

# VIRUKAB - UNTERSUCHUNG VON KABINEN-LUFTREINIGUNG

V. Norrefeldt, M. Buschhaus, A. Nagele-Renzl, S. Johann, M. Pschirer, M. Kienberger  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Fraunhoferstr. 10, D-83626 Valley

## Zusammenfassung

Im ViruKab Vorhaben werden Technologien der Raumlufthereinigung in der Flugzeugkabine untersucht. Hierzu wird die lokale Aerosolverteilung, ausgehend von einer Primärquelle, in der Kabine gemessen, sowie die Raumlufte bzgl. des Gehalts eines SARS-CoV-2 Virussurrogat beprobt. Die Messungen finden im Kabinendemonstrator „Flight Test Facility“ am Fraunhofer IBP statt, eines vormals in Betrieb befindlichen Kabinensegments, das nun für Forschungsfragestellungen genutzt wird. Als Reinigungstechnologien wurden ein HEPA, ein Plasma- und ein UV-C-Reiniger vergleichend untersucht und die Partikelverteilung in der Kabine gemessen.

## 1. EINLEITUNG

Aus raumklimatischer Sicht unterscheidet sich die Flugzeugkabine von einem gewöhnlichen Innenraum durch die niedrigere Raumlufteuchte und den niedrigeren Luftdruck (ca. 750 hPa), die hohe Personendichte und die teilweise lange Verweilzeit. [Arundel et al. 1986] führten eine Review-Studie zum Einfluss der Raumlufteuchte auf die Gesundheit von Raumnutzern durch und zeigten bei kabinentypischen relativen Feuchten um 10 % eine erhöhte Gesundheitsgefährdung durch Viren und Bakterien. Untersuchungen und Beschreibungen der Querinfektion in der Flugzeugkabine wurden bereits vor dem Ausbruch der SARS-CoV-2 Pandemie angestoßen. In [Gupta et al., 2011] wird die Tröpfchen-Ausbreitung in einem twin-aisle (2 Gänge) Flugzeug-Kabinenausschnitt mittels CFD (Computational Fluid Dynamics) simuliert. Hierbei wird betrachtet, dass ein mit Influenza infizierter Passagier einmalig atmet, hustet bzw. spricht und wie sich dessen Aerosoltröpfchen in der Kabine ausbreiten. [Yan et al., 2017] hat einen ähnlichen Ansatz für eine single-aisle Kabine genutzt. In [Gupta et al., 2012] wird die Reduktion des Ansteckungsrisikos durch das Tragen einer Maske gezeigt. In einer Literaturstudie fanden [Stover und Weiss, 2016], dass das Risiko einer Querinfektion in den zwei Reihen vor und hinter einem infizierten Passagier bei 6 % liegt. Außerhalb dieses Bereiches beträgt das Risiko noch 2 %. Als Gründe werden Crew-Bewegungen, sowie Kontakte beim De-/Boarding und am Gate diskutiert. Als eine der ersten dokumentierten Querinfektionen mit SARS-CoV-2 legen [Edlin et. al, 2020] dar, dass eine wahrscheinliche Querinfektion eines Passagiers am 24.2.2020 in einem Air France Flug stattgefunden hat und dokumentieren so die prinzipielle Möglichkeit der Querinfektion im Flugzeug.

Im Zuge der SARS-CoV-2 Pandemie wurden Geräte zur Eliminierung bzw. Inaktivierung von infektiösem Material in der Raumlufte entwickelt. Die dabei genutzten Prinzipien sind generell mechanische Filterung oder Inaktivierung bzw. Zerstörung des Virus durch Ionen, Plasma oder UV-C Strahlung. Für Geräte werden häufig Labordaten zur reinen Technologie-Wirksamkeit auf SARS-CoV-2 oder Surrogat-Viren bereitgestellt, allerdings ist ein Nachweis der Funktion in einer vollskaligen Kabinenumgebung und unter Flugbedingungen noch nicht erbracht.

Die Flugzeugkabine wird standardmäßig mit einer Mischung aus Frischluft und gefilterter Umlufte (HEPA) belüftet. HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Air Filter) haben einen Abscheidegrad von > 99,995 % für Partikel mit 0,1 bis 0,3  $\mu\text{m}$  Durchmesser. Gemäß den bekannten Filtereffekten sind Partikel um 0,1 bis 0,3  $\mu\text{m}$  am schwersten abzuscheiden (MPPS = most penetrating particle size). Größere und kleinere Partikel werden aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften besser abgeschieden. Viren und Viren-Aerosole haben einen erwartbaren Partikeldurchmesser ab etwa 0,1  $\mu\text{m}$  und zählen somit zu diesen MPPS. Mit der Nutzung von HEPA Filtern geht aber ein Druckverlust im Strömungskanal einher, weshalb die ViruKab Untersuchungen inaktivierende Reinigungstechnologien als Alternative zum etablierten HEPA Filter im Flugzeug fokussieren.

