

## Deutsche Zusammenfassung der Niederländischen Version: Belüftung und Luftfiltration in Fitnessstudios zur Reduzierung der Aerosolkonzentration

Dies ist eine kurze Erläuterung/Zusammenfassung des zweiteiligen englischsprachigen Forschungsberichts. Einerseits ein begutachteter wissenschaftlicher Artikel, der am 1. Februar 2021 zur Veröffentlichung in einem Top-Journal auf dem Gebiet des Bauwesens angenommen wurde, und andererseits ein Teil eines wissenschaftlicher Artikels in Vorbereitung. Der letzte Teil bietet einige praktische Hilfsmittel, um den notwendigen Grad der Belüftung und/oder Luftreinigung für einen bestimmten Sportraum zu bestimmen.

Ziel dieser Studie war es, die Wirksamkeit von Lüftung und innovativer Luftreinigung zur Reduzierung der Aerosolpartikelkonzentration in Turnhallen im Rahmen der COVID-19-Pandemie zu untersuchen. Diese Untersuchung wurde von Sportinnovator initiiert und im Auftrag des Topteam Sport durchgeführt. Der experimentelle Teil der Forschung wurde teilweise in der Turnhalle des Student Sports Centre (SSC) der Technischen Universität Eindhoven am 11. Juli 2020 durchgeführt - in Zusammenarbeit zwischen den folgenden Forschungsparteien:

- TU Eindhoven - Fakultät für Architektur - Lehrstuhlgruppe Bauphysik (Bert Blocken und Mitarbeiter)
- TU Eindhoven - Fakultät für Architektur - Technisches Labor (Jan Diepens und Mitarbeiter)
- TU Eindhoven - Fakultät für Industriedesign (Steven Vos, Dennis Arts)
- PlasmaMade (Martin van der Sluis und Mitarbeiter)

### Inhalt der Untersuchung und wichtigste Schlussfolgerungen

**Artikel: "Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic". Aktueller Status: Angenommen zur Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift "Building & Environment" am 1. Februar 2021.**

**Die Einleitung** gibt einen Überblick über den relevanten Stand der wissenschaftlichen Literatur. Ein Aerosol ist eine Suspension von festen oder flüssigen Partikeln in der Luft. Im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie bezieht sich dies auf eine Suspension von

Speichel-Tröpfchen in der Luft. In der Einleitung des Artikels wird darauf hingewiesen, dass das Vorsorgeprinzip erfordert, auf die Konzentrationen von Aerosolpartikeln und auf die Begrenzung dieser Konzentrationen in Innenräumen zu achten. Die ungefähre Anzahl der Speichel-Tröpfchen, die durch Niesen, Husten und Sprechen entstehen, wird angezeigt. Anhand von Literaturquellen wird darauf hingewiesen, dass es keinen Konsens über den "kritischen" Durchmesser gibt, der große Tröpfchen von kleinen Tröpfchen oder Aerosolpartikeln trennt, und dass dieser Mangel an Konsens wahrscheinlich daher rührt, dass frühere Studien bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten durchgeführt wurden. Mit diesem Verständnis erscheint es logisch, die Grenze zwischen großen und kleinen Tropfen bei einem Durchmesser von "einigen zehn Mikrometern" zu ziehen. Die großen Tröpfchen fallen unter dem Einfluss der Schwerkraft relativ schnell zu Boden, daher die eingeführte "Sozialdistanz" von 1,5 m. Die kleinen Tröpfchen verdunsten sehr schnell, in wenigen Sekunden oder sogar Sekundenbruchteilen, und können dann als Tröpfchen-Kerne, ob mit Viruspartikeln beladen oder nicht, über Stunden in der Luft schwebend bleiben. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass das Virus bis zu etwa 3 Stunden auf einem solchen Tröpfchen-Kern überleben kann. In der Einleitung wird auch erwähnt, dass nationale und internationale Organisationen und Regierungen die Bedeutung einer "angemessenen Belüftung" betonen. Gleichzeitig bedeutet dies, dass sie implizit die Virusübertragung durch Aerosolpartikel berücksichtigen, da die Lüftung nur auf diese Form der Übertragung Einfluss hat. Es ist jedoch noch unbekannt, wie viel Lüftung "ausreichend" ist. Aus der Literatur geht hervor, dass dies selbst für die verschiedenen existierenden Viren noch unzureichend bekannt ist. Dennoch ist es wichtig, den Einfluss der Belüftung, unabhängig davon, ob sie durch innovative und leistungsfähige Luftreinigungssysteme ergänzt wird oder nicht, auf die Konzentrationen von Aerosolpartikeln, die in verschiedenen Innenräumen auftreten können, zu untersuchen. Denn je niedriger diese Konzentrationen sind, desto sicherer ist die Situation. In dieser Studie wird dies speziell für den Fall eines Fitnessraums untersucht.

**Im zweiten Teil** des Artikels (siehe S. 3 des vollständigen Artikels zu dieser wissenschaftlichen Studie) wird der Stand der wissenschaftlichen Literatur zur Aerosolbildung, Lüftung und Luftreinigung in Fitnessstudios näher betrachtet. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass tiefe Ausatmungen 4- bis 6-mal mehr Aerosolpartikel erzeugen können als normale Atmung in Ruhe, und dass schnelle Einatmungen diese Menge um den Faktor 2 bis 3 erhöhen können. Im extremsten Fall bedeutet dies eine Steigerung um den Faktor 18. Dies zeigt auch eine weitere Studie, die unabhängig von der ersten durchgeführt wurde, auch dort wurde der Faktor 18 gefunden, der allerdings nicht für jede Testperson zutrifft. Tatsächlich gab es große Unterschiede in der Aerosolpartikelproduktion der verschiedenen Testpersonen. Dies zeigt jedoch, dass die Bedenken in Bezug auf COVID-19 und Sport nicht unberechtigt sind. Eine aktuelle Veröffentlichung in der Zeitschrift "Nature" verwies auch auf Fitnesscenter (und Restaurants) als effiziente Orte für die mögliche Übertragung von SARS-CoV-2-Virusinfektionen.

