

Bericht zum Prüfauftrag zur Verbesserung der Raumluft in Schulen und Kindertagesstätten

Stadtratsbeschluss Nr. 20/0715-BV vom 09.12.2020



Inhalt

1	Aufgabenstellung	3
2	Planung, Ablauf und Beschreibung der Testanlagen hinsichtlich der Messmethode	4
3	Aufbau der Pilotanlagen und Auswertung der Messungen	12
3.1	Messaufbau mit Max-Planck-Lüftungsanlage Südschule	12
3.2	Messaufbau mit vorhandener Lüftungsanlage Schillerschule	14
3.3	Messaufbau mit Fensterlüftung gemäß genehmigtem Lüftungskonzept Südschule	16
3.4	Messaufbau mit Raumluftreiniger mit Fensterlüftung Südschule	18
3.5	Messaufbau Provisorium nach Max-Planck-Lüftungsanlage Kindervilla	20
3.6	Messaufbau vorhandene Lüftungsanlage Kinderheim Friedensberg	22
3.7	Messaufbau Fensterlüftung gemäß Hygienekonzept Kindervilla	24
3.8	Messaufbau mit Raumluftreiniger in Verbindung Fensterlüftung Kindervilla	27
3.9	Messaufbau Stoßlüftung Kindervilla	28
3.10	Messaufbau Kipplüftung Kindervilla	29
4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	31
4.1	Allgemeine Parameter	31
4.2	Investitionskosten Provisorium nach Max-Planck-Lüftung	32
4.3	Investitionskosten dezentrales Lüftungsgerät	33
4.4	Investitionskosten Raumluftreiniger mit HEPA 14-Filter	35
4.5	Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	36
5	Gutachterliche Stellungnahme	37
5.1	Vorbetrachtung durch Sachverständigen	37
5.2	Beurteilung der Untersuchungsergebnisse	40
5.3	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	31

1 Aufgabenstellung

Mit dem Stadtratsbeschluss vom 09.12.2020 Nr. 20/0715-BV wird die Stadtverwaltung Jena, ausführend durch den städtischen Eigenbetrieb Kommunale Immobilien Jena, beauftragt, nachfolgende Prüfaufträge zu realisieren und entsprechende Pilotprojekte zu initiieren:

1. Der Oberbürgermeister wird beauftragt prüfen zu lassen, ob und welche Lüftungssysteme in Jena's Schulen einsetzbar wären, um die Aerosol-Belastung der Raumluft zu verringern, die Infektionsgefahr zu minimieren und in der kalten Jahreszeit das Lüften nach 20 Minuten zu vermeiden. In den Prüfauftrag ein geschlossen ist eine Prognose zur Finanzierbarkeit und zur möglichen Nutzung von Fördermitteln.

- Der Oberbürgermeister wird beauftragt, handhabbare Pilotprojekte zu starten, um beispielhaft in einigen Klassenräumen geeignete Lüftungssysteme zu installieren und deren Wirksamkeit bzw. Akzeptanz zu testen.
- Da einige neu errichtete bzw. sanierte Schulen über Lüftungssysteme verfügen, ist unter ähnlichen Bedingungen ein Vergleich der Raumluftwerte anzustellen
 - a) in Klassenräumen ohne Lüftungssystem;
 - b) in Klassenräumen mit eingebautem Lüftungssystem;
 - c) in Klassenräumen der Pilotprojekte.
- Die Ergebnisse sind dem Stadtrat so zeitig wie möglich vorzulegen, spätestens im Februar 2021, vorzulegen.

2 Planung, Ablauf und Beschreibung der Testanlagen hinsichtlich der Messmethode

In Abstimmung mit dem Schulverwaltungsaamt und der KKJ (Kommunale Kindertagesstätten Jena) wurden die Objekte für den Prüfauftrag ausgewählt. Es musste sichergestellt werden, dass in den Objekten zum Zeitpunkt der Messung durchgängig ein Corona-Notbetrieb gegeben war, d.h. dass sich Kinder und Jugendliche in üblicher Gruppenstärke im Raum aufgehalten haben, um relevante Messergebnisse zu erhalten.

Dies war in folgenden Objekten der Fall:

- Südschule (bisher reine Fensterlüftung)
- Schillerschule (vorhandenes Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung)
- Kindertagesstätte Kochstraße 4 (bisher reine Fensterlüftung)
- Kinderheim Friedensberg (vorhandenes Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung)

Nach Auswahl der Anlagen und Objekte wurde in Absprache mit den Einrichtungen der Zeitraum für die Messung auf den 2. bis 5. Februar 2021 festgelegt.

Die Messreihen, Pilotanlagen und Geräte werden nachfolgend in ihren Einzelheiten beschrieben und detailliert dargestellt. Alle Messungen wurden in Absprache oder in Anwesenheit eines öffentlichen bestellten und vereidigten Sachverständigen für Lüftungs- und Klimatechnik durchgeführt.

Die Messmethoden wurden so gewählt, dass eindeutige Erkenntnisse sowohl zur Hygienelüftung als auch zur Aerosolbelastung gewonnen werden konnten. Hierzu wurde ein CO₂-Datenlogger eingesetzt, der die Temperatur und die relative Luftfeuchte gleichermaßen aufzeichnet.

Zur Aerosolmessung kam ein 6-Kanal-Messgerät zur Anwendung, das dem Nachweis von Partikeln und Aerosolen in DIN EN ISO 14464-zertifizierten Räumen dient. Dieses Messgerät wird beispielsweise in der Pharmaindustrie eingesetzt, um mechanische und biologische Partikel zu messen. Da es sich bei Aerosolen um eine Mischung aus festen und flüssigen Partikeln handelt und das Messgerät nicht zwischen einzelnen Partikeln unterscheidet, wurde diese Messmethode als geeignet für die Prüfung erachtet. Bei der einzelnen Messung konnte nur der Bereich von 0,3 µm Aerosolkonzentration betrachtet werden. Eine direkte Erfassung der COVID 19-Erreger konnte damit nicht durchgeführt werden, da diese eine Größe von 0,08-0,16 µm besitzen (Aussage RKI). Dennoch lässt dieses Messverfahren Rückschlüsse auf die Aufreinigung der Raumluft von Aerosolen zu.

Zur Messung der tatsächlichen Virenlast in der Umgebungsluft wurden mehrere Labore mit entsprechender Expertise angefragt. Diese konnten allerdings aus Kapazitätsgründen eine Probenauswertung im angestrebten Zeitraum nicht durchführen.

Die bei den Messreihen erhobenen Daten wurden im Anschluss zusammengeführt und durch einen unabhängigen externen Sachverständigen begutachtet und ausgewertet. Sie werden in diesem Bericht detailliert dargestellt und sind Grundlage für die angeführte Handlungsempfehlung.

Der in der Beschlussvorlage des Stadtrates ausgesprochenen Empfehlung, UV-C Geräte zur Luftdesinfektion einzusetzen, konnte nicht entsprochen werden, da das Gesundheitsamt der Stadt Jena aus Gründen der Gesundheit und der Sicherheit den Einsatz dieser Geräte untersagt hat.

2.1 Messaufbau einer provisorischen Abluftanlage in Anlehnung an die vom Max-Planck-Institut propagierten Lüftungsanlage

Bei der Max-Planck-Lüftungsanlage handelt es sich um eine reine Abluftanlage, wobei die Raumluft keine direkte Verbindung zur Außenluft besitzt. Die benötigte Zuluft wird dabei aus angrenzenden Räumen über Undichtigkeiten von Türen bzw. Fenstern bezogen. Die dadurch generierte Luftwechselrate soll in Abhängigkeit von Raumgröße und Ventilator-Leistung nach Angaben des Max-Planck-Instituts für Chemie Mainz die Virenlast signifikant verringern und somit das Infektionsrisiko senken. Die nachströmende Zuluft wird hierbei allerdings nicht separat erwärmt.

Beim Testaufbau in den o.g. Gebäuden wurde die Provisorien von einer Fachfirma mit zertifizierten Komponenten nachgebaut und an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst.

Parameter zu den Messungen

- Der Messzeitraum betrug 45 min = 1 Unterrichtseinheit.
- Gebäude, Raum-Nr. und Raumgröße wurden dokumentiert (Fläche in m² und Volumen in m³).
- Anzahl der Personen (Kinder und Erwachsene) wurden erfasst.
- Die Messung von CO₂, der Temperatur sowie der Luftfeuchte erfolgte in festgelegten Intervallen mit einem CO₂-Datenlogger, der auch die Temperatur und Luftfeuchte speichert.
- Die Aerosol-Messung erfolgte durch ein 6 Kanal-Partikelmessgerät (Leihgerät).
- Die Schalldruckpegelmessung erfolgte jeweils vor Testbeginn der Messreihe mit einem
- Messgerät, das durch den Sachverständigen gestellt wurde.

Abbildungen zu den Testanlagen



Abbildung 1: Südschule | Raum 00_18 | Provisorium nach dem Modell Max-Planck-Lüftungsanlage



Abbildung 2: Kindertagesstätte Kindervilla | Raum Landgrafenblick | Provisorium nach dem Modell Max-Planck-Lüftungsanlage

2.2 Messaufbau mit vorhandener Lüftungsanlage

Bei einer im Gebäude vorhandenen Lüftungsanlage erfolgt der Luftwechsel durch eine vordefinierte Menge Zuluft und Abluft im m^3/h . In Abhängigkeit des jeweiligen Raumvolumens ergibt sich die sogenannte Luftwechselrate (pro Stunde), durch die letztlich der Hygieneluftwechsel erreicht wird.

Die nachströmende Zuluft wird dabei vorkonfektioniert, d.h. mit einer vordefinierten Raumtemperatur bzw. nacherhitzt (Winter) oder gekühlt (Sommer) in den Raum eingebracht. Bei den in den ausgewählten Objekten vorhandenen Anlagen handelt es sich um im Bestand nachgerüstete Lüftungsanlagen. Diese befinden sich bereits mehrere Jahre in Nutzung, arbeiten sehr zuverlässig und halten die CO_2 -Konzentration im Raum konstant niedrig.

Parameter zu den Messungen

- Der Messzeitraum betrug 45 min = 1 Unterrichtseinheit.
- Gebäude, Raum-Nr. und Raumgröße wurden dokumentiert (Fläche in m^2 , Volumen in m^3).
- Anzahl der Personen (Kinder und Erwachsene) wurden erfasst.
- Die Messung von CO_2 , der Temperatur sowie der Luftfeuchte erfolgte in festgelegten Intervallen mit einem CO_2 -Datenlogger, der auch die Temperatur und Luftfeuchte speichert.
- Die Aerosol-Messung erfolgte durch ein 6 Kanal-Partikelmessgerät (Leihgerät).
- Die Schalldruckpegelmessung erfolgte jeweils vor Testbeginn der Messreihe mit einem
- Messgerät, das durch den Sachverständigen gestellt wurde.

Abbildungen zu den Testanlagen



Abbildung 3: Schillerschule | Raum 03_04 | Klassenraumgerät mit Wärmerückgewinnung-Kühl- und Heizfunktion



Abbildung 4: Kinderheim Friedensberg | Raum: Sportheim | Kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL-Gerät) mit $300 \text{ m}^3/\text{h}$ Volumenstrom



Abbildung 5: Kinderheim Friedensberg | Raum: Sportheim | Rohrleitung des Geräts zur Kontrollierten Wohnraumlüftung (KWL)

2.3 Messaufbau mit Fensterlüftung gemäß genehmigtem Lüftungskonzept

Bei diesem Messaufbau wurden alle Messungen entsprechend des abgestimmten Lüftungskonzepts im jeweiligen Referenzobjekt durchgeführt.

Parameter zu den Messungen

- Der Messzeitraum betrug 45 min = 1 Unterrichtseinheit.
- Gebäude, Raum-Nr. und Raumgröße wurden dokumentiert (Fläche in m², Volumen in m³).
- Anzahl der Personen (Kinder und Erwachsene) wurden erfasst.
- Die Messung von CO₂, der Temperatur sowie der Luftfeuchte erfolgte in festgelegten Intervallen mit einem CO₂-Datenlogger, der auch die Temperatur und Luftfeuchte speichert.
- Die Aerosol-Messung erfolgte durch ein 6 Kanal-Partikelmessgerät (Leihgerät).
- Die Schalldruckpegelmessung erfolgte jeweils vor Testbeginn der Messreihe mit einem
- Messgerät, das durch den Sachverständigen gestellt wurde.

Abbildungen zu den Testanlagen



Abbildung 6: Kindertagesstätte Kinderville | Raum Landgrafenblick | Messaufbau Fensterlüftung | Partikelmessgerät und CO₂-Datenlogger

2.4 Messaufbau mit Raumluftreiniger (Luftwäscher mit HEPA 14-Filter) in Verbindung mit Fensterlüftung nach CO₂-Ampel

Als weitere Testanlage erfolgte ein Messaufbau mittels Raumluftreiniger, sogenannter Luftwäscher. Diese reinigen die im Raum befindliche und von außen nachströmende Luft mittels HEPA 14-Filter, die einen sehr hohen Abscheidegrad von 99,995 % besitzen. Die so gefilterte Luft soll nach Aussage des Herstellers die Virenlast in der Luft senken und so das Infektionsrisiko minimieren. Die Geräte verfügen über eine integrierte CO₂-Ampel, d.h. das Gerät signalisiert den Zeitpunkt einer notwendigen Lüftung durch die Farben Rot, Gelb und Grün. Die Signalisierung und Messung der CO₂-Konzentration wurde zusätzlich über einen externen CO₂-Datenlogger vorgenommen. Die Messreihe ist analog zu den anderen Messungen aufgebaut und dient der Vergleichbarkeit der Messungen.

Parameter zu den Messungen

- Der Messzeitraum betrug 45 min = 1 Unterrichtseinheit.
- Gebäude, Raum-Nr. und Raumgröße wurden dokumentiert (Fläche in m², Volumen in m³).
- Anzahl der Personen (Kinder und Erwachsene) wurden erfasst.
- Die Messung von CO₂, der Temperatur sowie der Luftfeuchte erfolgte in festgelegten Intervallen mit einem CO₂-Datenlogger, der auch die Temperatur und Luftfeuchte speichert.
- Die Aerosol-Messung erfolgte durch ein 6 Kanal-Partikelmessgerät.
- Die Schalldruckpegelmessung erfolgte jeweils vor Testbeginn der Messreihe mit einem Messgerät, das durch den Sachverständigen gestellt wurde.

Abbildungen zu den Testanlagen



Abbildung 7: Südschule | Raum 00_18 | Raumluftreiniger mit HEPA-14 Filter, Volumenstrom ca. 650 m³/h



Abbildung 8: Kindertagesstätte Kindervilla | Raum Landgrafenblick | Raumluftreiniger mit HEPA 14-Filter, Volumenstrom ca. $650 \text{ m}^3/\text{h}$

3 Aufbau der Pilotanlagen und Auswertung der Messungen

Die Messreihen, Pilotanlagen und getesteten Geräte wurden während der Messung durch die Projektgruppe betreut und sämtliche Daten dokumentiert. Nachfolgend werden der Aufbau der Testanlagen, Beobachtungen während der Messungen und die Ergebnisse dargestellt und kommentiert. Abschließend erfolgt die Stellungnahme des Sachverständigen.