## 2. METHODE

Die Versuche finden im Fluglabor des Fraunhofer IBP in Holzkirchen statt. Der Teststand besteht aus einer Niederdruckröhre (Bild 1) mit einem vormals in Betrieb befindlichen, vorderen Segment eines Langstreckenflugzeugs (Bild 2). Dieses ist mit einem Frisch- und Umlufteystem mit originalen Luftfahrt-HEPA ausgestattet. In dieser Testeinrichtung können Luftdrücke und Raumlufteklimate (Temperatur, Feuchte, Außen- bzw. Hüllentemperatur) ähnlich einem realen Flug eingestellt werden.



**Bild 1: Niederdruckröhre des Fraunhofer Fluglabors.**



**Bild 2: Blick in die Flugzeugkabine im Fraunhofer Fluglabor.**

Zur Nachbildung von Passagieren werden beheizte Dummies in der Kabine platziert. Ein atmender Kopf (Sheffield-Kopf) auf Sitz 4G (Bild 3), aerosoliert Virenpartikel und simuliert dadurch einen infektiösen Passagier. Hierzu ist eine Atemmaschine im Gepäckfach (20 Atemzüge/min, 2 l/Atemzug) mit dem Kopf und mit einem Aerosolvernebler (AGK 2000, Palas GmbH) verbunden. Als Virenaerosol wird eine Phi6-Phagensuspension genutzt. Die darin enthaltenen Phagen sind nicht humanpathogen, sowie in Umwelteigenschaften ähnlich dem SARS-CoV-2 Viren und können somit als Surrogat benutzt werden. Die Aerosolkonzentrationen werden mit Streulicht Aerosolspektrometern (Fidas-Frog, Palas GmbH) mit einem Messbereich von 0,18 - 20 µm bestimmt.

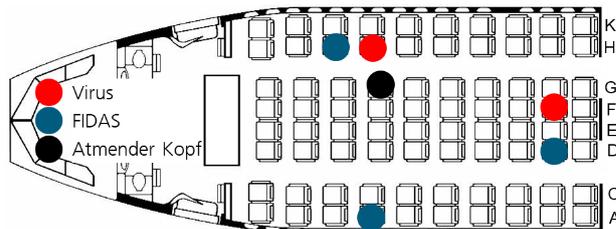


**Bild 3: Sheffield Kopf auf Sitz 4G mit Atemmaschine im Gepäckfach und Partikelmessgerät auf dem Trolley.**

In einem Vorversuch wurde die Partikelmessgeräte auf den Flugzeugtrolley platziert und nach jeweils 5 min die Messposition gewechselt. Diese Messung wird für eine voll besetzte Kabine durchgeführt, was im Versuchsaufbau einer Belegung von 80 Personen entspricht. Die Kabine wird mit 9,4 l/s pro Passagier [ASHRAE 161] belüftet (insgesamt 2700 m<sup>3</sup>/h), wobei 50 % davon Frischluft und 50 % HEPA-gefilterte Umluft sind. So kann ein detailliertes Bild der Partikelverteilung in der Kabine erstellt werden.

Für die Hauptuntersuchung werden skalierte, auf 25 Passagiere ausgelegte Demonstratoren eines Plasma- und eines photokatalytischen (UV-C) Reingers genutzt. Dementsprechend werden die Luftmengen in der Kabine

auf 846 m<sup>3</sup>/h reduziert, wobei das Mischverhältnis aus 50% Frischluft und 50% Umluft beibehalten wird. Für diese Messungen werden Partikelmessgeräte stationär auf den Plätzen 3H, 4A und 9D belassen (Bild 4).



**Bild 4: Kabinenplan der stationären Messtechnik.**

Für die Beprobung der Raumluft auf Surrogat-Viren werden 1 m<sup>3</sup> Luft mit einer Rate von 50 l/min (somit einem Zeitintervall von 20 min Probenahme) mit zwei Luftkeimsammlern (MBASS30V3, Holbach Umweltanalytik GmbH) an den Sitzen 4H und 9F mittels Gelatinefilter abgeschlossen (Bild 4 und Bild 5). Die Anzahl gesammelter aktiver Viren der Probe („Virulenz“), wird im Labor mittels Plaque-Assay-Test in Anlehnung an [DIN EN 13610:2002-10] bestimmt (Bild 6).



