im Raum um 67 %.

Anlage

Am Ende der Untersuchung bereitgestellte Dokumente:

- PowerPoint-Präsentation und Videos für die beiden Modi.

Literaturverzeichnis

[1] US EPA, O., 2016, “Particulate Matter (PM) Basics,” US EPA [Online]. Available: https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics. [Accessed: 19-Jun-2021].

[2] 2019, “Airborne Particulate Matter and Their Health Effects,” Encyclopedia of the Environment.

[3] “Technical Information - HYLA International” [Online]. Available: https://www.hyla.com/the-hyla-est/technical-information. [Accessed: 19-Jun-2021].

[4] 2019, *Fluent Theory Guide*, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA.

[5] Borro, L., Mazzei, L., Raponi, M., Piscitelli, P., Miani, A., and Secinaro, A., 2021, “The Role of Air Conditioning in the Diffusion of Sars-CoV-2 in Indoor Environments: A First Computational Fluid Dynamic Model, Based on Investigations Performed at the Vatican State Children’s Hospital,” Environmental Research, **193**, p. 110343.

[6] Gao, N., and Niu, J., 2006, “Transient CFD Simulation of the Respiration Process and Inter-Person Exposure Assessment,” Building and Environment, **41**(9), pp. 1214–1222.

[7] Aliabadi, A. A., Rogak, S. N., Green, S. I., and Bartlett, K. H., 2010, “CFD Simulation of Human Coughs and Sneezes: A Study in Droplet Dispersion, Heat, and Mass Transfer,” American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 1051–1060.

[8] Zhang, L., and Li, Y., 2012, “Dispersion of Coughed Droplets in a Fully-Occupied High-Speed Rail Cabin,” Building and Environment, **47**, pp. 58–66.