3.1 Messaufbau mit Max-Planck-Lüftungsanlage | Südschule

Das Pilotprojekt mit der Max-Planck-Lüftungsanlage wurde in der Südschule in Jena aufgebaut. Das Rohrsystem wurde aus nicht brennbaren Wickelfalzrohr montiert. Auch die Ventilator-Einheit ist in einem nicht brennbaren Gehäuse geschottet. Die Zuluft erfolgt durch Überströmung aus dem angrenzenden Flur. Die Zuluft erfolgt durch Überströmung aus dem angrenzenden Flur. Die Fortluft, wurde mittels Fensterdurchdringung durch ein Oberlicht und eine eingesetzte Sandwich-Fensterplatte realisiert.

Bei Inbetriebnahme des Ventilators musste allerdings festgestellt werden, dass sich die Fluchtwegetür nicht mehr öffnen ließ. Daraufhin wurde die Drehzahl des Ventilators so angepasst, dass eine sichere Nutzung der Fluchtwegetür gewährleistet war. Dieses anfängliche Sicherheitsrisiko durch den Unterdruck im Raum wurde vor Testbeginn beseitigt. Die Messung erfolgte unter Beaufsichtigung durch den anwesenden Sachverständigen.

Messreihe: Max-Planck-Lüftung | Südschule

Vor der Messung

- Einstellen des Volumenstroms nach Differenzdruck kleiner als 50 Pa zu Überströmbereich (Fluchtweg)
- Erstellung des Messprotokolls mit allen Daten zur Auswertung
- Messung des Schalldruckpegel vor Testbeginn durch Sachverständigen
- Testaufbau mittels 6-Kanal-Partikelmessgerät, CO₂-/Temperatur-/Luftfeuchte-Datenlogger
- zum Zeitpunkt der Messungen Regen -> dadurch in der Außenluft sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit und hohe Aerosolkonzentrationen
- Kinder saßen in U-Sitzanordnung, Messaufbau befand sich in der Mitte
- PVC-Bodenbelag unmittelbar vor der Messung nicht gereinigt
- ca. 10 min intensiv Lüftung vor Beginn der Messung

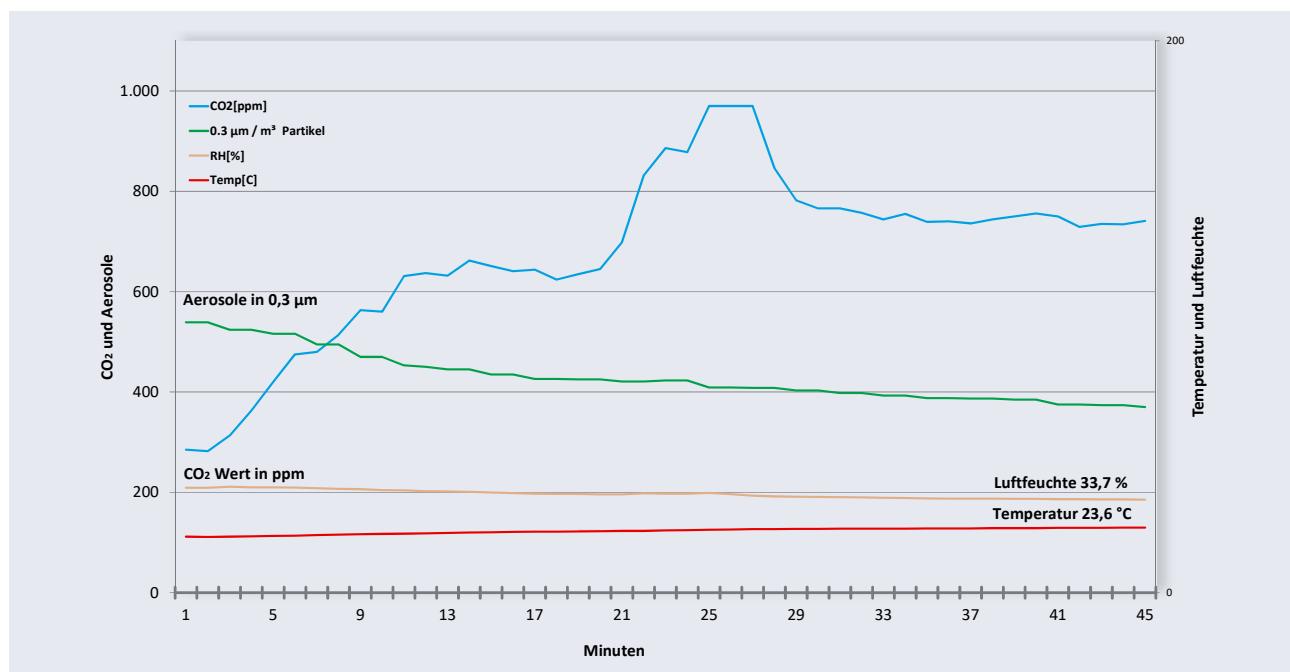
Während der Messung

- Während der gesamten Messreihe (45 min) wurde mit dem Max-Planck-Lüftungspilot die Abluft der Aerosole unterstützt
- Die Zuluft erfolgte über eine Überströmung im Türbereich. Die Tür war während der Messung geschlossen.
- Die Kinder übten nur leichte Aktivitäten bei Gruppenarbeit aus (vorrangig sitzende Tätigkeit).
- Bei der Messung wurden höhere Aerosolkonzentrationen als in der Schillerschule in Winzerla gemessen. Vermutlich wirkt sich die Nähe zum Stadtzentrum negativ auf die Messergebnisse (Luftqualität Aerosole kleiner gleich 0,3µm) aus. Dies müsste über die Messreihe hinaus untersucht werden.

Auswertung der Messung

Datum:	03. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	X
	Kita Kindervilla	-
	Schillerschule	-
Modell:	Max-Planck-Modell:	X
	vorhandene Lüftungsanlage:	-
	Fensterlüftung:	-
	Luftwäscher:	-
	LWR:	4-fach
	Raum-Nr.:	00_18
	Fläche m ² :	47,8
	Volumen m ³ :	148
	Anzahl Personen:	13 Kinder, 2 Erwachsene
Vor Beginn:	Temp C°	20,2
	Luftfeuchte: % RH	42
	Schalldruck in DB(A):	43,7
	Partikel = 0,3:	4,4 Millionen
	CO ₂ in ppm:	300
Messreihe:	Uhrzeit:	
	von:	8:45 Uhr
	bis:	09:30 Uhr
	DB(A):	43,7

Übersicht der Messwerte



Fazit

Der Testaufbau Max-Planck-Lüftungspilot verdünnt die Aerosolkonzentration durch die Zufuhr von Luft und dem damit verbundenen Luftwechsel von anfänglich 5,4 Millionen Aerosolen pro m^3 auf 3,7 Millionen Aerosole ($= 0,3\mu m$). Die CO_2 -Konzentration stieg hingegen von 300 ppm auf zwischenzeitlich 970 ppm und sank danach wieder auf 741 ppm ab. Die Anlage bezieht jedoch die Zuluft durch Überströmung aus dem Flurbereich. Aus brandschutztechnischen Gründen kann dies nur zu Testzwecken eingesetzt werden. Sollten mehrere solcher Anlagen in einem Objekt betrieben werden, kommt es zu Störungen der Nachströmungsluft und zu einem erhöhten Unterdruck im Treppenhaus. Dies kann wiederum zu sicherheitsrelevanten Problemen führen und den Betrieb des Schulgebäudes einschränken oder sogar stilllegen. Die Tür zum Flurbereich ist zudem eine Rauchschutztür mit Absenkabdichtung.

Wird in einem Nebenraum ein Fenster geöffnet, wird durch den Unterdruck im Test-Klassenzimmer ein Teil der benötigten nachströmenden Luft ggf. aus dem Klassenzimmer gesogen, das das Fenster geöffnet hat. So kann es zu einer Ansaugung von Aerosolen aus einer anderen Betreuungsgruppe kommen und damit zu einer Erhöhung der Infektionsgefahr durch Fremdaerosole.

Außerdem wurde festgestellt, dass es durch verbaute Leuchtmittel im Klassenraum die Lichtleistung reduziert ist. Dies wurde durch die Pädagogen bemängelt.

Schlussfolgerung

Ein dauerhafter Einsatz dieser Testanlage ist aus den o.g. Gründen nicht zu empfehlen.

3.2 Messaufbau mit vorhandener Lüftungsanlage | Schillerschule

Bei diesem Messaufbau werden die Geräte der Lüftungsanlage im Bestand auf Wirksamkeit geprüft. Diese sind mit einer Wärmerückgewinnung und einem Kühlregister ausgestattet, um geringe Wärmeverluste im Winter und eine Kühlfunktion im Sommer zu sichern.

Messreihe: Vorhandene Lüftungsanlage | Schillerschule

Vor der Messung

- Das Lüftungsgerät (Standgerät mit $750m^3/h$, Wärmerückgewinnung und Kühlung) hat den Luftauslass und Lufteinlass ca. 10 cm oberhalb des Bodens -> dies kann zu Aufwirbelung von Aerosolen führen
- Die Kinder saßen zum Zeitpunkt der Messreihe kreisförmig um den Messaufbau und haben nur leichte Aktivitäten ausgeübt.
- Der Bodenbelag war nicht vorab gereinigter Nadelfilz.
- Vor Beginn der Messung wurde mindestens 10 min stoßgelüftet.

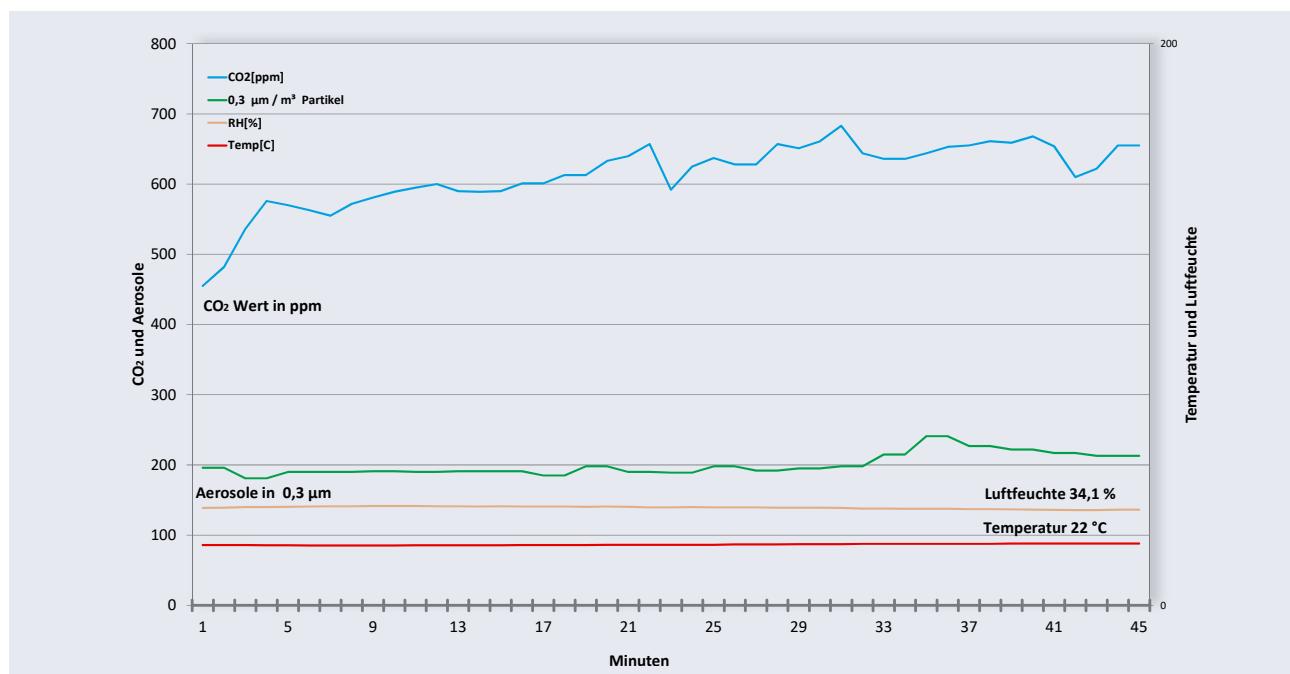
Während der Messung

- Bei Messbeginn wurden 4,5 Millionen Aerosole von $0,3\mu m$ Größe gemessen.
- Die Luftqualität ist gut, da im Wohngebiet Jena-Winzerla nur wenige Wohnhäuser mit zentraler Heizungsanlage ausgestattet sind.

Auswertung der Messung

Datum:	03. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	-
	Kita Kindervilla	-
	Schillerschule	X
Modell:	Max-Planck-Modell:	X
	vorhandene Lüftungsanlage:	-
	Fensterlüftung:	-
	Luftwäscher:	-
	LWR:	-
	Raum-Nr.:	03_04
	Fläche m ² :	59,9
	Volumen m ³ :	160
	Anzahl Personen:	8 Kinder, 2 Erwachsene
Vor Beginn:	Temp C°	23
	Luftfeuchte: % RH	31
	Schalldruck in DB(A):	34,2
	Partikel = 0,3:	16,1 Millionen
	CO ₂ in ppm:	400
Messreihe:	Lüftung m ³ /h:	700
	von:	10:00 Uhr
	bis:	10:45 Uhr
	DB(A):	34,2

Übersicht der Messwerte



Fazit

Es ist aus dem Diagramm erkennbar, dass durch die direkte Wirkungsweise eines Außenluftgerätes mit Wärmetauscher die Aerosolkonzentration im Raum während der Nutzung nahezu konstant blieb. Die Aerosolkonzentration ist von anfänglich 1,9 Millionen Aerosolen pro m^3 nicht wesentlich gestiegen. Am Ende der Messreihe lag die Aerosolkonzentration bei 2,1 Millionen Aerosolen pro m^3 . Durch den Wärmetauscher wird die feuchtere Außenluft vorgewärmt, was die Feuchtigkeit nahezu ausgleicht.

Dies führt dazu, dass die Feuchtepartikel vor dem Einbringen in den Raum abtrocknen können bzw. sich besser in der wärmeren Luft verteilen.

Die Witterung hatte augenscheinlich keine Einwirkung auf das Messergebnis, da während der Messreihe durch das Einbringen von Frischluft keine Erhöhung der Aerosole messbar waren.

Schlussfolgerung

Eine raumlufttechnische Anlage ist in der Lage, die CO_2 -Konzentration niedrig zu halten und die Aerosole durch Frischluftzufuhr permanent zu verdünnen.

3.3 Messaufbau mit Fensterlüftung gemäß genehmigtem Lüftungskonzept | Südschule

Bei diesem Messaufbau wurden alle Messungen mit dem abgestimmten Lüftungskonzept des Referenzobjektes durchgeführt. Hierzu wurde mittels CO_2 -Ampel die verbrauchte Raumluft gemessen. Über eine mehrfarbige LED wird die Notwendigkeit einer Fensterlüftung im Raum signalisiert. Zu Testzwecken wurde nur nach dem bestätigten Lüftungskonzept gelüftet, das bedeutet mindestens 1 Mal 3-5 Minuten Stoßlüftung innerhalb einer Unterrichtseinheit. Dabei kann erfasst werden, wie sich die Wirksamkeit der Hygienelüftung (Stoßlüftung) gegenüber der CO_2 -Konzentration verhält.