**Bild 5: Luftkeimsammler (MBASS30V3, Holbach Umweltanalytik GmbH) mit Gelatinefilter.**



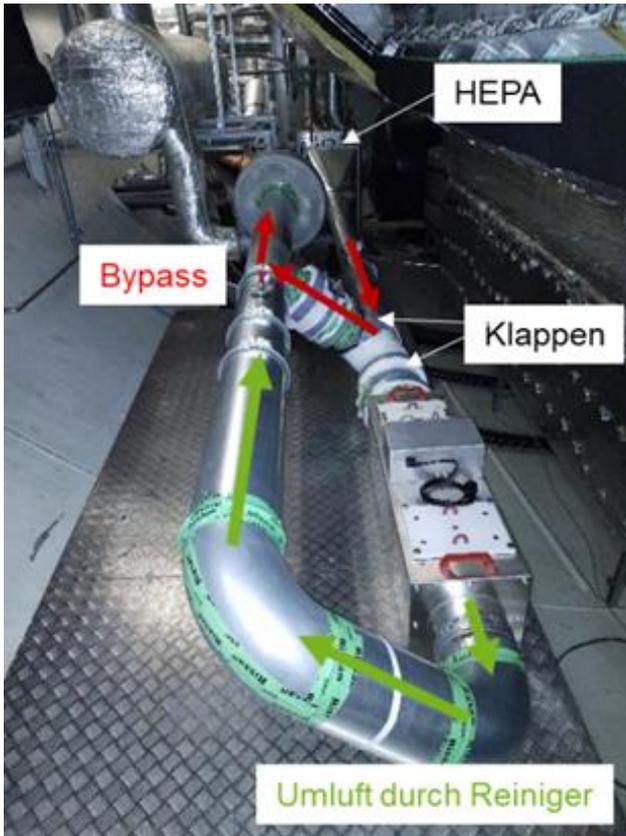
**Bild 6: Plaque-Assay-Test, Plaques auf Agar.**

Der Zielkabinendruck ist 750 hPa entsprechend dem regulatorischen Limit für den Luftdruck in der bedruckten Kabine im Flug. Der Testablauf ist in Tabelle 1 dargestellt. Es werden drei alternative Reinigungstechnologien in der

Umluft untersucht (Phase 2) und mit der HEPA-Filterung (Phase 1) verglichen:

- kein Filter,
- Kaltplasma-basierter Reiniger,
- Photokatalyse (UV-C) basierter Reiniger.

In Phase 1 strömt die Umluft durch einen HEPA-Filter, bevor sie mit Frischluft vermischt wird. Eine Bypassklappe wird so eingestellt, dass die Luft während dieser Phase nicht durch den Raumlufreiniger strömt. Zu Beginn von Phase 2 wird der HEPA-Filter im Filterkasten ausgebaut und die Bypassklappe geschlossen, sodass die Luft über den Raumlufreiniger geleitet wird (Bild 7).



**Bild 7:** Einbau des Reinigers im Umluftpfad mit Bypass-Pfad

**Tabelle 1: Testablauf**

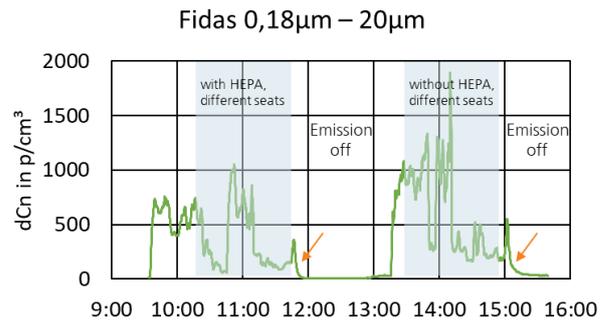
Phase	Minute	Testeinstellung	Umluftreinigung
Vorbereitung	0-30 min	Start Lüftung, Dummies	HEPA in Umluft
Steigflug	30-60 min	Reduktion Kabinendruck auf 750 hPa	HEPA in Umluft
Test-phase 1	60-150 min	Atmender Kopf eingeschaltet Probennahme 120 bis 150 min	HEPA in Umluft
Test-phase 2	150-240 min	Atmender Kopf eingeschaltet Probennahme 210 bis 240 min	Ausbau HEPA, Zuschalten alternative Reinigungstechnologie
Landung	240-270 min	Erhöhung auf Bodendruck, Atmender Kopf aus	n/a

### 3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

#### 3.1. Partikeluntersuchungen in der voll besetzten Kabine (Vorversuch)

##### 3.1.1. Detaillierte Partikelverteilung in der voll besetzten Kabine

Die detaillierte Partikelverteilung wird bei Umgebungsdruck (ca. 940 hPa) sequenziell ermittelt. Hierfür wird jeweils die Partikelkonzentration im 5 Minuten Takt an verschiedenen Positionen gemessen, um eine Verteilung im Raum aufzuzeigen. Die Feinausrichtung der Messstelle, ausgehend vom Gang zu einem bestimmten Sitz, erfolgt mit einem Ansaugschlauch. Zunächst wird die Messung mit eingebautem HEPA durchgeführt, um somit eine Partikelabscheidung im Umluftpfad zu demonstrieren. Anschließend wird der atmende Kopf (Aerosolquelle) abgeschaltet. Lediglich die Partikelmessung auf Platz 5H wird weitergeführt. Hierdurch kann eine Abklingkurve der Partikelkonzentration ermittelt werden. Anschließend wird der HEPA Filter aus dem Umluftpfad entfernt, sodass der gleiche Durchlauf der Messstellen ohne Filterung durchgeführt werden kann. Auch hier wird am Ende des Versuchs der atmende Kopf als Partikelquelle abgeschaltet, um die Abklingkurve der Partikel zu bestimmen. Der Verlauf der Partikelmessung ist in Bild 8 dargestellt.