Allerdings schien es in der wissenschaftlichen Literatur keine Studie zu geben, die speziell Speichelaerosole in Fitnessstudios untersucht hat. Die vorliegende Studie ist somit

die erste. In der Tat gibt es nur sehr wenige Studien zur Luftqualität in Fitnessstudios im Allgemeinen. Die wenigen verfügbaren Studien konzentrieren sich nicht speziell auf Speichelaerosole, sondern allgemeiner auf "Feinstaub". Beachten Sie, dass die Definition von Feinstaub implizit Speichelaerosole einschließt; Aerosolpartikel und Feinstaub sind Synonyme. Frühere Studien zur Luftqualität in Fitnessstudios haben ergeben, dass Übungen mit Bewegungen, wie z. B. Aerobic-Kurse, eine Menge Feinstaub erzeugen. Dies wurde hauptsächlich auf die Resuspension von Feinstaub zurückgeführt, der sich zuvor auf Oberflächen abgesetzt hatte. Zwangsläufig wurden aber auch Speichel-Aerosolpartikel gemessen, obwohl die Messgeräte diese Unterscheidung nicht zuließen.

Die Bauvorschriften geben die Mindestlüftungsvolumenströme vor, die Gebäude erfüllen müssen, je nach Art ihrer Verwendung. Für Sportgebäude ist dies eine Versorgung von 6,5 dm<sup>3</sup>/s pro Person für neue Gebäude und 3,44 dm<sup>3</sup>/s pro Person für bestehende Gebäude. Das NOC\*NSF ist eine Organisation, die nach dem Zusammenschluss des Niederländischen Olympischen Komitees und des Niederländischen Sportverbands entstanden ist. Das NOC\*NSF-Handbuch für Sportstätten gibt Richtlinien vor, die deutlich höhere Lüftungsströme vorschreiben: 6 ACH für Fitnessräume, 8 ACH für Aerobic- und Kampfsporträume und 10 ACH für Spinning-Räume. ACH ist die "Luftwechselrate pro Stunde", d.h. wie oft pro Stunde das gesamte Raumluftvolumen durch Frischluft ersetzt wird. Diese Werte sind recht hoch. Es gibt auch ein erwähntes Minimum von 11,1 dm<sup>3</sup>/s pro Athlet, viel höher als die Werte in der Bauordnung, aber auch im Vergleich zur amerikanischen Richtlinie (ASHRAE-Standard) von mindestens 10 dm<sup>3</sup>/s pro Person.

Trotz der Tatsache, dass die COVID-19-Pandemie in unserer Region fast ein Jahr währt, wird die Luftreinigung mit mobilen professionellen Geräten in den Niederlanden und in Westeuropa insgesamt eher „ausnahmsweise“ angewendet. Das liegt zum einen an der fehlenden Zertifizierung und Standardisierung und zum anderen an Reputationsproblemen: Es gibt auf dem Markt Geräte mit sehr geringer Effizienz und Effektivität und sogar Geräte, die große Mengen an schädlichen Nebenprodukten wie Ozon und Stickoxide erzeugen. Die Auswahl, Installation und Wartung von Luftreinigungssystemen ist daher eine Aufgabe für Profis, genauso wie die Planung, Installation und Wartung von Lüftungsanlagen.

**Der dritte Abschnitt** des Artikels (siehe S. 6) ist eine kurze zusätzliche Studie, die in einer speziellen luftdichten Klimakammer durchgeführt wurde, um festzustellen, wie viele der Aerosolpartikel, die von einer trainierenden Person erzeugt werden, nun tatsächlich Speichelaerosole sind. Im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie sind Speichelaerosole in dieser Studie von besonderem Interesse. Aber auch über Haare, Kleidung und Haut geben Personen Partikel ab, und auch Fitnessgeräte erzeugen Partikel durch Reibung zwischen verschiedenen Komponenten und Reibung zwischen Geräteteilen, Kleidung und Haut. Auch Partikel, die sich zuvor auf Oberflächen abgelagert haben, können in der Luft wieder zum Schweben kommen, dies wird als Resuspension bezeichnet. Es wurde ein Aufbau mit einem statischen Fahrrad (Hometrainer) in der Mitte der Klimakammer entworfen und die Probanden wurden gebeten, zuerst zu trainieren, während sie in der Klimakammer frei ein- und ausatmeten, und dann nach einer Ruhe- und Trinkpause erneut zu trainieren, während sie frei einatmeten, aber durch einen Schlauch, der außerhalb der Klimakammer austrat, ausatmeten. Auf diese Weise ist die Differenz der gemessenen Konzentrationen zwischen

den beiden Trainingseinheiten ein Hinweis auf die Menge der Speichelaerosole. Die Ergebnisse dieser kleinen Studie zeigen, dass - in Übereinstimmung mit früheren Studien zu ausgeatmeten Aerosolen - die Unterschiede zwischen den verschiedenen Probanden sehr groß sind. Bei der ersten Versuchsperson waren die gemessenen Speichel-Aerosol-Emissionen im Vergleich zu den nicht speichelgebundenen Aerosol-Emissionen fast vernachlässigbar. Im Gegensatz dazu lagen bei einem anderen Probanden die Speichel-Aerosol-Emissionen in der gleichen Größenordnung wie die nicht-salivären Aerosol-Emissionen. Dieses Ergebnis zeigt, dass - entgegen den Annahmen in einigen früheren Studien - die Speichelaerosole keineswegs als vernachlässigbar angesehen werden können, dass aber noch viele weitere Untersuchungen mit großen Probandenzahlen notwendig sind, um eine gute Vorstellung vom Verhältnis zwischen Speichelaerosolbildung und Gesamtaerosolbildung zu bekommen. Eine solche Studie scheint zurzeit nicht verfügbar zu sein.