Messreihe: Fensterlüftung | Südschule

Vor der Messung

- Der Testaufbau erfolgte mit Partikelmessgerät, CO_2 -/Temperatur-/Luftfeuchte-Datenlogger, der Luftwäscher diente in diesem Aufbau nur als Abstellfläche, um die Messungen vergleichbar durchzuführen.
- Zum Zeitpunkt der Messungen hatte es geregnet, d.h. die Außenluft war sehr feucht.
- Die Kinder saßen U-förmig um den Messaufbau, der Messaufbau stand in der Mitte des Raumes.
- Der PVC-Bodenbelag war unmittelbar vor der Messung nicht gereinigt worden.
- Die Messung erfolgte direkt im Anschluss einer vorherigen Messreihe bzw. Unterrichtseinheit
- von 45 Minuten. In dieser Pause haben sich die Kinder aktiv bewegt.

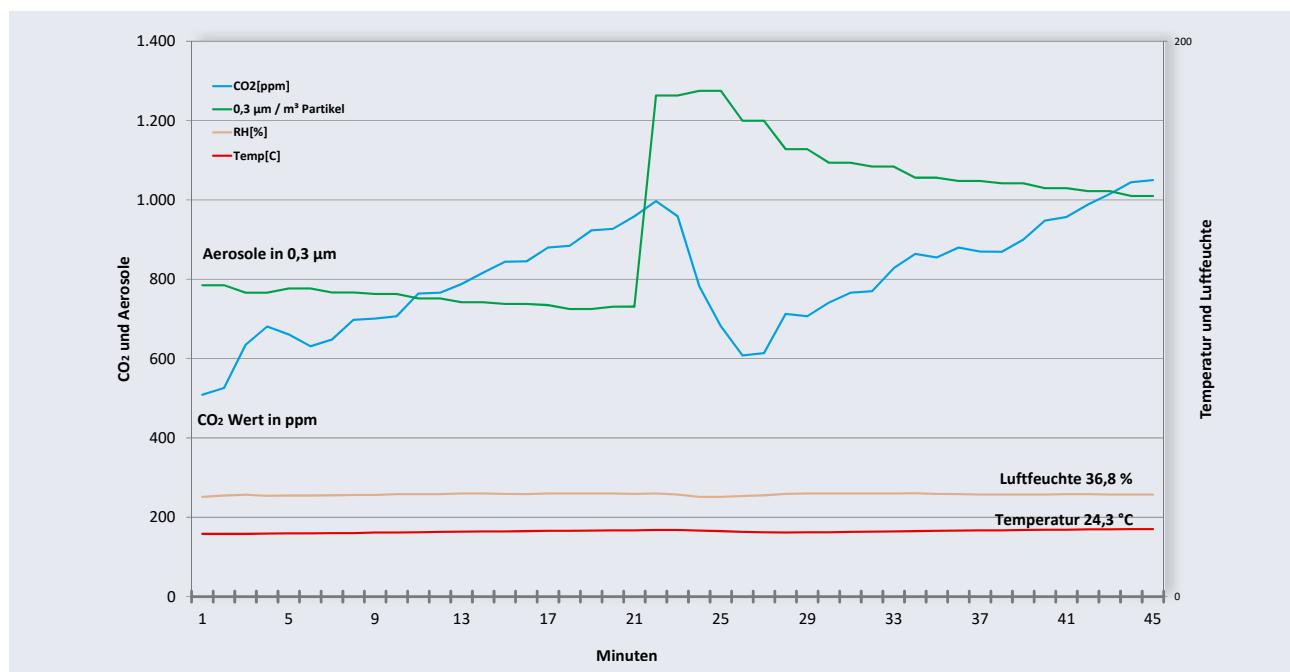
Während der Messung

- Die Lüftung erfolgte nach dem Lüftungskonzept der Schule. Entsprechend diesem wurde einmal für ca. 4 min stoßgelüftet.
- Eine CO_2 -Ampel wurde in diesem Test nicht genutzt.
- Die Kinder übten nur leichte Aktivitäten in Gruppenarbeit (sitzende Tätigkeit) aus.
- Bei der Messung wurde festgestellt, dass höhere Aerosolkonzentrationen als in der Schillerschule in Winzerla gemessen wurden. Vermutlich wirkt sich die Nähe zur Stadtmitte negativ auf die Messergebnisse (Luftqualität – Aerosole von $0,3\mu m$) aus.
- Der CO_2 -Wert stieg schneller als in anderen Messungen an.

Auswertung der Messung

Datum:	03. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	X
	Kita Kinderville	-
	Schillerschule	-
Modell:	Max-Planck-Modell:	X
	vorhandene Lüftungsanlage:	-
	Fensterlüftung:	-
	Luftwäscher:	-
	LWR:	-
	Raum-Nr.:	0_18
	Fläche m ² :	47,8
	Volumen m ³ :	148
	Anzahl Personen:	13 Kinder, 2 Erwachsene
Vor Beginn:	Temp C°	22,5
	Luftfeuchte: % RH	36
	Schalldruck in DB(A):	-
	Partikel = 0,3:	8,4 Millionen
	CO ₂ in ppm:	530
Messreihe:	Uhrzeit	
	von:	10:08 Uhr
	bis:	10:53 Uhr
	DB(A):	34,2

Übersicht der Messwerte



Fazit:

Die anfänglich Aerosolkonzentration von 7,8 Millionen Aerosolen pro m^3 ist auf die Außenluftzustände zurückzuführen, da sich dieser Zustand im Laufe der Messreihe messbar verbesserte und die Feuchtkonzentration in die Raumluft abtrocknete. Nach der Fensterlüftung (bei Minute 21) ist der Anstieg der Aerosole auf 12,7 Millionen Aerosole pro m^3 sehr deutlich sichtbar. Die CO_2 -Konzentration fällt hingegen bei Minute 22 von 997 ppm auf 700 ppm ab. Bei dieser Lüftungsmethode ist es möglich, die Vorgaben des Bundesumweltamtes von 1000 ppm einzuhalten und durch leichte Anpassungen des Lüftungsverhaltens noch besser zu erfüllen. Nach Aussage des Lehrkörpers ist es kein Problem, die Fensterlüftung in den Unterricht einzubinden, da die Kinder der Jahreszeit entsprechend gekleidet sind und 3 Minuten Stoßlüften sowohl durch die Lehrer als auch durch die Kinder als unproblematisch bewertet wurde.

Schlussfolgerung

Durch eine Anpassung des Lüftungszyklus von 1 auf 2 Stoßlüftungen in einer Unterrichtseinheit von 45 Minuten können die Hygienelüftung verbessern und somit die Vorgaben vom Bundesumweltamt eingehalten werden.

3.4 Messaufbau mit Raumluftreiniger mit Fensterlüftung | Südschule

Bei dieser Messreihe befand sich der Messaufbau in der Mitte des Klassenzimmers. Die Wirksamkeit des Raumluftreinigers mit HEPA-14 Filter wurde bei dieser Messung auf die Aerosolkonzentration und CO_2 -Konzentration geprüft.

Messreihe: Luftwäscher in Verbindung Fensterlüftung | Südschule

Vor der Messung

- Der Raumluftreiniger wurde auf der Einstellung Stufe 4 von 6 Stufen getestet, d.h. mit einem Volumenstrom von ca. 650 m^3/h (gemäß Herstellerangaben).
- Die Kinder saßen U-förmig um den Messaufbau.
- Der PVC-Bodenbelag war unmittelbar vor der Messung nicht gereinigt worden.
- Vor Beginn der Messung wurde ca. 5 Minuten intensiv gelüftet, die Kinder befanden sich zu diesem Zeitpunkt (Pause) noch im Klassenraum.
- Die Messung erfolgte direkt im Anschluss einer vorherigen Messung bzw. Unterrichtseinheit von 45 min. Die fünfminütige Pause haben die Kinder aktiv zur Bewegung genutzt.
- Die Fensterlüftung wurde nach der CO_2 -Ampel des zur Messung benutzten Datenloggers vorgenommen. Bei roter Anzeige der LED wurde ca. 3 Minuten stoßgelüftet.
- Die Einstellwerte des Geräts sind wie folgt angegeben:
 - unter 650 ppm CO_2 = grüne Anzeige LED
 - 650 - 950 ppm CO_2 = gelbe Anzeige LED
 - über 950 ppm CO_2 = rote Anzeige LED

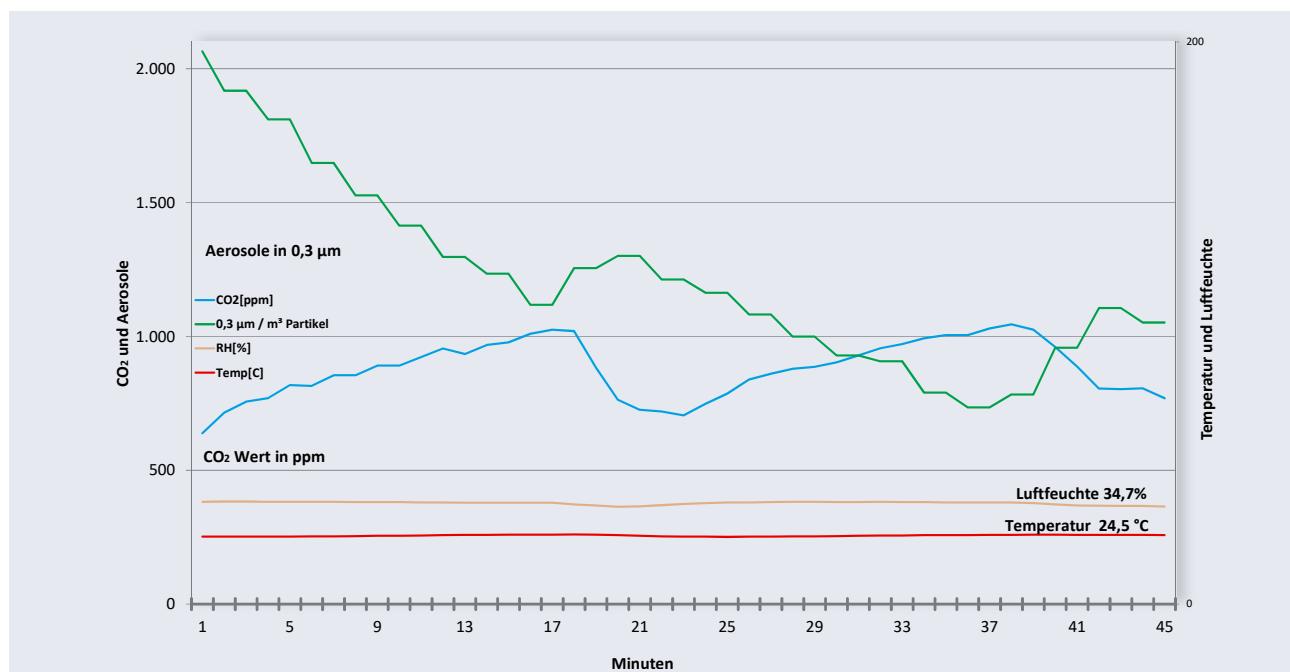
Während der Messung

- Während des Unterrichts haben die Kinder (und Pädagogen) vorwiegend sitzende Tätigkeiten und nur leichte Aktivitäten bei kurzer Gruppenarbeit ausgeübt.
- Bei Messbeginn wurden 20,5 Millionen Aerosole $\leq 0,3\mu m$, d.h. leicht erhöhte Partikelwerte im Vergleich zur Schillerschule in Winzerla gemessen. Vermutlich wirkt sich die Nähe zur Stadtmitte negativ auf die Luftqualität-Aerosole von $0,3\mu m$ Größe aus.

Auswertung der Messung

Datum:	03. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	X
	Kita Kindervilla	-
	Schillerschule	-
Modell:	Max-Planck-Modell:	-
	vorhandene Lüftungsanlage:	-
	Fensterlüftung:	-
	Luftwäscher:	X
	ULR:	4-fach
	Raum-Nr.:	00_18
	Fläche m ² :	47,8
	Volumen m ³ :	148
	Anzahl Personen:	13 Kinder, 2 Erwachsene
Vor Beginn:	Temp C°	24
	Luftfeuchte: % RH	36
	Schalldruck in DB(A):	45,4
	Partikel = 0,3:	20,6 Millionen
	CO ₂ in ppm:	683
Messreihe: 1	Uhrzeit	
	von:	11:00 Uhr
	bis:	11:45 Uhr
	DB(A):	45,4

Übersicht der Messwerte



Fazit

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Aerosolkonzentration bis zur ersten Fensterlüftung bei Minute 18 stetig abnimmt. Von 20,65 Millionen Aerosolen (= 0,3 μm auf 11,8 Millionen Aerosole) während der Fensterlüftung stieg der Wert wieder auf 13,1 Millionen und wurde durch die Aufreinigung wieder gesenkt. Nach der zweiten Fensterlüftung, in Minute 38, stieg der Aerosolwert von 7,4 auf 10,5 Millionen an. Die CO_2 -Konzentration hingegen sank ab Minute 18, von 1020 ppm auf 630 ppm, ab. Dieser Wert stieg bis zur zweiten Fensterlüftung, in Minute 38, auf 1045 ppm an.

Bei dem Lüftungszyklus von 3 Minuten nimmt die Konzentration der Aerosole temporär zu. Dieser kurze Anstieg wird durch den Luftwäscher in kurzer Zeit wieder aufgereinigt und fällt rasch wieder ab. Bei Minute 38 wird wiederholt gelüftet. Auf eine Hygienelüftung kann dennoch nicht verzichtet werden, da der Luftwäscher nur Aerosole und Partikel filtert, aber keine Frischluft zuführt.

Da der Luftwäscher nur im Umluft Betrieb arbeitet und auf die CO_2 -Konzentration nicht positiv einwirkt kann dieser nur unterstützend zu der Hygienelüftung eingesetzt werden. Ein Luftwäscher ersetzt keine Stoßlüftung gemäß Hygienekonzept um den erforderlichen Luftwechsel zu erreichen.

Schlussfolgerung

Der Einsatz eines Raumluftreingers ist nur unterstützend zu einer Hygienelüftung denkbar.

3.5 Messaufbau Provisorium nach Max-Planck-Lüftungsanlage | Kindervilla

Der Max-Planck-Lüftungs-Pilot wurde in der Kindertagesstätte Kindervilla aufgebaut. Das Rohrsystem wurde aus nicht brennbarem Wickelfalzrohr montiert. Die Ventilator-Einheit ist ebenfalls in einem nichtbrennbaren Gehäuse geschützt. Die Zuluft erfolgte bei diesem Messaufbau über Überströmung aus dem angrenzenden Flur. Die Fortluft wurde mittels Fensterdurchdringung durch ein Oberlicht und eine eingesetzte Sandwich-Fensterplatte realisiert.

Bei der Montage des Provisorium nach Max-Planck wurde die Anlage weitestgehend dem Originalaufbau nachempfunden. Bei Inbetriebnahme des Ventilators musste allerdings festgestellt werden, dass sich die Fluchtwegetür nicht mehr öffnen ließ. Daraufhin wurde die Drehzahl des Ventilators so angepasst, dass eine sichere Nutzung der Fluchtwegetür gewährleistet war. Dieses anfängliche Sicherheitsrisiko durch den Unterdruck im Raum wurde vor Testbeginn beseitigt. Die Messung erfolgte unter Beaufsichtigung durch den anwesenden Sachverständigen.