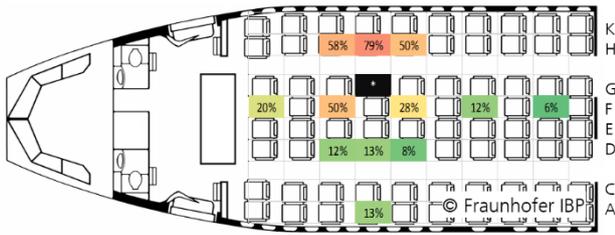


**Bild 8:** Partikelmessung im Versuch, orange Pfeile markieren die gemessenen Abklingkurven auf Platz 5H.

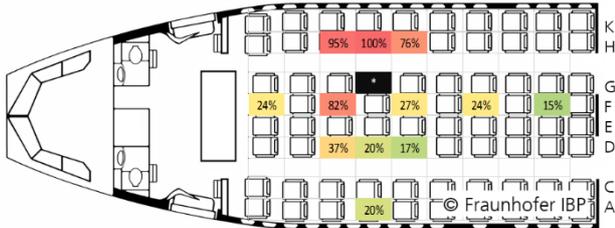
Bild 9 und Bild 10 zeigen die relative Verteilung der Partikel in der Flugzeugkabine mit bzw. ohne HEPA-Filter. Dabei werden die gemessenen Partikelkonzentrationen für den jeweiligen 5-Minuten Slot gemittelt. Die höchste gemessene Konzentration tritt mit 1106 p/cm<sup>3</sup> an Platz 4H ohne HEPA Filter auf. Dieser Wert ist auf 100% normiert.

Es zeigt sich, dass im Nahbereich des atmenden Kopfes deutlich höhere Partikelzahlen auftreten als weiter entfernt. Auch profitiert dieser Bereich weniger deutlich von der HEPA-Filterung, d.h. auch mit HEPA Filter treten vergleichsweise hohe Partikelkonzentrationen auf. Die Partikelkonzentration sinkt zur linken Kabinenhälfte (Plätze A bis D) und weiter hinten liegenden Reihen (7 bis 9) ab. Insbesondere in diesen weiter entfernten Positionen zeigt sich eine Zunahme der Partikelzahl beim Entfernen des HEPA-Filters. Somit lassen sich zwei Einflussbereiche feststellen. Der Nahbereich ist hauptsächlich durch die Primärquelle der Partikel beeinflusst, während in weiter

entfernten Bereichen eine Umluftreinigung in der Lage ist, die durch die Luftumwälzung verteilten Partikel zu reduzieren.



**Bild 9: Relative Partikelverteilung mit HEPA-Filter im Umluftpfad.**



**Bild 10: Relative Partikelverteilung ohne HEPA-Filter im Umluftpfad.**

### 3.1.2. Abklingverhalten der Partikel und Luftwechselzahl

Das Abklingverhalten der Partikel wird für die zwei Zeiträume mit ausgeschalteter Partikelquelle bestimmt (11:47 h - 12:01 h bzw. 15:02 h - 15:14 h in Bild 8). Für die Bestimmung der Abklingkurve wird von einem exponentiellen Abfall mit der Zeitkonstante  $n$  ausgegangen. Diese Zeitkonstante entspricht der auf die Partikelreduktion bezogene Luftwechselrate. Für deren Berechnung wird zunächst der Logarithmus des Quotienten aus Konzentrationsverlauf  $c(t)$  und Anfangskonzentration  $c_0$  berechnet. Auf der x-Achse wird die Zeit in Stunden umgerechnet (siehe Formel (1)).

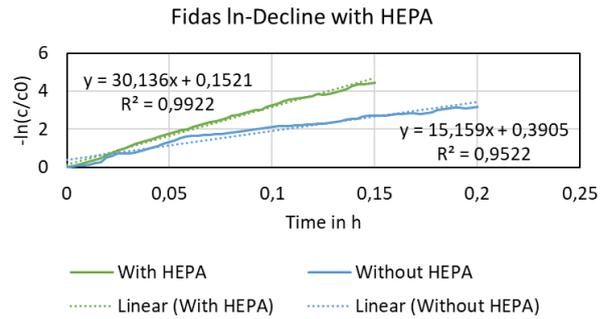
$$c = c_0 \cdot e^{-n \cdot t}$$

$$n \cdot t = -\ln\left(\frac{c(t)}{c_0}\right) \quad (1)$$

Anschließend wird eine lineare Annäherung des logarithmischen Abklingens über der Zeit durchgeführt. Die Steigung dieser linearen Annäherung entspricht hierbei der Luftwechselrate  $n$  (Bild 11).