**Der vierte Abschnitt** des Artikels (siehe S. 8) geht zunächst auf den Messaufbau im Fitnesscenter der TU Eindhoven ein. Der Raum wurde mit einem vertikalen Schirm vom Boden bis zur Decke in zwei Teile geteilt und nur in einer der Hälften wurde der Test durchgeführt. Das Volumen des Raumes beträgt ca. 886 m<sup>3</sup>. Eine mechanische Lüftungsanlage ist vorhanden, mit Ansaug- und Abluftöffnungen in Deckennähe. Der gesamte Lüftungsstrom, der in diesen Raum eingeblasen wird, beträgt 1949 m<sup>3</sup>/h. Dies ergibt einen ACH von, 2,20-mal pro Stunde, was 4,5-mal höher ist als das Minimum in den Bauvorschriften für bestehende Gebäude, unter der Annahme, dass 35 Personen anwesend sind. Sie ist jedoch deutlich niedriger als der ACH von 6-mal pro Stunde in den Richtlinien des Handbuchs für Sportstätten.

Den rekrutierten Testpersonen und den Forschern wurde ein strenges Sicherheitsprotokoll auferlegt. Alle wurden auf COVID-19 getestet und dann für zwei Tage in einem Hotel im Zentrum von Eindhoven unter Quarantäne gestellt, bis am Morgen des Samstags, 11. Juli 2020, die gesamte Gruppe in einer langen Kolonne zu Fuß vom Hotel zum Fitnessraum zog. Im Fitnessraum waren Geräte für Cardio- und Krafttraining aufgebaut. Die Aerosol-Konzentrationen wurden hauptsächlich mit 2 Grimms-Sensoren und 110 ASQ2020PRO-Sensoren gemessen. Die letztgenannten Sensoren maßen auch die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit. Zwei mobile professionelle Luftreiniger wurden im mittleren Teil des Raumes aufgestellt. Diese Geräte hatten jeweils eine Kapazität von 617 m<sup>3</sup>/h und einen Energieverbrauch von jeweils (nur) 105 W. Die Abbildung unten zeigt schematisch den Testaufbau. Es ist zu beachten, dass die gemessenen Aerosolkonzentrationen nicht nur Speichel-Aerosolpartikel waren, sondern auch Aerosolpartikel, die von Haaren, der Haut, der Kleidung, den Fitnessgeräten selbst und durch Resuspension von zuvor auf Oberflächen abgelagerten Partikeln freigesetzt wurden. Die verfügbaren Messgeräte lassen diese Unterscheidung nicht zu.

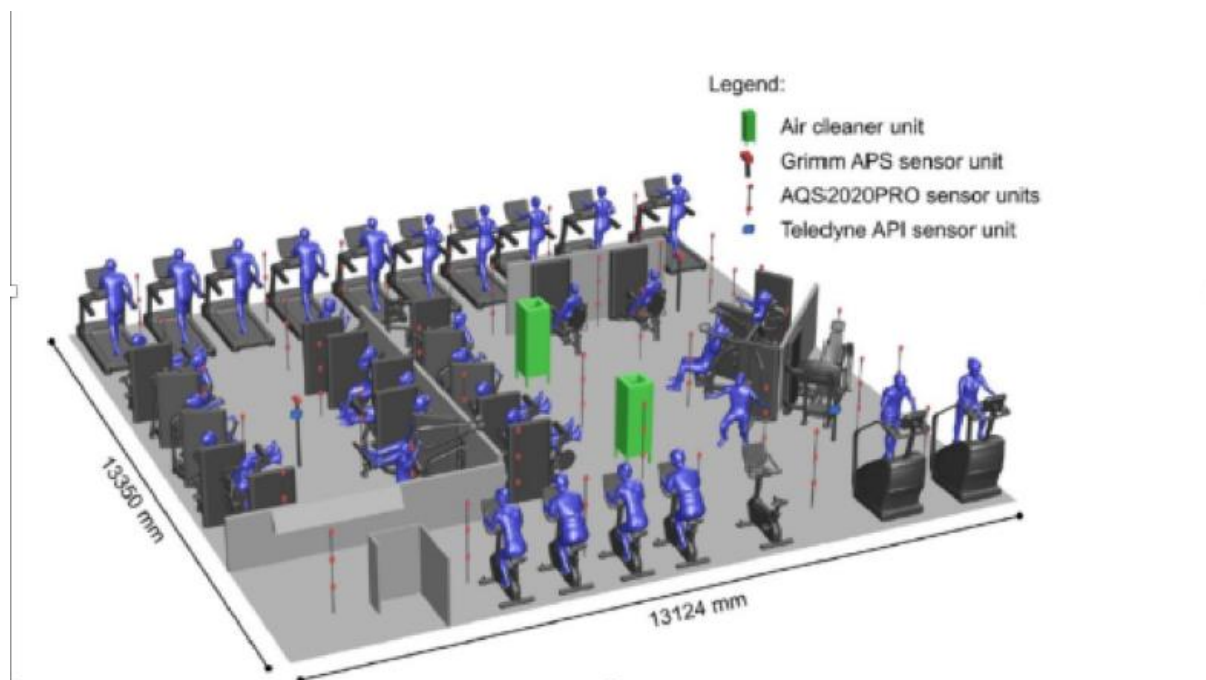


Abbildung: Messaufbau im Fitnessraum 3 des Studentensportzentrums der TU Eindhoven.