Messreihe: Kindertagesstätte Kindervilla

Vor der Messung

- Einstellen des Volumenstroms nach Differenzdruck kleiner als 50 Pa zu Überströmbereich (Fluchtweg)
- Erstellung eines Messprotokolls mit allen notwendigen Daten zur Auswertung
- Messung des Schalldruckpegels vor Testbeginn durch Sachverständigen
- Der Testaufbau erfolgte mit 6-Kanal-Partikelmessgerät, CO_2 -/Temperatur-/Luftfeuchte-Datenlogger.
- Zum Zeitpunkt der Messungen hatte es geregnet, d.h. die Außenluft hatte eine sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit. Damit waren hohe Aerosolkonzentrationen in der Außenluft zu erwarten.
- Der PVC-Bodenbelag war unmittelbar vor der Messung nicht gereinigt worden.
- Zu Beginn der Messung wurde der Raum mit dem Testaufbau mindestens 10 Minuten intensiv gelüftet. Bei der Referenzmessung der Aerosole fiel eine erhöhte Aerosolekonzentration im Bereich 0,3 μm auf. Diese lagen bei 28 Millionen Aerosolen/ m^3 .

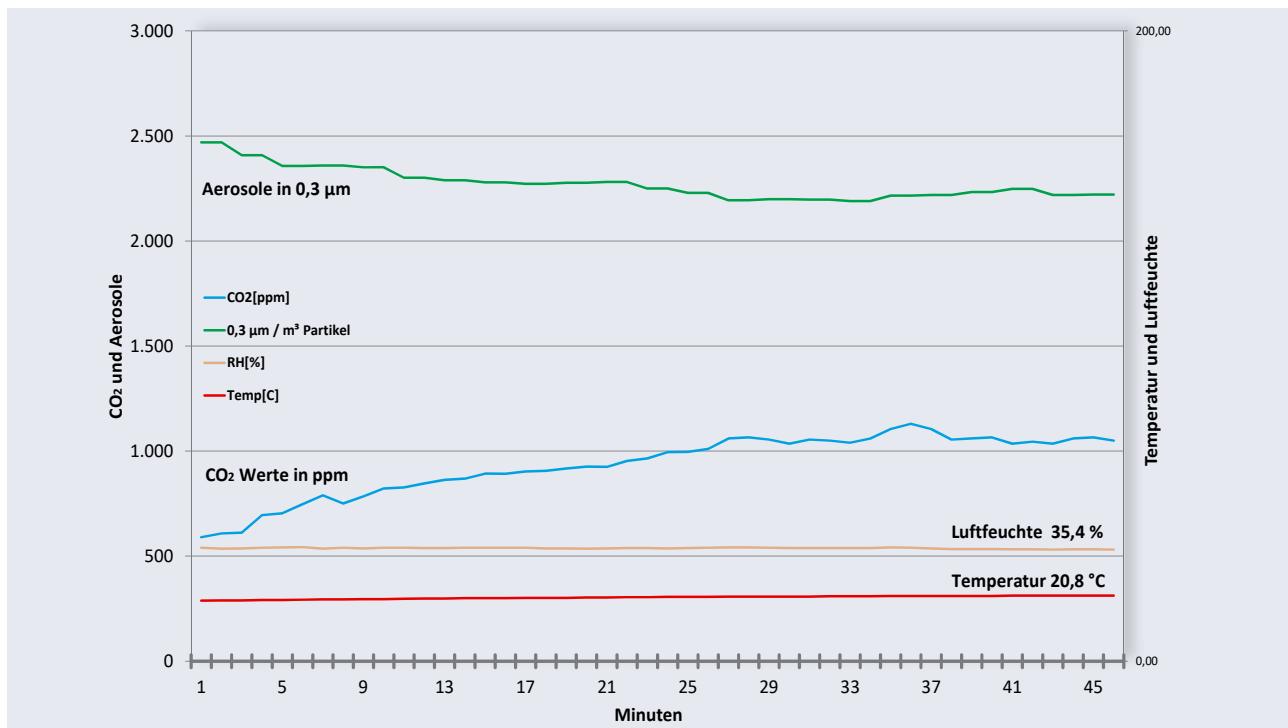
Während der Messung

- Bei Beginn der Messung wurden rund 28 Millionen Aerosole mit einer Größe von 0,3µm gemessen, dies kann auf die Gegebenheiten im unmittelbaren Umfeld zurückgeführt werden. Die Stadtnähe und Mehrfamilienhäuser mit Zentralheizung im Umfeld können der Grund für die Erhöhung sein.
- Die Türen des Raumes blieben die ganze Zeit über geschlossen, so dass keine Störgrößen erkennbar waren.
- Zum Zeitpunkt der Messung spielten die Kinder ruhig und gingen kaum körperlichen Aktivitäten nach.
- Die Wetterlage war zum Zeitpunkt der Messung beständig, leicht sonnig und aufgelockert. Damit ist nicht von einer Erhöhung von Aerosolwerten durch Feuchteintrag von außen auszugehen.

Auswertung der Messung

Datum:	03. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	-
	Kita Kinderville	X
	Schillerschule	-
 Modell:	Max-Planck-Modell:	X
	vorhandene Lüftungsanlage:	-
	Fensterlüftung:	-
	Luftwäscher:	-
	LWR:	2,4-fach
	Raum-Nr.:	Landgrafenblick
	Fläche m ² :	42,8
	Volumen m ³ :	175
	Anzahl Personen:	12 Kinder, 5 Erwachsene
	Volumenstrom in m ³ /h:	420
 Vor Beginn:	Temp C°	18,1
	Luftfeuchte: % RH	38
	Schalldruck in DB(A):	43,1
	Partikel = 0,3:	28,1 Millionen
	CO ₂ in ppm:	430
 Messreihe:	Uhrzeit	
	von:	09:33 Uhr
	bis:	10:18 Uhr
	DB(A):	43,1

Übersicht der Messwerte



Fazit

Das Provisorium nach Max-Planck verdünnt die Aerosolkonzentration durch die Zufuhr von Luft und den damit verbundenen Luftwechsel von anfänglich 24,7 Millionen Aerosolen pro m^3 auf 22,2 Millionen Aerosolen (mit einer Größe von $0,3 \mu\text{m}$). Die CO_2 -Konzentration stieg von 590 ppm auf 1050 ppm an. Die Anlage bezieht jedoch die Zuluft durch Überströmung über die Tür aus dem Flurbereich. Aus brandschutztechnischen Gründen kann dies nur zu Testzwecken eingesetzt werden. Sollten mehrere solcher Anlagen in einem Objekt betrieben werden, kommt es zu Störungen der nachströmenden Zuluft und einem erhöhten Unterdruck im Treppenhaus. Dies kann wiederum zu sicherheitsrelevanten Aspekten führen und den Betrieb des Schulgebäudes einschränken oder sogar stilllegen.

Bei der Ansaugung von überströmender Luft aus anderen Räumen kann es zudem zu einer erhöhten Infektionsgefahr durch fremde Aerosole kommen.

Schlussfolgerung:

Ein dauerhafter Einsatz dieser Testanlage ist aus den o.g. Gründen nicht zu empfehlen.

3.6 Messaufbau vorhandene Lüftungsanlage | Kinderheim Friedensberg

Die Messreihe mit einer im Gebäude vorhandenen Lüftungsanlage wurde im Kinderheim am Friedensberg durchgeführt. Hier wurde die Funktionalität eines KWL-Geräts (Kontrollierte Wohnraumlüftung) in der Messreihe überprüft. Der Volumenstrom ist an dem Gerät zwischen $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und $300 \text{ m}^3/\text{h}$ einstellbar.

Für die Messreihe wurde die Einstellung $300 \text{ m}^3/\text{h}$ genutzt. Zudem besitzt das Gerät eine Wärmerückgewinnungs-Funktion, um Wärmeverluste zu minimieren.

Messreihe: vorhandene Lüftungsanlage | Kinderheim Friedensberg

Vor der Messung

- Vor Beginn der Messung wurde der Sportraum, der von einem KWL-Gerät versorgt wird, mindestens 10 Minuten intensiv gelüftet.
- Der Testaufbau mit Aerosolmessgerät und CO_2 -Datenlogger wurde zentral innerhalb der Gruppe der Kinder aufgebaut, um die Messung weitestgehend reproduzierbar zu machen.
- Störgrößen konnten nicht festgestellt werden.

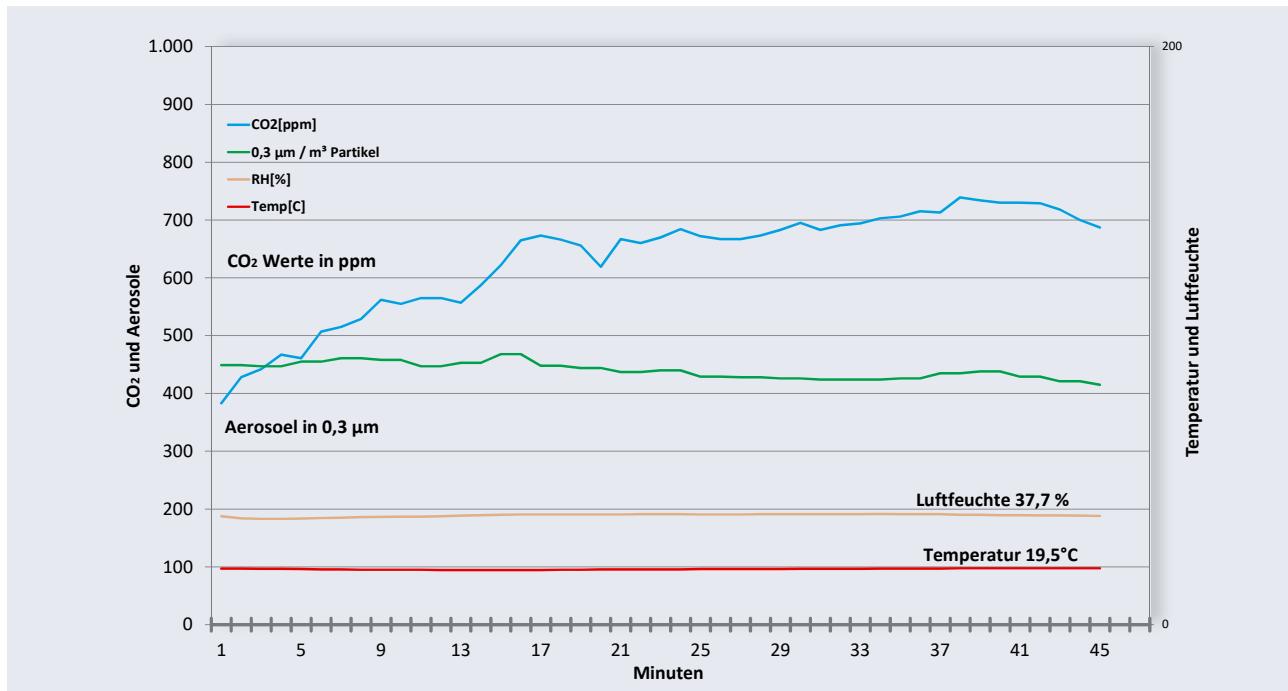
Während der Messung

- Bei Beginn der Messung lag die Aerosolkonzentration von 0,3 µm bei 4,6 Millionen pro m³.
- Die Kinder spielten ruhig und waren dabei körperlich wenig aktiv.

Auswertung der Messung

Datum:	04. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	-
	Kita Kindervilla	-
	Schillerschule	-
	Kinderheim Friedensberg	X
 Modell:	 Max-Planck-Modell:	-
	vorhandene Lüftungsanlage:	X
	Fensterlüftung:	-
	Luftwäscher:	-
	LWR:	2,4-fach
	Raum-Nr.:	Sportraum Keller
	Fläche m ² :	49,8
	Volumen m ³ :	124,5
	Anzahl Personen:	12 Kinder, 2 Erwachsene
	KWL-Gerät	300m ³ /h
 Vor Beginn:	 Temp C°	19,7
	Luftfeuchte: % RH	35
	Schalldruck in DB(A):	42,6
	Partikel = 0,3:	4,63 Millionen
	CO ₂ in ppm:	355
 Messreihe:	 Uhrzeit	
	von:	13:55 Uhr
	bis:	14:39 Uhr
	DB(A):	42,6

Übersicht der Messwerte



Fazit

Im Diagramm ist zu beobachten, dass im Gebäude verbaute Lüftungsgeräte (KWL-Geräte) eine kontinuierliche Senkung der Aerosole bewirken.

Die steigenden CO₂-Werte stabilisierten sich bei ca. 800 ppm und bleiben damit unter den vom Bundesumweltamt vorgegebenen Werten.

Die Witterung hatte augenscheinlich keine Auswirkung auf das Messergebnis, da während der Messreihe das Einbringen von Frischluft keine messbare Erhöhung der Aerosole nachweisbar war.

Schlussfolgerung:

Der Test hat gezeigt, dass auch ein kleines raumluftechnisches Gerät mit 300m³/h Volumenstrom, durchaus für den Einsatz in kleineren Räumen geeignet ist, um die Aerosolkonzentration konstant gering zu halten.

3.7 Messaufbau Fensterlüftung gemäß Hygienekonzept | Kinderville

Die Messreihe Fensterlüftung wurde durch das Öffnen der vorhandenen Fensterflügel, gemäß dem vorhandenen Hygienekonzept, durchgeführt und die Konzentration des CO₂, mittels aufgestellter CO₂-Ampel, signalisiert.