Bezogen auf die Partikelzahl ergibt sich somit unter Nutzung des HEPA-Filters eine Luftwechselrate  $n = 30,1$  pro Stunde und ohne HEPA-Filter  $n = 15,1$  pro Stunde. Die Zuluft in die Kabine hat einen Umluftanteil von 50%. Mit einem HEPA-Filter in der Umluft werden Partikel nahezu vollständig entfernt und somit ist die Luftqualität der Frisch- und Umluft bzgl. der Partikelkonzentration gleich. Somit dienen 100 % der Zuluftmenge dem Verdünnen der Partikelkonzentration in der Kabine. Nach dem Entfernen des HEPA-Filters werden Partikel über die Umluft der Frischluft beigemischt und gelangen somit wieder als Zuluft in die Kabine zurück. Somit steht nun nur noch die

Frischlufthmenge zum Verdünnen der Partikelkonzentration in der Kabine zur Verfügung. Diese ist 50 % der Zuluftmenge, wodurch auch die auf die Partikel bezogene Luftwechselzahl um den Faktor zwei absinkt.



**Bild 11: Logarithmische Abklingkurve der Partikelkonzentration auf Platz 5H in der Kabine mit linearer Annäherung.**

Die Kabine hat ein rechnerisches Leervolumen von ca. 107 m<sup>3</sup>, wobei Interieurs wie Sitze und die Dummies von diesem Volumen abgezogen werden müssen. Berechnet man das Luftvolumen aus Zuluftmenge und Luftwechselzahl, ergibt sich ein Kabinen-Luftvolumen von 90 m<sup>3</sup> (Formel (2)). Somit halten die berechneten Luftwechsel einer Verifikation im Bereich von 10 % stand.

$$\dot{V} = n \cdot V \quad (2)$$

### 3.1.3. Log-1 Abklingdauer der Partikel

Eine häufig herangezogene Bewertungsgröße für Raumlufreinigung ist die log-1 Abklingzeit, d.h. die Zeit, nach der eine ursprüngliche Raumlufbelastung auf 10 % des Ausgangswerts abgeklungen ist. [VDI-EE 4300 Blatt 14, 2021] verlangt diese Reduktion nach 30 Minuten. Aus der auf Partikel bezogenen Luftwechselrate lässt sich diese Abklingzeit bestimmen (Formel (3)).

$$t_{10\%} = \frac{-\ln(0.1)}{n} \quad (3)$$

Es ergibt sich eine Dauer von 4,6 Minuten mit HEPA Filter und 9,1 Minuten ohne HEPA Filter. Für die Praxis bedeutet dies, dass Partikelrückstände der Passagiere nach dem Deboarding, sofern die Kabinenlüftung am Boden weiter betrieben wird, innerhalb von 9 Minuten auf 10 % reduziert wurden. Nach dieser Standzeit ist also mit einer deutlich geringeren Raumlufbelastung in der Kabine und einer geringeren potenziellen Gefährdung der neuen durch die vorhergehenden Passagiere auszugehen.

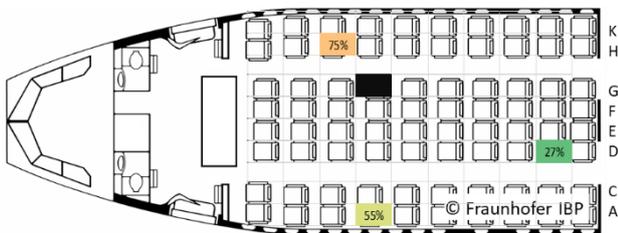
## 3.2. Partikelverteilung bei reduzierter Luftmenge und Kabinendruck (Hauptuntersuchung)

Die Reiniger-Demonstratoren sind auf 25 Passagiere skaliert. Daher wird die Luftmenge in der Kabine auf

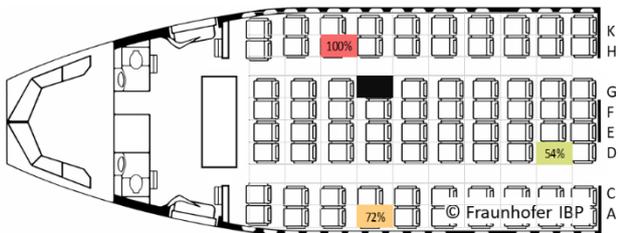
846 m<sup>3</sup>/h reduziert, wobei das 1:1 Verhältnis von Frisch- und Umluft beibehalten wird. Zudem wird der Kabinendruck mit 750 hPa (8.000 ft) auf typische Reiseflug-Bedingungen eingestellt.