Es wurden sechs Szenarien ausgeführt:

- Szenario 1: 35 Sportler, Lüftung, keine Luftreinigung
- Szenario 2: keine Sportler, Lüftung, keine Luftreinigung
- Szenario 3: 35 Sportler, keine Lüftung, keine Luftreinigung
- Szenario 4: keine Sportler, keine Lüftung, keine Luftreinigung
- Szenario 5: 35 Sportler, keine Lüftung, Luftreinigung
- Szenario 6: keine Sportler, keine Lüftung, Luftreinigung

Jedes Szenario dauerte 30 Minuten, und es war im Voraus klar vorgeschrieben, welche Geräte von jedem Probanden zu welchem Zeitpunkt verwendet werden sollten. Diese sechs Szenarien ermöglichten die Analyse verschiedener wichtiger physikalischer Prozesse. Szenario 1 lieferte Informationen über Erzeugung von Aerosolpartikeln und deren gleichzeitige Entfernung durch Lüftung. Szenario 2 gab Aufschluss darüber, wie das Lüftungssystem ohne die Anwesenheit der Quellen (d. h. der Sportler) funktioniert. Szenario 3 lieferte Informationen zu den Quellen ohne den Einfluss von Lüftungs- und Luftreinigungssystemen. Szenario 4 gab Aufschluss über die natürliche Deposition bei "ruhigen" Innenraumbedingungen, d.h. ohne die durch die Lüftung oder Luftreiniger verursachten Luftströmungen. Szenario 5 zeigte, wie die Quellen und die Luftreiniger zusammenarbeiten. Szenario 6 schließlich zeigte, wie die Luftreiniger nur auf die Aerosolpartikelkonzentrationen wirken. Mehr Szenarien waren am Mess-Tag selbst aufgrund der begrenzten Zeit und der auftretenden Müdigkeit der Sportler nicht möglich. Ein Szenario, das nicht getestet wurde, aber sehr relevant ist, ist die Kombination von Lüftung mit Luftreinigung. Auf diese Kombination wird später in diesem Text eingegangen.

Die Messergebnisse in jedem dieser Szenarien lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen. Die Belüftung allein reichte nicht aus, um einen starken Anstieg der

Aerosolpartikelkonzentration über den 30-minütigen Zeitraum zu verhindern. Das gleiche galt für die reine Luftreinigung. Auffallend ist, dass der Anstieg der Konzentrationen in Szenario 1 (Sport und Lüftung) etwa gleich hoch war wie in Szenario 5 (Sport und Luftreinigung). Auch die Abnahme der Aerosolpartikelkonzentration durch die Lüftung in Szenario 2 war etwa gleich groß wie die Abnahme durch die Luftverschmutzung in Szenario 6. Die Tatsache, dass Lüftung und Luftreinigung in etwa die gleiche Wirkung hatten, erscheint etwas überraschend, da die Kapazität der Lüftungsanlage (1949 m<sup>3</sup>/h) um ca. 60% höher war als die der beiden Luftreiniger zusammen (= 2 x 617 m<sup>3</sup>/h). Das Lüftungssystem erwies sich somit als weniger effizient. Das liegt daran, dass die Turnhalle mit 5,1 m recht hoch ist und sich die Ansaug- und Ausblasöffnungen in der Nähe der Decke befinden. Das bedeutet, dass ein Teil der angesaugten Luft nicht die Begehungsebene (max. 2 m Höhe) erreicht und somit nicht vollständig zur Belüftung an der Stelle genutzt wird, wo es am wichtigsten ist, nämlich dort, wo sich Menschen aufhalten. Die Luftreiniger hingegen werden in Geh-Höhe installiert und behandeln die Luft in dieser Höhe. Es ist nicht ungewöhnlich, dass Lüftungsanlagen auf diese Weise geplant und gebaut werden. Es ist gängige Praxis, die Ansaug- und Abluftöffnungen in Deckennähe zu positionieren, wobei die Lüftungskanäle in der Zwischendecke verborgen sind. Dies ist aus bautechnischer Sicht der bequemste und billigste Weg. Dies wirkt sich bei niedrigen Räumen wie Büros und Klassenzimmern nicht nachteilig auf die Lüftungseffizienz aus, wohl aber bei hohen Räumen wie Turn- und Sporthallen. Szenario 4 zeigte, dass vor allem die großen Partikel (mit einem Durchmesser zwischen 2,5 und 10 Mikrometer) absackten und durch "Ablagerung" aus der Luft entfernt wurden. Dies war bei den kleineren Partikeln kaum der Fall, die daher während dieses 30-minütigen Zeitraums in der Luft hängen blieben.

Während der 6 Szenarien wurden auch die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen stiegen logischerweise an, wenn Sport getrieben wurde, sie sanken, wenn kein Sport getrieben und gelüftet wurde, und sie blieben gleich, wenn kein Sport getrieben und gelüftet wurde. Die meisten Luftreiniger - wie der in dieser Studie verwendete - entfernen hauptsächlich Partikel aus der Luft und haben keinen Einfluss auf CO<sub>2</sub>. Daher ist es nicht empfehlenswert, nur Luftreinigung und keine Belüftung anzuwenden. Dies ist auch gesetzeswidrig - die Bauordnung fordert zu Recht ein Minimum an Lüftungsvolumenströme.

**In Abschnitt fünf** wird ein einfaches mathematisches Berechnungsmodell angewandt, das auf Differentialgleichungen basiert, die die Massenbilanz von CO<sub>2</sub> in der Turnhalle beschreiben. Die Lösung dieser Differentialgleichungen für die verschiedenen Szenarien gibt mehr Aufschluss über die ablaufenden physikalischen Prozesse. So kann sowohl die CO<sub>2</sub>-Produktion der Sportler als auch die Ventilationseffizienz in Geh-Höhe bestimmt werden. Die berechneten CO<sub>2</sub>-Produktionen liegen nahe an den Zahlen, die in früheren Studien für Personen gefunden wurden, die körperliche Aktivität ausüben. Der nach diesem mathematischen Modell berechnete Volumenstrom, mit dem das CO<sub>2</sub> auf Geh-Höhe abgeführt wird, beträgt 995 m<sup>3</sup>/h, was etwa der Hälfte des gesamten Lüftungsvolumenstroms von 1949 m<sup>3</sup>/h entspricht. Der Lüftungswirkungsgrad ist daher etwa 50 %. Dies ist - wie bereits angedeutet - auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich sowohl die Einlass- als auch die Auslassöffnung in der Nähe der Decke befinden. Die Abluftöffnungen befinden sich in der Nähe der Decke.