Messreihe: Fensterlüftung gemäß Hygienekonzept | Kinderville

Vor der Messung

- Die Messreihe wurde unmittelbar nach einem Hofaufenthalt durchgeführt. Davor wurde ausreichend gelüftet, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Während der Messung

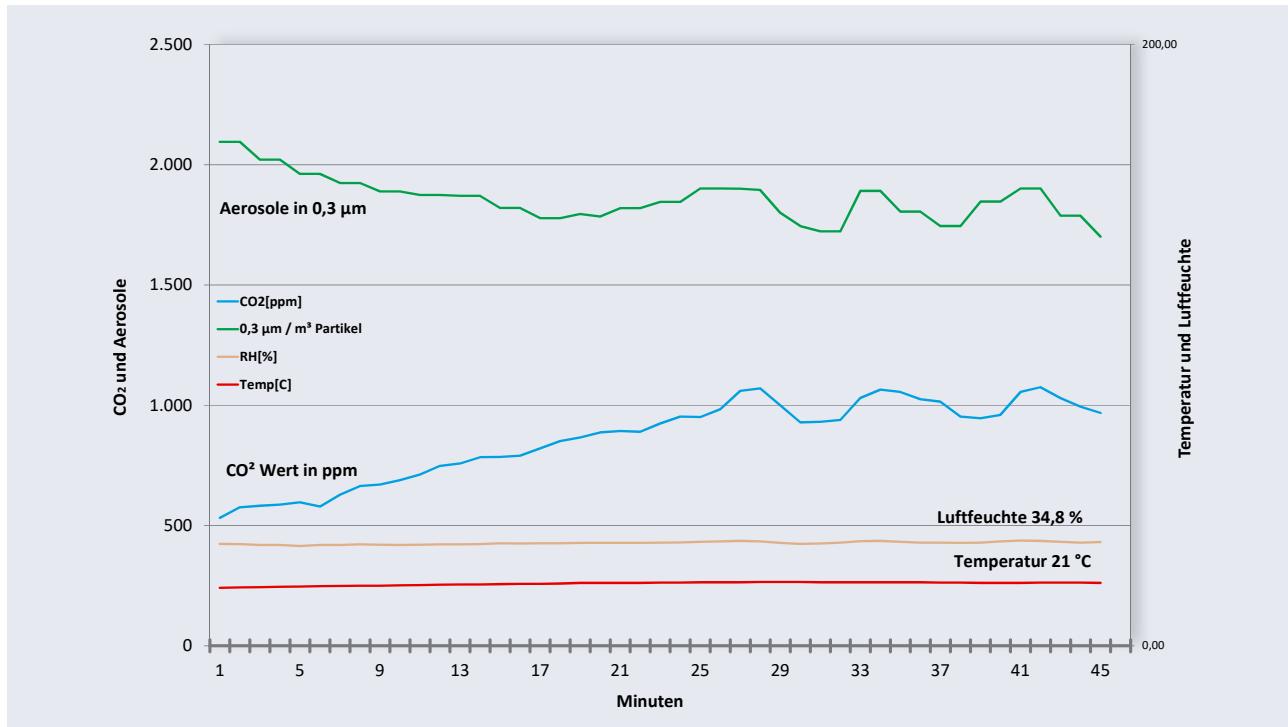
- Am Anfang der Testreihe wurden sämtliche Türen zum Raum Landgrafenblick oft geöffnet und somit ein Luftverbund mit mehreren Räumen hergestellt. In dieser Zeit wurde das Mittagessen im Testraum vorbereitet. Dadurch kam es zu anfänglichen Messabweichungen. Diese haben sich nach ca. 20 Minuten wieder normalisiert.
- Anschließend haben alle Kinder im Raum Landgrafenblick ihr Mittagessen eingenommen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Außenluftverhältnisse relativ konstant und beständig trocken, dadurch kam es nicht zu einem Anstieg der Partikelkonzentration nach dem Lüften durch einen Feuchteintrag durch die Außenluft.
- Um die Kinder keiner Zugluft auszusetzen, wurden die Lüftungsintervalle bewusst kurz gehalten. Im Normalfall ste-

hen alle Zimmertüren offen und der CO₂-Anstieg wäre durch den Raumluftverbund weniger stark.

Auswertung der Messung

Datum:	02. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	-
	Kita Kindervilla	X
	Schillerschule	-
Modell:	Max-Planck-Modell:	-
	vorhandene Lüftungsanlage:	-
	Fensterlüftung:	X
	Luftwäscher:	-
	LWR:	-
	Raum-Nr.:	Landgrafenblick
	Fläche m ² :	42,8
	Volumen m ³ :	175
	Anzahl Personen:	12 Kinder, 4 Erwachsene
Vor Beginn:	Temp C°	19,3
	Luftfeuchte: % RH	33,80
	Schalldruck in DB(A):	-
	Partikel = 0,3:	20,9 Millionen
	CO ₂ in ppm:	430
Messreihe: 1	Uhrzeit	
	von:	11:05 Uhr
	bis:	11:50 Uhr
	DB(A):	-

Übersicht der Messwerte



Fazit

Durch die vorangegangenen Aktivitäten der Kinder wurde die Raumluft schneller verbraucht als bei einer ruhigen Tätigkeit.

Die CO₂-Konzentration stieg anfänglich von 530 ppm auf 1070 ppm an. Die Aerosole sanken von anfänglich von 2,09 Millionen auf 1,70 Millionen Aerosole pro m³ mit einer Größe von 0,3 µm ab. Ab Minute 24 ist ein Anstieg des CO₂-Gehaltes zu sehen bei gleichzeitigem Anstieg von Partikeln und nur geringem Abfall der Raumtemperatur, da die Lüftungszeiten gezielt für jeweils ca. 2 Minuten kurz gehalten wurden. Die Lüftung erfolgte bei Minute 27, 37 und 42.

Das Absinken der Aerosole ist in Verbindung mit der Fensterlüftung, deutlich zu erkennen. Zum Zeitpunkt der Messung wurde in diesem Raum Mittag gegessen und eine zu große Fensterlüftung wurde vermieden. Dennoch ist das Verhältnis zwischen CO₂-Anstieg und Aerosolanstieg eindeutig zu erkennen. Bei längeren Lüftungsverhalten wäre eine bessere Hygienelüftung gegeben.

Schlussfolgerung:

Es ist möglich die Hygienelüftung durch Fensterstoßlüftung zu realisieren. Eine Unterstützung durch ein CO₂-Messgerät kann dabei von Vorteil sein, um den CO₂-Gehalt konstant niedrig zu halten.

3.8 Messaufbau mit Raumluftreiniger in Verbindung Fensterlüftung | Kindervilla

Bei dieser Messreihe befand sich der Messaufbau nicht im unmittelbaren Spielbereich der Kinder, dennoch wurde der Testaufbau so zentral wie möglich aufgestellt. Die Wirksamkeit des Raumluftreinigers mit HEPA-14 Filter wurde hierbei auf die Aerosolkonzentration und CO₂-Konzentration in Verbindung mit der Fensterlüftung geprüft.

Messreihe: Raumluftreiniger in Verbindung Fensterlüftung | Kindervilla

Vor der Messung

- Zu Beginn wurde der Raum 10 Minuten gelüftet. Dabei wurde festgestellt, dass die Außenluft hohe Aerosolwerte aufzeigte. Diese lagen bei 22,9 Millionen Aerosolen pro m³ bei 0,3 µm. Dies kann ggf. auf die Nähe zum Stadtzentrum bzw. auf die angrenzenden Mehrfamilienhäuser mit Zentralheizung hinweisen. In unmittelbarer Nähe waren 10 Häuser mit Schornsteinverrohrungen zu erkennen. Dies stellt eine Störgröße für die Aerosolmessung dar.

Während der Messung

- Bis 10 min nach Messbeginn wurde die Tür zu dem Flurbereich oft durch die Betreuer geöffnet, somit beruhigte sich erst danach das Nutzerverhalten.
- Um Zugerscheinungen während des Testes zu vermeiden, wurden die Stoßlüftungen gezielt kurz gehalten.
- Nach Aussage Kita Leitung ist dieser Raum selten so stark frequentiert.
- Das Lüften gemäß Lüftungskonzept wird Raumweise, mit geschlossenen Türen und ohne Kinder durchgeführt. Durch den Raumverbund aller offen stehenden Kitaräume kommt es nicht zu einer erhöhten CO² Konzentrationen.
- Alle Kinder haben während der Messung ruhig gespielt.

Auswertung der Messung

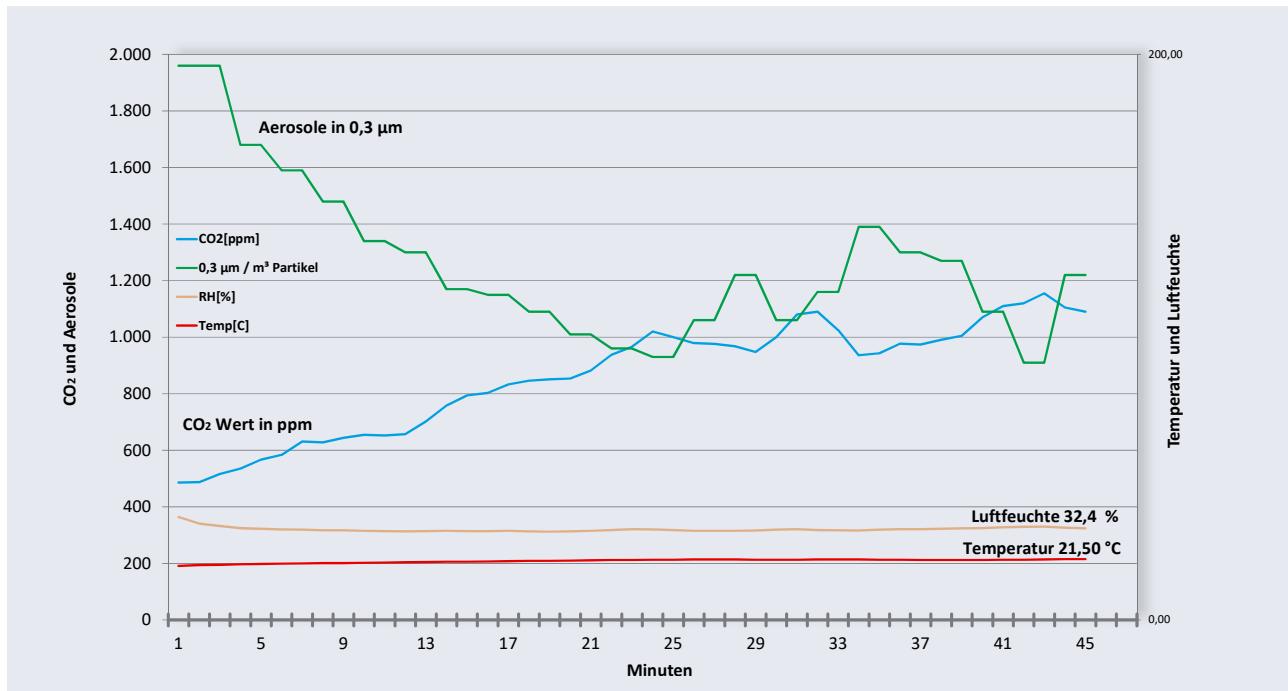
Datum:	02. 02. 2021	X
Ort:	Südschule	-
	Kita Kindervilla	X
	Schillerschule	-

Modell:	Max-Planck-Modell:	-
	vorhandene Lüftungsanlage:	-
	Fensterlüftung:	-
	Luftwässcher:	X
	ULR:	3,4-fach
	Raum-Nr.:	Landgrafenblick
	Fläche m ² :	42,8
	Volumen m ³ :	175
	Anzahl Personen:	12 Kinder, 4 Erwachsene
	Volumen Umluft in m ³ /h	650 = Stufe 4

Vor Beginn:	Temp C°	19,1
	Luftfeuchte: % RH	36,80
	Schalldruck in dB(A):	-
	Partikel = 0,3:	19,6 Millionen
	CO ₂ in ppm:	486

Messreihe: 1	Uhrzeit	
	von:	08:45 Uhr
	bis:	09:30 Uhr
	DB(A):	-

Übersicht der Messwerte



Fazit

Dem Diagramm kann man entnehmen, dass die Aerosolkonzentration von anfänglich 19,6 Millionen Aerosolen pro m³ auf 12,2 Millionen Aerosole mit einer Größe von 0,3 µm abnimmt. Die CO₂-Konzentration stieg hingegen von 480 ppm auf 1090 ppm an. Die Lüftung erfolgte bei Minute 22, 31 und 42. Während diesen kurz gehaltenen Lüftungszyklen ist ein Anstieg der Aerosole zu erkennen. Diese wurden von außen in den Raum durch die Fensterlüftung eingebracht. Der Raumluftreiniger filtert die Aerosole im Umluftbetrieb, führt aber keine Frischluft zu. Deshalb kann auf eine Hygienelüftung nicht verzichtet werden.

Während dieser Messreihe ist aufgefallen, dass eine einfache LED-Anzeige nicht immer geeignet scheint, um den Erziehern die CO₂-Konzentration zu signalisieren. Hier sollte die Signalisierung auch akustisch erfolgen, um den CO₂-Wert von 1000 ppm nicht zu überschreiten und eine frühestmögliche Hygienelüftung zu gewährleisten.

Schlussfolgerung

Der Einsatz eines Raumluftreinigers ist nur unterstützend zu einer Hygien-Stoßlüftung denkbar.

3.9 Messaufbau Stoßlüftung | Kinderville

Bei diesem Messaufbau wurde die Funktionalität der Hygienelüftung mittels Stoßlüftung überprüft und mit der Kipp-lüftung verglichen. Aerosole wurden bei diesem Messaufbau nicht berücksichtigt, da diese Messung ohne Personen stattfand. Hier wurde zur Messung nur der verbrauchte Luftzustand des Raumes (gemessen in CO₂) genutzt.

Messreihe: Stoßlüftung 3 Minuten | Kinderville

Vor der Messung

- Diese Messung wurde 10 Minuten nach der Messung Kipp-lüftung im Raum Landgrafenblick durchgeführt. Betrachtet wurde in diesem Test nur die CO₂-Konzentration und Temperatur, diese Daten wurden mit dem CO₂-Datenlogger erfasst.

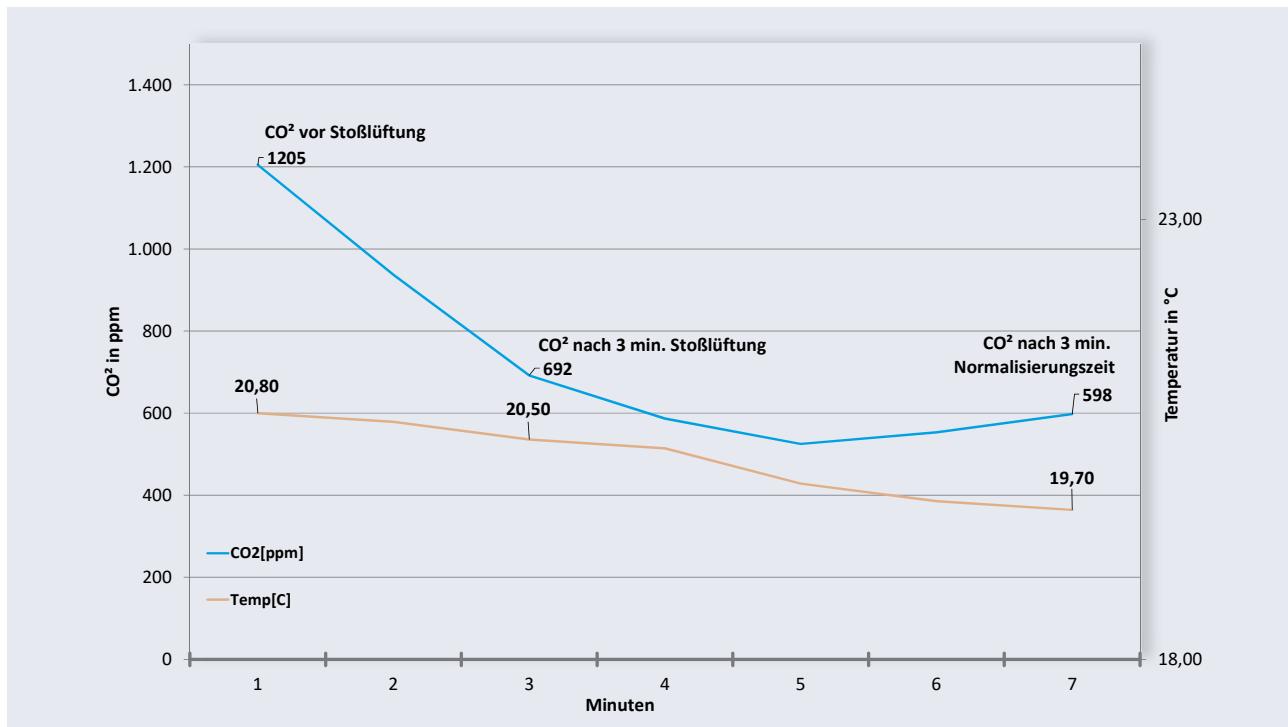
Während der Messung

- Während der Messung sind keine Störgrößen aufgefallen.
- Die Zugangstür zu dem Raum Landgrafenblick wurde während der Messung nicht geöffnet.