### 3.2.1. Einfluss der HEPA-Filterung auf die Partikelkonzentration

Bild 12 und Bild 13 zeigen die relative Partikelverteilung mit bzw. ohne HEPA Filter. 100 % entsprechen dabei der zeitlich gemittelten, maximalen Konzentration von 2183 p/cm<sup>3</sup>. Eine Abnahme der Partikelzahl mit von der primären Aerosolquelle ist zwar nach wie vor erkennbar, allerdings ist diese weniger stark ausgeprägt als bei der höheren Luftmenge. Es ist anzunehmen, dass sich durch die geringere Luftmenge der Anteil der Luftbewegung durch Querströmungen in der Kabine erhöht, wodurch sich der Gradient der Partikelkonzentration abflacht. Der Effekt des HEPA-Filters ist allerdings auch bei reduzierter Luftmenge erkennbar. Insbesondere in Reihe 9 verdoppelt sich die Partikelzahl mit dem Entfernen des Filters aus dem Umluftpfad, im Verhältnis zur HEPA-Filtration.



**Bild 12: Relative Verteilung der Partikelzahlen bei reduzierter Luftmenge, Niederdruck und einem HEPA Filter, 10.05.2023.**



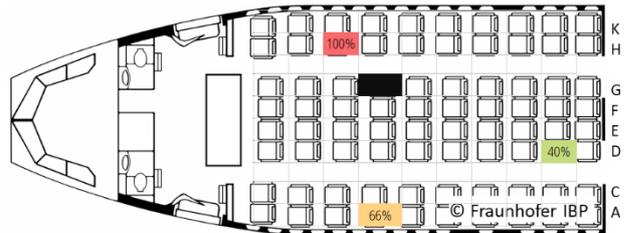
**Bild 13: Relative Verteilung der Partikelzahlen bei reduzierter Luftmenge und Niederdruck, ohne HEPA-Filter, 10.05.2023.**

### 3.2.2. Einfluss eines Plasma-Reinigers auf die Partikelkonzentration

Bild 14 und Bild 15 zeigen die relative Partikelverteilung mit HEPA Filter bzw. nach dem Entfernen des Filters und der Aktivierung des Plasma-Reinigers. 100 % entsprechen dabei der zeitlich gemittelten, maximalen Konzentration von 2591 p/cm<sup>3</sup>. Beim Durchströmen des Plasma-Reinigers zeigt sich eine ähnliche Partikelverteilung wie im Versuch ohne HEPA-Filter. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Plasma-Reiniger nicht in der Lage ist, merklich Partikel abzufangen. Die Eignung zur Inaktivierung von Viren wird in Kap. 3.3 betrachtet.



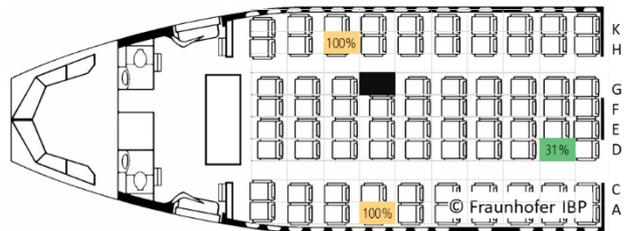
**Bild 14: Relative Verteilung der Partikelkonzentration bei reduzierter Luftmenge, Niederdruck und einem HEPA-Filter, 13.07.2022.**



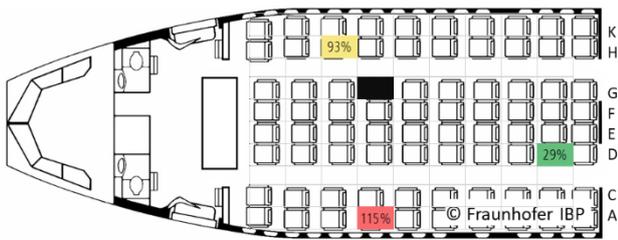
**Bild 15: Relative Verteilung der Partikelkonzentration bei reduzierter Luftmenge, Niederdruck und einem Plasma-Reiniger, 13.07.2022.**

### 3.2.3. Einfluss eines photokatalytischen (UV-C) Reinigers auf die Partikelkonzentration

Bild 16 und Bild 17 zeigen die relative Partikelverteilung mit HEPA Filter bzw. nach dem Entfernen des Filters und der Aktivierung des photokatalytischen (UV-C) Reinigers. 100 % entsprechen dabei der zeitlich gemittelten, maximalen Konzentration von 1512 p/cm<sup>3</sup>. Beim Durchströmen des photokatalytischen (UV-C) Reinigers zeigt sich eine ähnliche Partikelverteilung wie zuvor mit dem HEPA-Filter. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Reiniger Partikel in ähnlichem Maße reduziert. Die Eignung zur Inaktivierung von Viren wird in Kap. 3.3 betrachtet. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Versuchen scheint sich eine ausgeprägtere Strömung vom atmenden Kopf zur linken Kabinenseite gebildet zu haben.