**In Abschnitt sechs** wird ein ähnlich einfaches mathematisches Berechnungsmodell für die Aerosolpartikelkonzentrationen. Die Aerosolpartikel, werden nach ihrem Durchmesser in fünf Gruppen eingeteilt: Gruppe 1 mit einem Durchmesser zwischen 10 und 2,5 Mikrometern, Gruppe 2 zwischen 2,5 und 1 Mikrometer, Gruppe 3 zwischen 1 und 0,5 Mikrometer, Gruppe 4 zwischen 0,5 und 0,25 Mikrometer und Gruppe 5 unter 0,25 Mikrometer. Für jedes Szenario wird eine Differentialgleichung konstruiert, und die Lösungen dieser fünf mal sechs Differentialgleichungen - aufgrund von sechs Szenarien - bilden ein System von dreißig Gleichungen, die die Bestimmung von dreißig Unbekannten ermöglicht. Diese liefert Zahlen, die zeigen, wie viele und wie schnell Partikel aus der Luft fallen und sich auf Oberflächen absetzen (Deposition), wie wichtig die Belüftung für die Entfernung von Aerosolpartikeln ist, idem für die Luftreinigung, und wie viele Partikel von den 35 Sportlern erzeugt wurden. Die Zahlen bezüglich der Partikelerzeugung stimmen gut mit früheren und kleineren Untersuchungen überein, bei denen die von einer Person erzeugten Partikel gemessen wurden.

Der Zweck des Aufbaus des mathematischen Berechnungsmodells besteht nicht nur darin, ein besseres Verständnis dafür zu bekommen, was genau in jedem der sechs Szenarien passiert, sondern auch darin, auf andere Szenarien extrapolieren zu können. Wie bereits erwähnt, gibt es eine Reihe interessanter Szenarien, die am Mess-Tag nicht abgedeckt wurden, insbesondere Szenarien, bei denen die Lüftung mit der Luftreinigung kombiniert wird. Das Modell erlaubt uns auch zu berechnen, was während eines ganzen Tages im Fitnessstudio passiert, nicht nur während 30 Minuten. Das Modell zeigt, dass die Kombination aus Lüftung und Luftreinigung es schafft, den Anstieg der Aerosolpartikel-Konzentration, der zwangsläufig mit dem Beginn des Trainings auftritt, relativ schnell und auf einen im Voraus festlegbaren Schwellenwert zu glätten. Je mehr Luftreiniger verwendet werden, desto schneller wird der Anstieg gestoppt und desto niedriger ist das endgültige Niveau, auf dem der Anstieg gestoppt wird, desto niedriger also die Endkonzentrationen. Die folgende Abbildung zeigt für die fünf Gruppen von Aerosolpartikeln die maximalen Konzentrationen, die in der Turnhalle mit den 35 trainierenden Personen noch auftreten können, für die beschriebenen verschiedenen Szenarien:

- Szenario 1: 35 Athleten mit Beatmung (dieses Szenario ist identisch mit dem oben genannten Szenario 1)
- Szenario 3': Anpassung des oben genannten Szenarios 3: 35 Athleten mit konstantem Aerosol
- Aerosole gleich dem von Szenario 1, keine Lüftung, keine Luftreinigung)
- Szenario 5': Anpassung des oben genannten Szenarios 5': 35 Sportler, nur 2 Luftreinigungsgeräte
- Szenario 7: 35 Trainingsgeräte, Lüftung und 2 Luftreinigungsgeräte
- Szenario 8: 35 Sportler, Lüftung und 4 Luftreinigungsgeräte
- Szenario 9: 35 Sportler, Lüftung und 6 Luftreinigungsgeräte

Die Abbildung hat eine logarithmische vertikale Achse, um alle Balken im Balkendiagramm übersichtlich darzustellen. Eine solche Abbildung ergibt typischerweise ein verzerrtes Bild, weshalb die gleiche Abbildung unten noch einmal gezeigt wird, allerdings mit einer linearen Achse. Letztere Abbildung zeigt deutlicher den Effekt der Belüftung, Luftreinigung und

insbesondere Lüftung und Luftreinigung. Die folgende Abbildung zeigt die prozentuale Reduzierung der Aerosolpartikelkonzentration, die durch Lüftung und/oder Luftreinigung erreicht wird. Lüften und Luftreinigung allein reduzieren die Konzentrationen um mehr als 60 % für große Partikel und um mehr als 80 % für kleine Partikel. Belüftung kombiniert mit Luftreinigung (2 Geräte) auf der anderen Seite reduziert die Konzentrationen um über 80 % für große Partikel und über 90 % für kleine Partikel. Durch den Einsatz mehrerer Luftreinigungsgeräte sind Reduzierungen von 90 bis 95 % möglich.

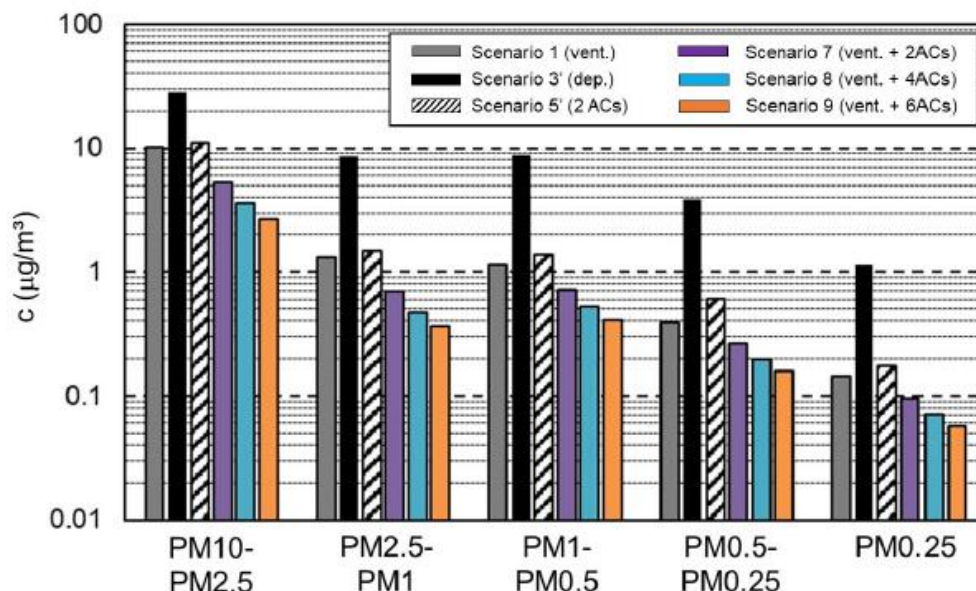


Abbildung: Berechnete Aerosolpartikelkonzentrationen in verschiedenen Szenarien für die Situation von 35 sporttreibenden Personen im Fitnessraum des Studentensportzentrums der TU Eindhoven - mit logarithmischer vertikaler Achse.