Auswertung der Messung

Bei diesem Messaufbau wurde ein Fenster mit 2 Fensterflügeln voll geöffnet, um die Stoßlüftung zu realisieren. Die Fläche des Fensters betrug 2 m². Zum Zeitpunkt der Messung betrug die Außentemperatur 5°C.

Übersicht der Messwerte



Fazit

Durch das kurzzeitig voll geöffnete Fenster (3 Minuten) konnte der Hygieneluftaustausch sehr schnell realisiert werden. Die CO₂-Konzentration ist dabei um ca. 50 % gesunken. Es kam dabei zu einem geringen Temperaturabfall. Dieser kann sehr schnell wieder kompensiert werden, da der Raum nicht über einen längeren Zeitraum ausköhlt.

Schlussfolgerung:

Die Stoßlüftung ist in der Lage, einen schnellen Hygieneluftwechsel herbeizuführen, ohne dass eine Auskühlung des Raumes durch langanhaltendes Zuführen von Kaltluft erfolgt.

3.10 Messaufbau Kipplüftung | Kindervilla

Bei diesem Messaufbau wurde die Funktionalität der Hygienelüftung mittels Kipplüftung überprüft und mit der Stoßlüftung verglichen. Aerosole werden bei diesem Messaufbau nicht berücksichtigt, da diese Messung ohne Personen stattfand. Hier wurde nur der verbrauchte Luftzustand, gemessen in CO₂, des Raumes zur Messung genutzt.

Messreihe: Kipplüftung 3 Minuten | Kindervilla

Vor der Messung

- Vor der Messung befand sich eine Gruppe Kinder in dem Raum Landgrafenblick.
- Betrachtet wurden in diesem Test nur die CO₂-Konzentration und die Temperatur, diese Daten wurden mit dem CO₂-Datenlogger erfasst.

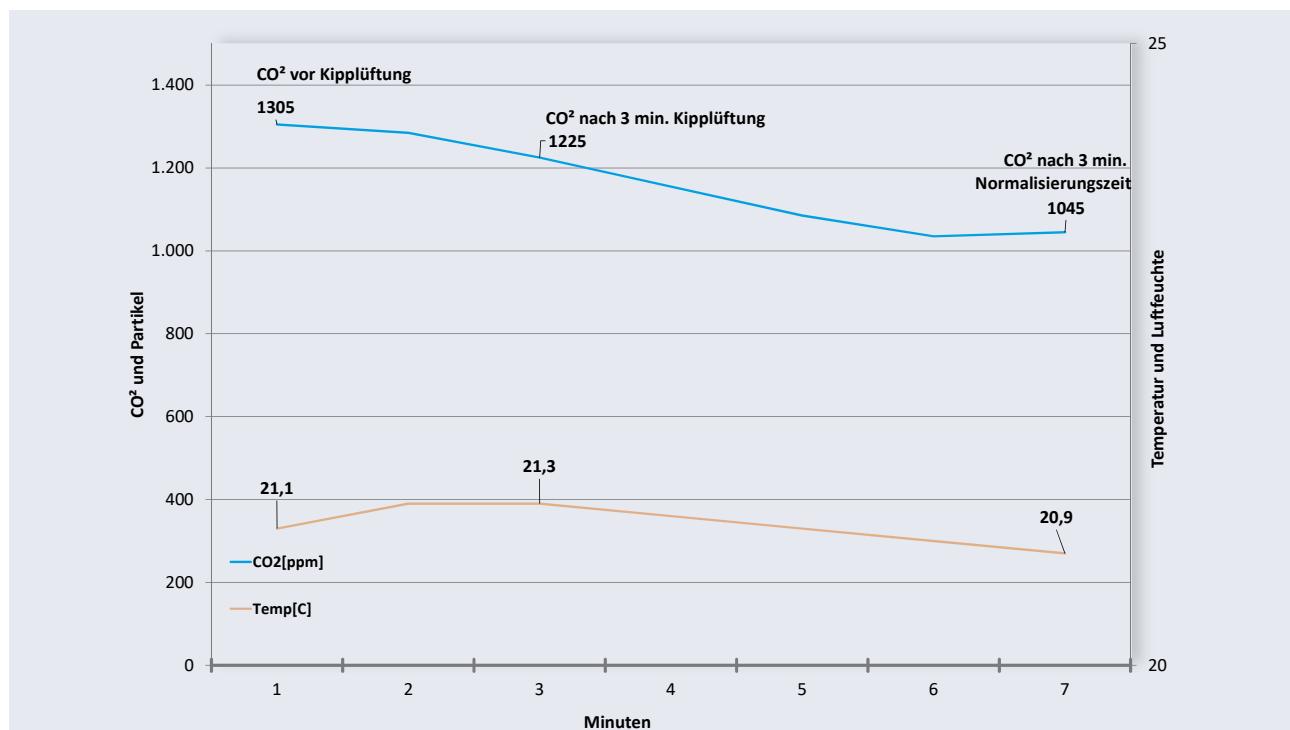
Während der Messung

- Während der Messung sind keine Störgrößen aufgefallen.
- Die Zugangstür zu dem Raum Landgrafenblick wurde während der Messung nicht geöffnet.

Auswertung der Messung

Bei diesem Messaufbau wurde ein Fenster mit 2 Fensterflügeln angekippt. Zum Zeitpunkt der Messung betrug die Außentemperatur 5°C.

Übersicht der Messwerte



Fazit

Durch das kurzzeitig gekippte Fenster (3 Minuten) konnte der Hygieneluftaustausch nicht vollständig werden. Die CO₂-Konzentration ist dabei lediglich um ca. 20 % gesunken. Es kam zudem zu einem geringen Temperaturabfall. Um den Hygieneluftwechsel zu gewährleisten, muss die Kipplüftung länger ausgeführt werden. Dies würde den Raum durch den permanent abfallenden Kaltluftstrom im Bodenbereich spürbar auskühlen. Gleichzeitig schichtet sich die kältere Luft unter die Warmluft und verdrängt die warme Luft durch das gekippte Fenster. Daraus folgen anhaltende Fußkälte und ein spürbarer Temperaturabfall des Raumes, der nicht durch die Heizkörper kompensiert werden kann. Steigende Heizkosten und ggf. zunehmende Erkältungsscheinungen der Kinder wären die Konsequenz. Das Auskondensieren von Feuchtigkeit im Fenstersims begünstigt zudem den Schimmelbefall.

Schlussfolgerung

Ein Hygieneluftwechsel durch Kipplüftung ist in einem Vielfachen der Zeit einer Stoßlüftung möglich. In dieser Zeit kommt es zu einer Auskühlung des Raumes. Diese Lüftungsart ist nicht geeignet, um eine Hygienelüftung während der Nutzung von Räumen durchzuführen.

Allgemeine Leitwerte für Kohlendioxid

Leitwerte für Kohlendioxid (2008)		
CO ₂ -Konzentration (ppm)	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
< 1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1000–2000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raums prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

Quelle: Umweltbundesamt

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sollen die Varianten Provisorium nach Max-Planck Lüftung, Lüftungsgerät und Raumluftreiniger für die eine Investition getätigt werden müsste, miteinander verglichen werden, wobei bei einer der Varianten zusätzlich eine Vergleichsrechnung Leasing/Kauf durchgeführt wird.

Wie jede Investitionsrechnung fußt die Berechnung auf einigen Annahmen (Parametern), die vorab durch die technischen und kaufmännischen Verantwortlichen bei KIJ abgestimmt wurden.

Die allgemeinen Parameter sind zu Beginn aufgeführt und gelten für alle Varianten gleich. Zudem gibt es Parameter, die sich in den Varianten unterscheiden (z.B. die Wartungskosten pro Jahr). Diese sind in der jeweiligen Variante im Kopf angegeben.

Die Berechnungen werden jeweils nach der Methode der dynamischen Investitionsrechnung durchgeführt. Das bedeutet, dass alle Ausgaben nach den jeweiligen Zeitpunkten aufsummiert werden. Zum Schluss werden die Kosten auf den Zeitpunkt der Investition abgezinst, um die Varianten miteinander vergleichen zu können. Nachdem die Kosten pro Gerät bestimmt wurden, werden sie mit der Gesamtzahl der Räume in Schulen und Kindertagesstätten multipliziert, um ein Gesamtbild zu erhalten. Dieses Gesamtbild ist zu Beginn bereits in einer Übersicht vorangestellt. Die farblich hinterlegten Werte bilden die wirtschaftlichsten Varianten ab.

4.1 Allgemeine Parameter

Parameter

Schulen

Anzahl Klassenräume ohne Lüftungsanlage	609
Anzahl Aula/Speiseräume ohne Lüftungsanlage	12

Kita

Anzahl Gruppenräume ohne Lüftungsanlage	400
---	-----

Allgemeine Parameter

Jahr der Installation	2021
Betrachtungszeitraum	20 Jahre
Kalkulatorischer Zins	1,30%
Ø Größe Klassenraum	55,0 m ²

Medienparameter

Ø Fernwärmepreis aktuell	0,150 €/kWh
Stromverbrauch Lüftungsgeräte	2,5 W/m ²

Preisseigerungsraten

Preisseigerung Fernwärme	2,0%
Preisseigerung Strom	2,0%
Preisseigerung Dienstleistung	2,0%
Steigerung Personalkosten	2,0%

4.2 Investitionskosten | Provisorium nach Max-Planck-Lüftungsanlage

Installation Max-Planck-Lüftung

Frischluft- Nachströmung über Fenster

Schulen

Investition pro Raum	6.000 €
Planungskosten	unbekannt
Wartungskosten pro Gerät pro Jahr	100 €
Kosten Betrieb pro Jahr	201 €
zusätzliche Stromkosten pro Jahr	138 €
Vollbenutzungsstunden Heizperiode	1.000
Wärmeverluste Heizperiode	3.000 kWh

Kita

Investition pro Raum Kita	4.000 €
Planungskosten	unbekannt
Wartungskosten pro Gerät pro Jahr	100 €
Kosten Betrieb pro Jahr	201 €
zusätzliche Stromkosten pro Jahr	138 €
Vollbenutzungsstunden Heizperiode	1.000
Wärmeverluste Heizperiode	3.000 kWh

Investitionsberechnung (dynamisch und nicht diskontiert)

Kosten werden über den Betrachtungszeitraum aufaddiert, ohne die Kosten auf einen Zeitpunkt abzuzinsen

einmalige Kosten

Investitionskosten	6.000 €
Fördermittel	0 €

Kosten im laufenden Betrieb über 20 Jahre

Wartungskosten	2.429,74 €
Kosten Technische Betreibung	4.879,88 €
zusätzliche Stromkosten	3.340,89 €
zusätzliche Wärmekosten	10.933,82 €

Gesamt pro Gerät

27.584 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

609

Gesamt Schulen

16.798.854 €

einmalige Kosten

Investitionskosten	4.000 €
Fördermittel	0 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	2.429,74 €
Kosten Technische Betreibung	4.879,88 €
zusätzliche Stromkosten	3.340,89 €
zusätzliche Wärmekosten	10.933,82 €

Gesamt pro Gerät

25.584 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

400

Gesamt Kita

10.233.730 €

Investitionsberechnung (dynamisch und diskontiert)

Kosten werden aufaddiert und auf den Startzeitpunkt abgezinst

einmalige Kosten

Investitionskosten	6.000 €
Fördermittel	0 €

einmalige Kosten

Investitionskosten	4.000 €
Fördermittel	0 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	2.136,90 €
Kosten Technische Betreibung	4.291,75 €
zusätzliche Stromkosten	2.938,24 €
zusätzliche Wärmekosten	9.616,05 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	2.136,90 €
Kosten Technische Betreibung	4.291,75 €
zusätzliche Stromkosten	2.938,24 €
zusätzliche Wärmekosten	9.616,05 €

Kapitalwert pro Gerät

24.983 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

609

Kapitalwert Schulen

15.214.610 €

Kapitalwert pro Gerät

22.983 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

400

Kapitalwert Kita

9.193.176 €

Detail laufende Kosten								
	Wartung Schule	Wartung Kita	Betrieb Schule	Betrieb Kita	Strom Schule	Strom Kita	Wärme Schule	Wärme Kita
2021	100,00 €	100,00 €	200,84 €	200,84 €	137,50 €	137,50 €	450,00 €	450,00 €
2022	102,00 €	102,00 €	204,86 €	204,86 €	140,25 €	140,25 €	459,00 €	459,00 €
2023	104,04 €	104,04 €	208,95 €	208,95 €	143,06 €	143,06 €	468,18 €	468,18 €
2024	106,12 €	106,12 €	213,13 €	213,13 €	145,92 €	145,92 €	477,54 €	477,54 €
2025	108,24 €	108,24 €	217,40 €	217,40 €	148,83 €	148,83 €	487,09 €	487,09 €
2026	110,41 €	110,41 €	221,74 €	221,74 €	151,81 €	151,81 €	496,84 €	496,84 €
2027	112,62 €	112,62 €	226,18 €	226,18 €	154,85 €	154,85 €	506,77 €	506,77 €
2028	114,87 €	114,87 €	230,70 €	230,70 €	157,94 €	157,94 €	516,91 €	516,91 €
2029	117,17 €	117,17 €	235,32 €	235,32 €	161,10 €	161,10 €	527,25 €	527,25 €
2030	119,51 €	119,51 €	240,02 €	240,02 €	164,33 €	164,33 €	537,79 €	537,79 €
2031	121,90 €	121,90 €	244,82 €	244,82 €	167,61 €	167,61 €	548,55 €	548,55 €
2032	124,34 €	124,34 €	249,72 €	249,72 €	170,96 €	170,96 €	559,52 €	559,52 €
2033	126,82 €	126,82 €	254,71 €	254,71 €	174,38 €	174,38 €	570,71 €	570,71 €
2034	129,36 €	129,36 €	259,81 €	259,81 €	177,87 €	177,87 €	582,12 €	582,12 €
2035	131,95 €	131,95 €	265,00 €	265,00 €	181,43 €	181,43 €	593,77 €	593,77 €
2036	134,59 €	134,59 €	270,30 €	270,30 €	185,06 €	185,06 €	605,64 €	605,64 €
2037	137,28 €	137,28 €	275,71 €	275,71 €	188,76 €	188,76 €	617,75 €	617,75 €
2038	140,02 €	140,02 €	281,22 €	281,22 €	192,53 €	192,53 €	630,11 €	630,11 €
2039	142,82 €	142,82 €	286,85 €	286,85 €	196,38 €	196,38 €	642,71 €	642,71 €
2040	145,68 €	145,68 €	292,59 €	292,59 €	200,31 €	200,31 €	655,57 €	655,57 €

4.3 Investitionskosten | Dezentrales Lüftungsgerät

Installation Lüftungsanlage

Schulen

Investition pro Raum	20.000 €
Planungskosten	unbekannt
Wartungskosten pro Gerät pro Jahr	100 €
Kosten Betrieb pro Jahr	201 €
zusätzliche Stromkosten pro Jahr	138 €
Vollbenutzungsstunden Heizperiode	1.000
Hygieneinspektion pro Jahr	83 €