**Bild 16: Relative Verteilung der Partikelkonzentration bei reduzierter Luftmenge, Niederdruck und einem HEPA-Filter, 12.10.2022.**

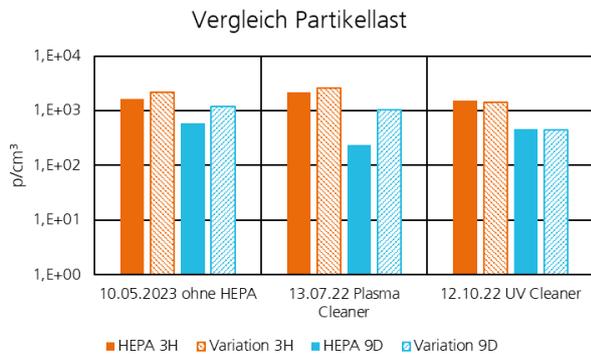


**Bild 17: Relative Verteilung der Partikelkonzentration bei reduzierter Luftmenge, Niederdruck und einem photokatalytischen (UV-C) Reiniger, 12.10.2022.**

### 3.2.4. Vergleich der Partikellasten

Trotz Umrüst- und Aufbauzeiten, wird davon ausgegangen, dass es höchstens zu leichten Veränderungen im Versuchsaufbau bezüglich Ausblaswinkel, Entfernung von der vorderen Sitzreihe, links-rechts Ausrichtung etc. gekommen ist. In der ersten Testphase wurde jeweils ein HEPA-Filter genutzt, somit kann diese als gemeinsame Basis angesehen werden. Am Platz 3H (eine Reihe vor der Viren-Luftprobe) schwankt die relative Partikelverteilung in Phase 1 zwischen 75, 83 und 100 %, also um den Faktor 1,1 bis 1,33 bezogen auf den reinen-HEPA Fall. Am Platz 9D (Platz neben der Viren-Luftprobe) schwankt die relative Partikelverteilung zwischen 27, 9 und 31 %, also Faktor 0,33 bis 1,1 bezogen auf den reinen-HEPA Fall.

Generell zeigt sich, dass entlang des Kabinensegments eine Reduktion der Partikellast um 10 % gegenüber Platz 3H (nahe am atmenden Kopf) nicht erreicht wird. Im Sinne der VDI EE 4300 wird somit die geforderte 90 %-Reduktion über die Kabinengeometrie nicht erreicht. Dies wird insbesondere deutlich, wenn die Partikellast logarithmisch skaliert aufgetragen wird (Bild 18).

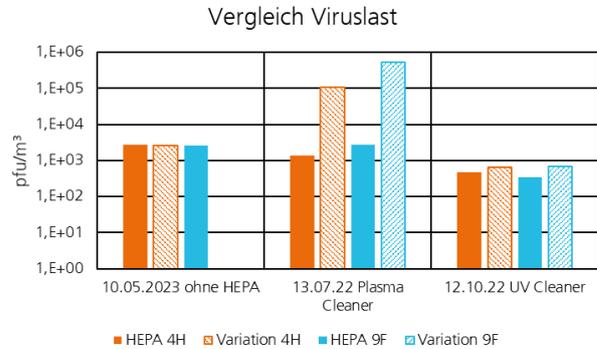


**Bild 18: Logarithmisch skalierte Darstellung der Partikellast an den Sitzen 3H und 9D.**

### 3.3. Ergebnisse der Bestimmung der Phagenkonzentration

Bild 19 zeigt die mit dem Titer der Phagensuspension normierte Phagenkonzentration, die aus den Raumluftproben in der Kabine ermittelt wurden. Hierbei zeigt sich, dass kaum Unterschiede der Infektiosität entlang der Länge der Kabine bestehen. Auch ein Entfernen des HEPA-Filters führt zu keiner Erhöhung der Infektiosität. Ein Grund könnte sein, dass die logarithmisch dargestellte

Partikelzahl hierbei nahezu konstant bleibt. Ähnliches gilt für den photokatalytischen UV-C Reiniger, die Partikelzahl ändert sich nicht maßgeblich und damit auch nicht die Infektiosität. Beim Umstellen von HEPA-Filterung auf Plasma-Reinigung ist ein Sprung in der Phagenkonzentration erkennbar und eine deutliche Erhöhung der Infektiosität wird gemessen. Insbesondere am Platz 9D wurde bei dieser Umstellung auch eine deutlich höhere Partikelkonzentration festgestellt.