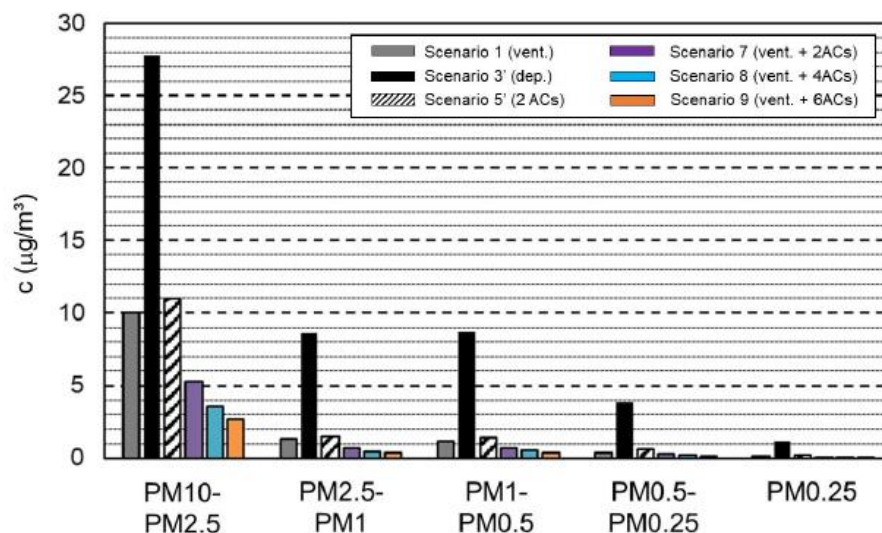


Abbildung: Berechnete Aerosolpartikelkonzentrationen in verschiedenen Szenarien für die Situation von 35 Sporttreibenden Personen im Fitnessraum des Studentensportzentrums der TU Eindhoven - mit linearer vertikaler Achse.



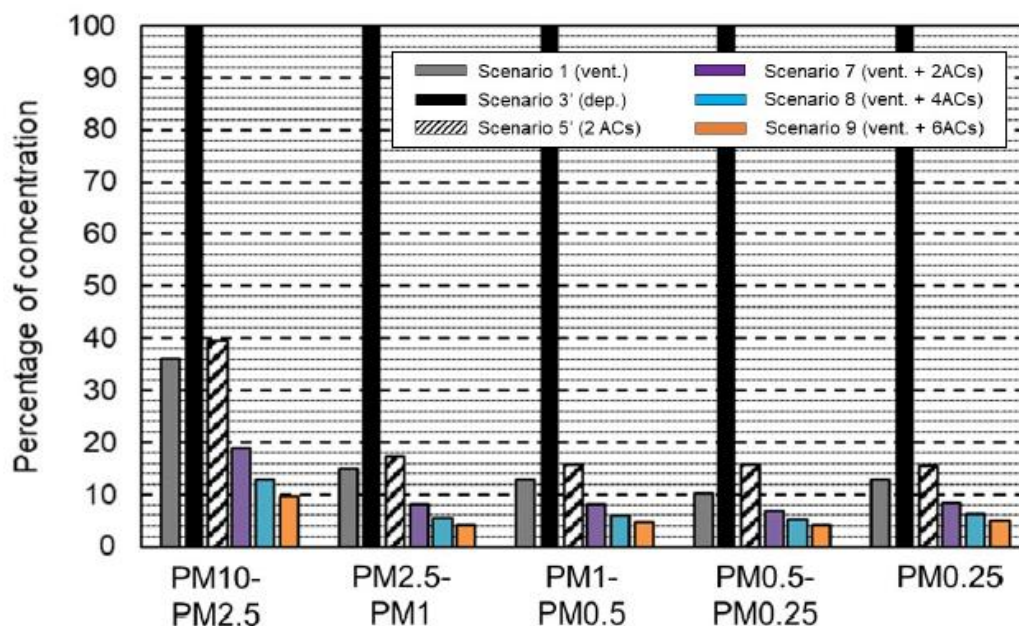


Abbildung: Berechnete Aerosolpartikelkonzentrationen in verschiedenen Szenarien für die Situation von 35 sporttreibenden Personen im Fitnessraum des Studentensportzentrums der TU Eindhoven - proportional ausgedrückt.

In **Abschnitt sieben** wird diese Forschung einer breiteren Betrachtungen unterzogen. Es handelt sich um eine einzigartige Forschungsarbeit, und das ist auch der Grund, warum sie in einer internationalen, von Experten geschätzte Zeitschrift „Tier 1“ veröffentlicht wird. Die Zeitschrift "Building & Environment" ist laut "Clarivate Analytics" die an 4. Stelle gerankte Zeitschrift unter den 134 prominentesten peer-reviewed Journals im Fachbereich "Civil Engineering". Wie jede Forschung unterliegt jedoch auch diese Forschung Beschränkungen. Eine wichtige Einschränkung ist, dass es sich bei den gemessenen Aerosolpartikeln nicht nur um Speichel-Tröpfchen handelt, die bei der COVID-19-Pandemie Aufmerksamkeit verdienen, sondern auch um Aerosolpartikel, die von der Haut, den Haaren, der Kleidung von Personen und von Fitnessgeräten stammen. Dennoch gelten auch diese Aerosolpartikel als gesundheitsschädlich und können und sollten durch Lüften und Luftreinigung entfernt werden. Dies ist sowohl eine Einschränkung als auch ein zusätzlicher Vorteil dieser Forschung: Die Luftreinigung zusammen mit der Belüftung wird auch zu einer gesünderen Sportumgebung ohne virusübertragende Speichelaerosole beitragen. Einige andere Einschränkungen werden auch in Abschnitt sieben näher erläutert.