Kita

Investition pro Raum Kita	10.000 €
Planungskosten	unbekannt
Wartungskosten pro Gerät pro Jahr	100 €
Kosten Betrieb pro Jahr	201 €
zusätzliche Stromkosten pro Jahr	138 €
Vollbenutzungsstunden Heizperiode	1.000
Hygieneinspektion pro Jahr	83 €

Investitionsberechnung (dynamisch und nicht diskontiert)

Kosten werden über den Betrachtungszeitraum aufaddiert, ohne die Kosten auf einen Zeitpunkt abzuzinsen

einmalige Kosten

Investitionskosten	20.000 €
Fördermittel	-12.000 €

einmalige Kosten

Investitionskosten	10.000 €
Fördermittel	-6.000 €

Kosten im laufenden Betrieb über 20 Jahre

Wartungskosten	4.454,52 €
Kosten Technische Betreibung	4.879,88 €
zusätzliche Stromkosten	3.340,89 €
zusätzliche Wärmekosten	0,00 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	4.454,52 €
Kosten Technische Betreibung	4.879,88 €
zusätzliche Stromkosten	3.340,89 €
zusätzliche Wärmekosten	0,00 €

Gesamt pro Gerät

20.675 €

Gesamt pro Gerät

16.675 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

609

Anzahl anzuschaffender Geräte

400

Gesamt Schulen

12.591.252 €

Gesamt Kita

6.670.116 €

Investitionsberechnung (dynamisch und diskontiert)

Kosten werden aufaddiert und auf den Startzeitpunkt abgezinst

einmalige Kosten

Investitionskosten	20.000 €
Fördermittel	-12.000 €

einmalige Kosten

Investitionskosten	10.000 €
Fördermittel	-6.000 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	3.917,65 €
Kosten Technische Betreibung	4.291,75 €
zusätzliche Stromkosten	2.938,24 €
zusätzliche Wärmekosten	0,00 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	3.917,65 €
Kosten Technische Betreibung	4.291,75 €
zusätzliche Stromkosten	2.938,24 €
zusätzliche Wärmekosten	0,00 €

Kapitalwert pro Gerät **19.148 €**

Kapitalwert pro Gerät **15.148 €**

Anzahl anzuschaffender Geräte **609**

Anzahl anzuschaffender Geräte **400**

Kapitalwert Schulen **11.660.912 €**

Kapitalwert Kita **6.059.055 €**

Detail laufende Kosten						
	Wartung Schule	Wartung Kita	Betrieb Schule	Betrieb Kita	Strom Schule	Strom Kita
2021	183,33 €	183,33 €	200,84 €	200,84 €	137,50 €	137,50 €
2022	187,00 €	187,00 €	204,86 €	204,86 €	140,25 €	140,25 €
2023	190,74 €	190,74 €	208,95 €	208,95 €	143,06 €	143,06 €
2024	194,55 €	194,55 €	213,13 €	213,13 €	145,92 €	145,92 €
2025	198,45 €	198,45 €	217,40 €	217,40 €	148,83 €	148,83 €
2026	202,41 €	202,41 €	221,74 €	221,74 €	151,81 €	151,81 €
2027	206,46 €	206,46 €	226,18 €	226,18 €	154,85 €	154,85 €
2028	210,59 €	210,59 €	230,70 €	230,70 €	157,94 €	157,94 €
2029	214,80 €	214,80 €	235,32 €	235,32 €	161,10 €	161,10 €
2030	219,10 €	219,10 €	240,02 €	240,02 €	164,33 €	164,33 €
2031	223,48 €	223,48 €	244,82 €	244,82 €	167,61 €	167,61 €
2032	227,95 €	227,95 €	249,72 €	249,72 €	170,96 €	170,96 €
2033	232,51 €	232,51 €	254,71 €	254,71 €	174,38 €	174,38 €
2034	237,16 €	237,16 €	259,81 €	259,81 €	177,87 €	177,87 €
2035	241,90 €	241,90 €	265,00 €	265,00 €	181,43 €	181,43 €
2036	246,74 €	246,74 €	270,30 €	270,30 €	185,06 €	185,06 €
2037	251,68 €	251,68 €	275,71 €	275,71 €	188,76 €	188,76 €
2038	256,71 €	256,71 €	281,22 €	281,22 €	192,53 €	192,53 €
2039	261,85 €	261,85 €	286,85 €	286,85 €	196,38 €	196,38 €
2040	267,08 €	267,08 €	292,59 €	292,59 €	200,31 €	200,31 €

Fördermittel	fördertätig	Maximalbetrag	inkl. Planung	kombinierbar	Status
- Klimainvest	60%	200.000 €	ja	1	sicher
inkl. KOM.EMS	80%	200.000 €	ja		unsicher
- Kommunalrichtlinie	20%		nein	1	unsicher
- BEG	20%		ja	1	unsicher
andere Richtlinie	60%		ja		unsicher

4.4 Investitionskosten | Raumluftreiniger mit HEPA 14-Filter

Installation Luftwäscher in Verbindung Fensterlüftung nach CO² Ampel

Schulen - Variante Kauf

Investition pro Raum	4.165 €
Planungskosten	0 €
Wartungskosten pro Gerät pro Jahr	360 €
Kosten Betrieb pro Jahr	201 €
zusätzliche Stromkosten pro Jahr	0 €
Vollbenutzungsstunden Heizperiode	
Wärmeverluste Heizperiode	0 kWh

Schulen - Variante Leasing 72 Monate

Leasing pro Monat	75,24 €
Planungskosten	0 €
Service-Vertrag pro Jahr	428 €
Kosten Betrieb pro Jahr	201 €
zusätzliche Stromkosten pro Jahr	0 €
Vollbenutzungsstunden Heizperiode	
Wärmeverluste Heizperiode	0 kWh

Investitionsberechnung (dynamisch und nicht diskontiert)

Kosten werden über den Betrachtungszeitraum aufaddiert, ohne die Kosten auf einen Zeitpunkt abzuzinsen

einmalige Kosten

Investitionskosten	4.165 €
Fördermittel	0 €

Kosten im laufenden Betrieb über 20 Jahre

Wartungskosten	8.747,05 €
Kosten Technische Betreibung	4.879,88 €
zusätzliche Strom-/ Wärmekosten	0,00 €

Gesamt pro Gerät

17.792 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

609

Gesamt Schulen

10.835.290 €

einmalige Kosten

Investitionskosten	0 €
Fördermittel	0 €

Kosten im laufenden Betrieb über 20 Jahre

Wartungskosten	10.408,99 €
Kosten Technische Betreibung	4.879,88 €
zusätzliche Strom-/ Wärmekosten	0,00 €
Leasingkosten	18.058,49 €

Gesamt pro Gerät

33.347 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

609

Gesamt Schulen

20.308.545 €

Investitionsberechnung (dynamisch und diskontiert)

Kosten werden aufaddiert und auf den Startzeitpunkt abgezinst

einmalige Kosten

Investitionskosten	4.165 €
Fördermittel	0 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	7.692,84 €
Kosten Technische Betreibung	4.291,75 €
zusätzliche Strom-/ Wärmekosten	0,00 €

Kapitalwert pro Gerät

16.150 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

609

Kapitalwert Schulen

9.835.101 €

einmalige Kosten

Investitionskosten	0 €
Fördermittel	0 €

Kosten im laufenden Betrieb über Jahre

Wartungskosten	9.504,89 €
Kosten Technische Betreibung	4.291,75 €
zusätzliche Strom-/ Wärmekosten	0,00 €
Leasingkosten	16.017,53 €

Kapitalwert pro Gerät

29.814 €

Anzahl anzuschaffender Geräte

609

Kapitalwert Schulen

18.156.830 €

Detail laufende Kosten					
	Wartung Kauf	Wartung Leasing	Betrieb Kauf	Betrieb Leasing	Leasingrate
2021	360,00 €	428,40 €	200,84 €	200,84 €	902,92 €
2022	367,20 €	428,40 €	204,86 €	204,86 €	902,92 €
2023	374,54 €	428,40 €	208,95 €	208,95 €	902,92 €
2024	382,03 €	428,40 €	213,13 €	213,13 €	902,92 €
2025	389,68 €	428,40 €	217,40 €	217,40 €	902,92 €
2026	397,47 €	428,40 €	221,74 €	221,74 €	902,92 €
2027	405,42 €	482,45 €	226,18 €	226,18 €	902,92 €
2028	413,53 €	482,45 €	230,70 €	230,70 €	902,92 €
2029	421,80 €	482,45 €	235,32 €	235,32 €	902,92 €
2030	430,23 €	482,45 €	240,02 €	240,02 €	902,92 €
2031	438,84 €	482,45 €	244,82 €	244,82 €	902,92 €
2032	447,61 €	482,45 €	249,72 €	249,72 €	902,92 €
2033	456,57 €	611,86 €	254,71 €	254,71 €	902,92 €
2034	465,70 €	611,86 €	259,81 €	259,81 €	902,92 €
2035	475,01 €	611,86 €	265,00 €	265,00 €	902,92 €
2036	484,51 €	611,86 €	270,30 €	270,30 €	902,92 €
2037	494,20 €	611,86 €	275,71 €	275,71 €	902,92 €
2038	504,09 €	611,86 €	281,22 €	281,22 €	902,92 €
2039	514,17 €	873,89 €	286,85 €	286,85 €	902,92 €
2040	524,45 €	873,89 €	292,59 €	292,59 €	902,92 €

4.5 Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Variante 1: Installation Max-Planck-Lüftung

Variante 2: Installation Lüftungsanlage

Variante 3: Installation Luftwäscher in Verbindung Fensterlüftung nach CO² Ampel

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 3
			- Kauf -	- Leasing -
Kapitalwert Schulen pro Gerät	24.983 €	19.148 €	16.150 €	29.814 €
Kapitalwert Schulen Gesamt	15.214.610 €	11.660.912 €	9.835.101 €	18.156.830 €

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 3
			- Kauf -	- Leasing -
Kapitalwert Kita pro Gerät	22.983 €	15.148 €	16.150 €	29.814 €
Kapitalwert Kita Gesamt	18.156.830 €	6.059.055 €	6.459.836 €	11.925.668 €

Fazit

Das in Variante 1 betrachtet Provisorium nach Max-Planck Lüftung ist durch die hohen Investitionskosten, für Schulen von 15,2 Millionen € und für Kindertagesstätten von 18,2 Millionen €, nicht wirtschaftlich attraktiv. Fördermittel werden für diesen provisorischen Lüftungsaufbau nicht bereitgestellt.

Die Variante 2, die Installation von dezentralen Lüftungsanlagen mit einer hohen Fördermöglichkeit und einer Investitionssumme für Schulen von 11,7 Millionen € bzw. Kindertagesstätten von 6,1 Millionen €, ist gegenüber Variante 1 deutlich attraktiver.

Der Raumluftreiniger, Variante 3, ist die wirtschaftlichste Investition. Bei Schulen beläuft sich das Investitionsvolumen auf 9,8 Millionen €, bei den Kindertagesstätten auf 6,5 Millionen €. Eine Fördermöglichkeit ist für diese Geräte nicht bekannt.

Schlussfolgerung:

Aus wirtschaftlicher Sicht ist bei Schulgebäuden die Variante 3, Raumluftreiniger, am wirtschaftlichsten. Bei Kindertagesstätten hingegen ist die Variante 2 am wirtschaftlichsten. Die Funktionalität durch die Wirkungsweise der Geräte wurde in dieser Auswertung nicht betrachtet.

5 Gutachterliche Stellungnahme

5.1 Vorbetrachtung durch Sachverständigen

Nachfolgend wird aus dem anhängigen Gutachten zitiert:

Im Zeitraum vom 02.02. bis 05.02.2021 wurden die folgenden Lüftungssysteme in den Objekten

- Südschule: Fensterlüftung, M.-P.-Anlage, Luftwäscher
- Schillerschule: vorhandenes Lüftungsgerät mit WRG
- Kita Kochstr. 4: Fensterlüftung, M.-P.-Anlage, Luftwäscher,
Vergleich Kipp- / Stoßlüftung
- Kinderheim Friedensberg: vorhandenes Lüftungsgerät mit WRG

bei bzgl. der Personenzahl teilweise eingeschränkten Nutzungsbedingungen untersucht.

Diese Untersuchungen wurden durch KIJ / Herrn Bräutigam und Herrn Müller in Anwesenheit des Schul- und Kindergartenpersonals und des Unterzeichners bei winterlichen Wetterbedingungen mit Außenlufttemperaturen zwischen +5 und +9° C durchgeführt.

Über die Dauer einer Schulstunde wurden die Aerosolkonzentration mit einem Partikelmessgerät, der CO₂-Gehalt, Raumtemperatur und -feuchte kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet.

Ergänzend wurden der Außenluftzustand und der Schalldruckpegel im Raum gemessen. Die verwendeten Messgeräte und die Randbedingungen, unter denen die Prüfungen durchgeführt wurden, sind im Prüfbericht von KIJ erläutert. Auf eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse für die analogen Lüftungssysteme in den verschiedenen Objekten wurde Wert gelegt.

Die Messergebnisse wurden in Diagrammen mit dem zeitlichen Verlauf der Messgrößen Aerosole, CO₂, Temperatur und Feuchte aufbereitet und sind dem KIJ-Prüfbericht zu entnehmen.

Aktueller Wissenstand zur Schullüftung

Der aktuelle Wissensstand zur Schullüftung unter Corona-Bedingungen kann wie folgt zusammengefasst werden:

Mit Corona infizierte Personen können Viren durch Husten, Niesen, Atmen und beim Sprechen absondern. So werden z. B. beim Husten nach Angaben der TU Berlin bis zu 287.700 Partikel freigesetzt. In Innenräumen mit Menschenansammlungen kann die Übertragung der Corona-Viren durch Tröpfcheninfektion, direkten oder indirekten Kontakt, insbesondere aber durch die Luftübertragung von Aerosolen, die aus kleinsten Tröpfchen und Partikeln bestehen, erfolgen. Aerosole als Träger der Viren können je nach Größe kleine, aber auch größere Distanzen überwinden. Für die Verteilung und Ausbreitung der luftgetragenen Aerosole spielt die Raumluftströmung eine entscheidende Rolle.

Bei der üblicherweise vorhandenen Mischlüftung in Klassenräumen wird die Zuluft mit hohem Impuls in den Raum eingebracht. Durch Induktion erfolgt eine nahezu ideale Durchmischung mit der Raumluft, was zu einer Verdünnung der Schadstoffkonzentration und gleichmäßigen Verteilung von Temperatur und Schadstoffen im Raum führt.

Im Ergebnis ist das Infektionsrisiko an jeder Stelle des Raumes gleich.

Die Verringerung des Infektionsrisikos im gesamten Raum erfordert, neben der Anordnung der Schulbänke in möglichst größerem Abstand zueinander, hohe Außenluftvolumenströme, da dadurch die Aufenthaltsdauer virenbelasteter Luft im Raum reduziert wird.

Der BTGA hält einen Außenluftstrom von 50 m³/h Person für einen in Corona-Zeiten ausreichenden Frischluftvolumenstrom, der einer Klimaqualität der Kategorie 1 nach DIN EN 16798-1 entspricht.

Nach VDI 6040 beträgt hingegen die erforderliche Frischluftrate 32 m³/h Person für einen typischen Schultag mit Pausen und 26 Schülern mit Abwesenheit in den Pausen.