**Bild 19: Vergleich der im Labor nachgewiesenen Phagenkonzentration in der Raumluft.**

## 4. DISKUSSION UND AUSBLICK

Die Arbeit vergleicht die Nutzung unterschiedlicher Reinigungsprinzipien für die Kabinen-Umluft im Flugzeug. Zur Skalierung der Reiniger-Demonstratoren wurde die Luftmenge in der Kabine reduziert. Dies führt zu einem weniger ausgeprägten Gradienten der Partikelkonzentration gegenüber einer Kabinenbelüftung mit der der Kabinengröße entsprechenden Luftmenge.

Die Infektiosität der Viren aus der Kabinenluft ist nicht linear zur Partikelzahl. Dies bedeutet, dass Technologien zur Reduktion der infektiösen Last in der Flugzeugkabine erheblich leistungsfähiger (um eine Dekade) ausgelegt werden müssen. Bezüglich der Partikelzahlen zeigt sich, dass die HEPA-Filterung in Quellnähe nur zu einer leichten Reduktion der Partikelzahl führt, während weiter entfernt von der Aerosolquelle die Last um etwa die Hälfte sinkt gegenüber einer ungefilterten Umluft. Eine ca. Halbierung der Partikelzahl bzw. entsprechende Inaktivierung dieser Partikel, wie durch eine Umluftreinigung vorgesehen, reicht nicht um eine deutliche Reduktion der Infektiosität zu erreichen. Weder der Demonstrator mit photokatalytischer (UV-C)- noch der mit Plasmareinigung zeigen in den durchgeführten Versuchen eine Reduktion der potentiell infektiösen Partikel in der Kabinenluft. Diese Geräte weisen gegenüber einer herkömmlichen HEPA-Filterung somit keinen Vorteil bzgl. des Infektionsschutzes auf und können/sollten nur ergänzend zur Filtration verwendet werden.

Künftige Untersuchungen sollten, statt den Umluftpfad zu fokussieren, vielmehr eine Reduktion der Infektiosität in der Kabine selbst erreichen, sodass luftgetragene Viren bereits bei der Abgabe in den Raum inaktiviert werden. Die Herausforderung dabei ist, dass ein gleichmäßiger Schutz erreicht werden muss, ohne vorhersagen zu können, wo in der Kabine die Quelle verortet ist.

## 5. DANKSAGUNG

Diese Studie wurde gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen des Bayerischen Luftfahrtforschungsprogramms – BayLu5 unter dem Förderkennzeichen ROB-2-3410.20\_04-10-33 / BLU-2109-0033. Die Autoren sind für den Inhalt dieser Publikation verantwortlich.



## 6. REFERENZEN

Arundel Anthony V., Stirling Elia M., Biggin Judith H., Stirling Theodor D.: "Indirect health effects of relative humidity in indoor environments", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 65, pp. 351-361, 1986

ASHRAE 161: Air quality within commercial aircraft, ASHRAE Standard 161, 2006

DIN EN 13610:2002-10: Chemical disinfectants - Quantitative suspension test for the evaluation of virucidal activity against bacteriophages of chemical disinfectants used in food and industrial areas - Test method and requirements (phase 2, step 1). European Committee for Standardization (CEN); October 2002.

Eldin Carole, Lagier Jean-Christophe, Mailhe Morgane, Gautret Philippe: "Probable aircraft transmission of CoVid-19 in-flight from the Central African Republic to France", *Travel Medicine and Infectious Disease*, Vol. 35, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101643>

Gupta Jitendra K., Lin Chao-Hsin, Chen Qingyan: „Transport of expiratory droplets in an aircraft cabin“, *Indoor Air* 21/1, February 2011, pp. 3-11, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00676.x>

Gupta Jitendra K., Lin Chao-Hsin, Chen Qingyan: „ Risk assessment of air-borne infectious diseases in aircraft cabins“, *Indoor Air* 22/5, October 2012, pp. 388-395, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00773.x>

Stover Hertzberg Vicki, Weiss Howard: "On the 2-Row Rule for Infectious Disease Transmission on Aircraft", *Annals of Global Health* 82/5, 2016, pp. 819-823, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aogh.2016.06.003>

VDI-EE 4300 Blatt 14: „Messen von Innenraumlufiverunreinigungen – Anforderungen an mobile Luftreiniger zur Reduktion der aerosolgebundenen Übertragung von Infektionskrankheiten“ September 2021

Yan Yihuan, Li Xiangdong, Shang Yidan, Tu Jiyuan: "Evaluation of airborne disease infection risks in an airliner cabin using the Lagrangian-based Wells-Riley approach", *Building and Environment* 121, 2017, pp. 79-92, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.013>