**Abschnitt acht** beinhaltet die Schlussfolgerungen. Die wichtigste Schlussfolgerung dieser Untersuchung und auch der wichtigste Ratschlag für Praktiker ist, dass Turnhallen und andere Indoor-Sportbereiche nicht in teure Nachrüstungen ihrer mechanischen Lüftungssysteme investieren müssen, vorausgesetzt, die Lüftung entspricht bereits den Bauvorschriften. Stattdessen können sie die vorhandene Lüftungsanlage mit **mobilen professionellen Luftreinigungsgeräten ergänzen**. Wichtig ist dabei, dass diese Geräte sorgfältig ausgewählt werden, dass sie im Verhältnis zum Raum, in dem sie eingesetzt

werden, eine ausreichende Kapazität haben, dass sie einen ausreichend hohen Wirkungsgrad haben und dass sie keine schädlichen Nebenprodukte erzeugen. Die Auswahl, Installation und Wartung von Luftreinigungsgeräten ist **eine Aufgabe für Spezialisten**, genauso wie bei mechanischen Lüftungssystemen. Diese Ergänzung bestehender Lüftungsanlagen durch energieeffiziente Luftreinigungssysteme ist auch die energieeffizienteste Lösung. Da die Lüftungsluft von außen kommt, muss sie oft erwärmt, gekühlt, befeuchtet oder entfeuchtet werden, was viel Energie erfordert. Bei der von Luftreinigungssystemen behandelten Luft handelt es sich hingegen um Raumluft, die bereits annähernd die richtige Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit aufweist. Im Anhang, nach dem Wortlaut des Gesetzes.

### Liste der an der Studie beteiligten Personen und wissenschaftlichen Organisationen

*Accepted for publication in Building & Environment (Elsevier), on 1 February 2021*

## **Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic**

B. Blocken<sup>1,2</sup>, T. van Druenen<sup>1</sup>, A. Ricci<sup>1,2,3</sup>, L. Kang<sup>1</sup>, T. van Hooff<sup>1</sup>, P. Qin<sup>1</sup>, L. Xia<sup>1</sup>, C. Alanis Ruiz<sup>2</sup>, J.H. Arts<sup>4,5</sup>, J.F.L. Diepens<sup>1</sup>, G.A. Maas<sup>1</sup>, S.G. Gillmeier<sup>1</sup>, S.B. Vos<sup>4,5</sup>, A.C. Brombacher<sup>4</sup>

*Corresponding author: b.j.e.blocken@tue.nl*

<sup>1</sup> *Unit Building Physics and Services, Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology, P.O. box 513, 5600 MB Eindhoven, the Netherlands*

<sup>2</sup> *Building Physics and Sustainable Design, Department of Civil Engineering, KU Leuven, Kasteelpark Arenberg 40 - bus 2447, 3001 Leuven, Belgium*

<sup>3</sup> *Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering, University of Genoa, Genoa, Italy*

<sup>4</sup> *Department of Industrial Design, Eindhoven University of Technology, P.O. box 513, 5600 MB Eindhoven, the Netherlands*

<sup>5</sup> *School of Sport Studies, Fontys University of Applied Sciences, Theo Koomenlaan 3, 5644 HZ Eindhoven, the Netherlands*

## **Der PlasmaMade Aircleaner wurde - unterstützt von einer Gruppe von 19 unabhängiger Organisationen- ausgiebig in der täglichen Praxis getestet.**

Für den Zeitraum Juli 2020 bis Januar 2021 hat eine Vielzahl internationaler Organisationen beschlossen, gemeinsam groß angelegte, unabhängige wissenschaftliche Untersuchungen über Aerosole und die Nützlichkeit der Verwendung von Luftreinigungsgeräten durchzuführen. Für diese Studien haben sie bewusst nur den **PlasmaMade Aircleaner** verwendet, weil dieses Gerät über die innovativste Technologie verfügt und somit schon theoretisch die besten Ergebnisse erwarten ließ. Die Untersuchungen fanden in einer Turnhalle der TU-Eindhoven, Sporthallen, dem Fußballstadion von Ajax Amsterdam, einer Eishockeyhalle und einem Konzertsaal statt.

Während einer wissenschaftlichen Untersuchung in der Sporthalle der Technischen Universität Eindhoven, in der während der Messungen 35 Personen trainierten, wurde die Wirksamkeit dieses Gerätes in einer alltäglichen Situation – einer einzigartigen Simulation von Realität- nachgewiesen. Ein Sportler produziert etwa 18-mal mehr Aerosole als üblich im Ruhezustand. Die wissenschaftlichen Untersuchungen ergaben, dass trotz der daraus resultierenden besonders hohen Konzentration von Aerosolen die Luft im Fitnessstudio (13,35 x 13,12 Meter) in kürzester Zeit von Aerosolen befreit war. Ermöglicht wurde dies durch den Einsatz von nur zwei PlasmaMade Aircleanern.

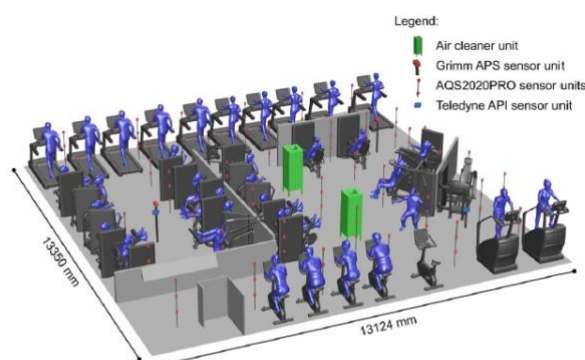


Figure 4. Measurement set-up in gym.

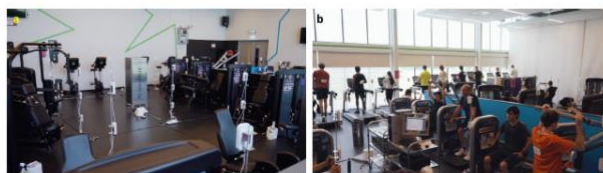


Figure 5. Photo of (a) measurement set-up and (b) ongoing session with 35 test subjects





All dies wurde durch die Zusammenarbeit von 19 verschiedenen internationalen Organisationen, Universitäten, Unternehmen, Gemeinde und der niederländischen Regierung ermöglicht. Die Ergebnisse sind so gut, dass u.a. die Organisatoren der

**Olympischen Spiele Tokio 2021** sehr an der PlasmaMade Luftreinigungstechnologie interessiert sind.

**Die folgenden 19 Organisationen haben diese wissenschaftlichen Studien unterstützt**

	<p>Die Technische Universität Eindhoven (TU/e) ist eine Niederländische Forschungsuniversität, die sich auf Ingenieurwissenschaften und Technologie spezialisiert hat.</p>
	<p>Die Johannes Kepler Universität in Linz (JKU) ist eine Österreichische Forschungsuniversität mit Ingenieurwesen als bedeutendem Fachgebiet.</p>
	<p>Die KU Leuven ist eine belgische Universität mit internationalem Ruf. Wissenschaftler finden an der KU Leuven Raum für Tiefe und Kreativität. Dank ihrer exzellenten Forschung gehört die Universität zu den Top-Universitäten in Europa.</p>
	<p>Das Leiden University Medical Center ist das Universitätsklinikum, das aus einer Partnerschaft zwischen dem Akademischen Krankenhaus Leiden (Niederlanden) und der Medizinischen Fakultät der Universität Leiden besteht.</p>
	<p>Die Universität von Genua (Italiaans: <i>Università degli Studi di Genova</i>) ist eine der ältesten Universitäten in Italien. Die Universität befindet sich in Genua in Ligurien und hat etwa 40.000 Studenten sowie einen 1800-köpfigen Lehr- und Forschungsstab.</p>
	<p>Die Universität Utrecht ist eine niederländische Universität mit Sitz in der Stadt Utrecht und kooperiert intensiv mit dem University Medical Center.</p>
	<p><b>Dekra</b> ist eine 1925 gegründete deutsche Prüfgesellschaft. Mit mehr als 45.000 Mitarbeitern und einem Umsatz von rund 3,3 Milliarden Euro ist Dekra in Deutschland die größte und weltweit eine der führenden Prüfgesellschaften und Marktführer in Europa.</p>

	<p>Der niederländische Sektor Life Sciences &amp; Health (LSH) ist einer von neun "Top-Sektoren" in den Niederlanden. Die Top-Sektoren werden vom niederländischen Ministerium für Wirtschaft und Klimapolitik benannt und nach ihrer Fähigkeit ausgewählt, einen wesentlichen Beitrag zu globalen gesellschaftlichen Herausforderungen zu leisten. Health~Holland ist der Kommunikationskanal des Top-Sektors LSH.</p>
	<p>Sportinnovator ist eine Initiative des niederländischen Ministeriums für Gesundheit, Wohlfahrt und Sport. In dieser Organisation arbeiten prominente Vertreter aus Sport, Wirtschaft, Kommunen und Wissenschaft zusammen, um Innovationen für den Spitzen- und Breitensport zu entwickeln und umzusetzen.</p>
	<p>Niederländischer Staat</p>
	<p>Das Niederländische Olympische Komitee*<b>Niederländischer Sportverband</b>, allgemein abgekürzt <b>NOC*NSF</b>, ist die koordinierende niederländische Gesamtorganisation des Sports, die auch als Nationales Olympisches Komitee und Nationales Paralympisches Komitee der Niederlande fungiert.</p>
	<p>NL Actief ist der Branchenverband der anerkannten und unternehmerischen Sport- und Bewegungsunternehmen in den Niederlanden. Über 1000 Standorte mit mehr als 3 Millionen angeschlossenen Fitnesskonsumenten.</p>
	<p>Go2Sure BV ist ein Software-Unternehmen das spezialisiert ist auf Risikowissenschaft und Risikomanagement</p>
	<p>Isala ist eine Krankenhausorganisation mit fünf Standorten in Zwolle, Meppel, Steenwijk, Kampen und Heerde .</p>
	<p>Ansys wurde 1970 gegründet und beschäftigt mehr als 4.400 Mitarbeiter, darunter viele erfahrene Ingenieure mit Master- und Dokortitel im Bereich Finite-Elemente-Analyse, Computational Fluid Dynamics, Elektronik, Halbleiter, Embedded Software und Design-Optimierung.</p>

 <p>Avicenna Alliance Association for Predictive Medicine</p>	<p>Die Avicenna Alliance ist ein Zusammenschluss von Industrie und renommierten akademischen Organisationen, die ein kommerzielles oder Forschungsinteresse an der Entwicklung haben. Die Vereinigung überbrückt die Kluft zwischen der wissenschaftlichen Gemeinschaft, der Industrie und den politischen Entscheidungsträgern, indem sie sich für politische Veränderungen einsetzt, die wissenschaftliche und Marktentwicklungen berücksichtigen.</p>
 <p>Poly-Ned Textielarchitectuur</p>	<p>Poly-Ned ist ein Unternehmen, das Lufthallen oder Blashallen herstellt. Sie bietet (temporäre) Lösungen für viele Tätigkeiten, die im Freien nicht möglich sind.</p>
 <p>GCD Brabant-Zuidoost</p>	<p>Der kommunale Gesundheitsdienst der Region Nordbrabant-Südost (Niederlande)</p>
 <p>EINDHOVEN</p>	<p>Eindhoven ist eine Stadt und Gemeinde im Süden der Niederlande, und im Südosten der Provinz Nordbrabant.</p>