Andere Quellen halten eine auf das Klassenraumvolumen bezogene Luftwechselrate von 2-3 1/h für ausreichend. Welche Außenluftmenge kontinuierlich oder in Abständen zuzuführen ist, hängt von der Art und Effizienz des gewählten Lüftungsverfahrens ab. Gradmesser für die Wirksamkeit der Lüftung ist der CO₂-Gehalt der Raumluft, der nach Möglichkeit 800 ppm nicht überschreiten sollte und mit Hilfe sog. CO₂-Ampeln auf einfache Weise sichtbar gemacht werden kann.

Niedrige CO₂-Werte als Maßstab für eine gute Raumdurchlüftung führen auch zu einer nachhaltigen Verbesserung der Aerosolkonzentration und damit zur Verringerung der Mensch- zu -Mensch- Übertragung in Innenräumen. CO₂ ist also eine korrelierende Größe zur Aerosolemission.

Corona-Viren kommen gehäuft in den Wintermonaten vor, in denen durch die geringe Raumluftfeuchtigkeit die Übertragungsraten steigen und die Abwehrreaktion der Atemwege abnimmt. Raumluftfeuchten von 40-60 % wären zur Verringerung der Anfälligkeit der Kinder wünschenswert.

Auf die Lebensfähigkeit der Viren hat die Befeuchtung indessen keinen Einfluss.

Untersuchungen ergaben auch, dass Corona-Viren bis zu 3 Stunden in der Luft und 2-3 Tage auf Raumoberflächen bei üblichen Raumbedingungen aktiv bleiben können.

Durch die Lüftung des Klassenraumes kann nur die Aerosolübertragung, nicht aber die Ausbreitung durch direkten oder indirekten Kontakt beeinflusst werden. Aufgabe der Lüftung ist hierbei ein möglichst effizienter Austausch von belasteter gegen virenfreie Luft bzw. die Abscheidung oder Inaktivierung.

Sieht man von der theoretisch möglichen, jedoch risikobehafteten Vireninaktivierung durch UV-C-Bestrahlung ab, verbleiben als grundlegende lüftungstechnische Verfahren

- der Austausch der Raumluft gegen praktisch virenfreie Außenluft durch freie oder erzwungene Strömung sowie
- die Luftreinigung mittels hochwirksamer Filter.

Beide Verfahren werden zur Eindämmung der Corona- Infektionsgefahr in Schulen und Kindergärten seit einiger Zeit einzeln oder auch kombiniert mehr oder weniger erfolgversprechend angewendet.

Es gilt als nachgewiesen, dass richtig dimensionierte und betriebene Lüftungsanlagen mit ausreichenden Frischlufttraten den beschriebenen Luftaustausch in den Klassenräumen am wirkungsvollsten sicherstellen und damit die Infektionsgefahr am besten reduzieren können.

Der Vorteil dieser Anlagen besteht in ihrer üblicherweise an den CO₂-Gehalt und die Partikelkonzentration anpassbare Luftleistung.

Ihr Nachteil sind die hohen Anschaffungskosten. Deshalb sind nur ca. 10% der Schulen und Kindergärten in Deutschland mit derartig hochwertigen Anlagen ausgestattet.

Durch das Umweltbundesamt und andere wird die natürliche oder freie Lüftung der Schul- und Kindergartenräume über die Fenster präferiert, die im Winterhalbjahr naturgemäß nur als zeitlich befristete Pausenlüftung Anwendung findet. Die allgemeingültigen Vorgaben für die Kindereinrichtungen beinhalten das Stoßlüften aller 20 Minuten mit weit geöffneten Fenstern über eine Dauer von 3-5 Minuten im Winter sowie eine Pausenlüftung nach jeder Unterrichtsstunde von 45 Minuten; nach Möglichkeit in Abwesenheit der Raumsassen.

In Anlehnung an die Arbeitsstätten-Richtlinien werden bei einseitiger Lüftung offene Fensterflächen von 0,35 m²/Person für kontinuierliche Lüftung und 1,05 m²/10 m² Grundfläche bei Stoßlüftung empfohlen.

Beim Vergleich der freien (natürlichen) mit maschinellen Lüftungssystemen schneiden letztere naturgemäß deutlich besser ab.

Untersuchungen der RWTH Aachen zufolge ergibt die Stoßlüftung als freies Lüftungssystem ein 2,5-fach erhöhtes Infektionsrisiko gegenüber einer typisch maschinellen Lüftung eines Referenzklassenraumes.

Das Infektionsrisiko bei natürlicher Querlüftung liegt nach der gleichen Quelle zwischen dem für Stoßlüftung und maschinelle Lüftung.

Die Wirksamkeit der freien Lüftung (Stoßlüftung oder kontinuierliche Lüftung) hängt von den gerade herrschenden äußeren klimatischen Bedingungen (Wind, Temperatur, Feuchtigkeit, Luftbelastung usw.) ab.

Daher kann mit ihr keine gleichmäßige Versorgung zuverlässig zu jeder Tageszeit garantiert werden, wie dies bei einer mechanischen Lüftungsanlage möglich wäre.

Darüber hinaus funktioniert die natürliche Lüftung nur bei Vorhandensein einer ausreichend großen Druckdifferenz. Auch muss bei Veränderungen im Klassenraum wie Raumteiler, Änderung der Bestuhlung u. ä. ihr Einfluss auf die Raumlüftung geprüft werden.

Für die Dimensionierung einer freien Lüftung sollten die Wärmelast, der Temperaturanstieg über die Raumhöhe als Produkt aus wirksamer Raumhöhe und Temperaturgradienten sowie die Außentemperatur bekannt sein. Damit kann die thermische Auftriebsgeschwindigkeit und mit ihr die wirksame Abluftfläche ermittelt werden. Zuluftöffnungen sind möglichst tief, Abluftflächen möglichst hoch anzuordnen. Die Luftgeschwindigkeit in den Zuluftöffnungen sollte unter 0,5 bis 1,0 m/s, bei fensternahen Sitzplätzen noch deutlich darunter liegen, um Zugerscheinungen zu mindern.

Die Orientierungswerte der ASR A 3.6- Lüftung – für eine vereinfachte Dimensionierung einer natürlichen Lüftung mit Zu- und Abluftflächen von 2% der Raumgrundfläche und einem Luftdurchsatz von ca. 10 m³/h je m² Grundfläche liegen offenbar unter den o. a. Anforderungen an eine Raumlüftung zur wirk-samen Senkung der Infektionsgefahr in Klassenräumen.

Weitere Anforderungen an freie und auch hybride Lüftungssysteme sind:

- Möglichkeit zur Verringerung der Lüftungsquerschnitte (Öffnen, Schließen des Zu- / Abluftstromes),
- Zeitsteuerung zur bedarfsweisen Anpassung der Be- und Entlüftung über die normale Nutzungszeit hinaus,
- separate Luftzufuhr für Raumbereiche mit großen Entfernungen zu Außenwänden,
- Zuluftöffnungen dort anordnen, wo unbelastete Außenluft vorhanden ist u. a. m.

Wird die Abluft mit Ventilatoren abgesaugt, ist im Besonderen zu berück-sichtigen, dass die sog. Erfassungsgeschwindigkeit mit dem Abstand vom Abluftelelement (Gitter, Schlitze, Hauben usw.) exponentiell abnimmt. Andererseits wird die Absaugwirkung der Abluftelelemente, soweit sie an der Decke oder im oberen Wandbereich angeordnet sind, durch thermischen Auftrieb unterstützt.

Dieser ist vom Temperaturgradienten über die Raumhöhe und somit vom Wärmeaufkommen in der Aufenthaltszone abhängig.

Der Temperaturgradient beträgt beim sog. „Kaltbetrieb“, auch gültig für Klassenräume, lediglich 0,5-1,0 K.

Bei der Erfassung der Abluft mittels Ablufthauben wird der aufsteigende Luftstrom durch Querströmungen gestört, wenn die Zuluft nicht impulsarm in Bodennähe zugeführt wird.

Kommt bei kombinierten Zu- und Abluftanlagen eine Wärmerückgewinnung (WRG) mittels sog. Enthalpie- Wärmetauscher in der Abluft zum Einsatz, muss beachtet werden, dass bei diesen Komponenten bauartbedingt Leckagen auftreten können.

Zur Vermeidung einer Virenverschleppung in benachbarte Räume und aus Brandschutzgründen ist bei der hier vorliegenden Nutzungsart besonderer Wert auf eine ausgeglichene Luftbilanz zwischen Zu- und Abluftvolumenströmen zu legen. Geschlossene Schulraumtüren sollten, soweit nicht ohnehin rauchdicht, in beiderlei Richtung möglichst keine Leckagen zum Druckausgleich besitzen.

Schließlich wird vielfach der Einsatz von Raumluftreinigern für die Verminderung der Virenkonzentration empfohlen. Sie können effizient Partikel aus der Luft entfernen, vorausgesetzt sie sind mit hochwirksamen HEPA- Filtern ausgestattet.

Ihre Wirksamkeit ist insofern begrenzt, als sie

- wegen der üblicherweise nicht sehr hohen Luftleistung nur eine begrenzte Grundfläche des Klassenraumes effektiv bedienen können (nur zonale Beeinflussung der Virenkonzentration);
- Luftfeuchte und CO₂ durch den reinen Umluftbetrieb nicht reduzieren können,
- die häufig von den Herstellern gepriesenen Vorzüge wie gute Raumdurch-spülung, seriöse technische Daten, nachgewiesene Wirkung usw. sich im Praxisbetrieb nicht oder nicht im zugesicherten Umfang einstellen oder nachgewiesen werden können;
- teuer in der Anschaffung sind.

Daher sollten sie ggf. nur als Ergänzung zur Lüftung mit Austausch der Raumluft gegen Außenluft eingesetzt werden, wobei dann eine exakte Anpassung an die Einsatzbedingungen notwendig ist.

5.2 Beurteilung der Untersuchungsergebnisse

Ausgewählte Schulobjekte

Messungen wurden in ausgewählten Klassenräumen der Südschule und der Schillerschule unter vergleichbaren Bedingungen hinsichtlich Personenzahl, Raumgröße und Luftwechselzahl, jedoch mit prinzipiell verschiedenen Lüftungsanlagen durchgeführt.

Im Klassenraum der Südschule wurde eine provisorische Abluftanlage in Anlehnung an die Max- Planck- Lüftungsanlage installiert, während der Raum in der Schillerschule während des Versuchs durch das vorhandene Lüftungsgerät mit WRG und Kühlung lufttechnisch versorgt wurde.

Die über eine Schulstunde gemessenen Verläufe der Aerosol- und CO_2 -Konzentration in der Raumluft sowie der Temperatur- und Feuchteverlauf weisen in beiden Klassenräumen einige Unterschiede auf.

Aerosolkonzentration

Diese weist für die Schillerschule einen weitgehend konstanten, jedoch deutlich niedrigeren Verlauf auf, während in der Südschule eine kontinuierliche Abnahme der höheren Anfangskonzentration zu verzeichnen war.

Diese erhöhte Anfangskonzentration in der Südschule scheint standortbedingt zu sein (Nähe Stadtmitte mit dichterer Wohnbebauung).

CO_2 - Konzentration

In der Schillerschule war nur ein geringer Anstieg zu verzeichnen und der Endwert nach der Schulstunde lag noch unter 700 ppm.

Demgegenüber wies der CO_2 -Verlauf in der Südschule einen beträchtlichen Anstieg in der ersten Hälfte der Schulstunde mit Maximalwerten nahe 1.000 ppm auf, um danach bis zum Ende der Messung auf unter 800 ppm abzusinken.

Temperatur und Luftfeuchte

In beiden Klassenräumen waren weitgehend konstante Verläufe mit fast identischen Istwerten zu verzeichnen.

Bewertung

Während erwartungsgemäß der CO_2 -Gehalt bei der nach der halben Unterrichtsstunde durchgeführten Stoßlüftung in beiden Fällen deutlich abnimmt, ist hierbei eine Abnahme der Partikelkonzentration nicht erkennbar gewesen.

Des weiteren wurde in der Südschule ein Luftwäscher mit H14-Filter während des Unterrichts in Kombination mit einer Fensterlüftung zur Raumluftentkeimung eingesetzt.

Bemerkenswert war hierbei dass

- Aerosol- und CO_2 - Konzentration gegenläufig zueinander verlaufen;
- die zwischenzeitliche Fensterlüftung sogar zu einer Erhöhung der Aerosolkonzentration geführt hat.

Temperatur- und Feuchteverlauf waren bei diesem Versuch ebenfalls nahezu konstant.

Der 3. Versuch in der Südschule untersuchte die Fensterlüftung nach Hygienekonzept unter üblichen Nutzungsbedingungen.

Während die CO_2 -Konzentration bis zur Zwischenlüftung mit entsprechendem Abfall und danach auch wieder erwartungsgemäß zunahm bis zu einem Endwert von über 1.000 ppm, führte die Fensterlüftung auch hier zu einem deutlichen Anstieg der Aerosolkonzentration.

CO_2 - und Aerosolkonzentration verlaufen auch hier gegenläufig zueinander.

Ausgewählte Kindergärten

In Analogie zur Südschule wurden in der Kindervilla Kochstraße 4 die 4 Luftqualitätsparameter für die M.- P.- Abluftanlage, den Luftwäscherbetrieb sowie die Fensterlüftung nach Lüftungskonzept messtechnisch ermittelt und ebenfalls aufgezeichnet.

Der Vergleich der M.-P.-Lüftungs-Diagramme für die Kindervilla und die Südschule weist ähnliche Verläufe auf mit CO_2 -Maximalwerten über bzw. nahe 1.000 ppm sowie abermals gegenläufigem Verlauf der Aerosol- und CO_2 -Konzentrationen.

Bei deutlich höherer Anfangskonzentration in der Kindervilla erfolgt aber in beiden zu vergleichenden Räumen eine allmähliche Reduzierung der Aerosole durch den Betrieb der M.- P.- Abluftanlagen.

Auch der Vergleich des Luftwäscherbetriebs für die Versuchsräume der Kinder-villa und der Südschule weist weitgehende Übereinstimmungen auf; bei aber-mals entgegengerichteten Verläufen der Aerosol- und CO_2 -Konzentrationen.

In beiden Räumen wurden die CO₂-Konzentration 1.000 ppm zum Ende der Versuche überschreiten.

Betrachtet man den Verlauf der Aerosolkonzentration bei der Fensterlüftung nach Hygienekonzept in der Kindervilla, so ergibt sich für den 2. Abschnitt der Messungen ein Gleichlauf von Aerosol- und CO₂-Konzentration.

Letztere übersteigt mehrfach den Wert von 1.000 ppm.

Raumtemperatur und -feuchte weisen bei allen drei Lüftungsverfahren über die Messdauer weitgehend übereinstimmende Werte und konstante Verläufe auf.

Analog zu den Schulen wurde mit dem Sportraum im Kinderheim am Friedensberg ein Vergleichsobjekt zur Kindervilla untersucht, das hier mit einem KWL- Lüftungsgerät ausgestattet ist.

Aerosol- und CO₂-Konzentrationen weisen einen ähnlichen Verlauf wie der ebenfalls mit einem Lüftungsgerät ausgestattete Klassenraum in der Schillerschule auf mit nur allmählich ansteigendem CO₂-Gehalt mit Endwerten unter 800 ppm sowie nahezu konstanten Verlauf der Aerosolkonzentration.

Bewertung

Aerosol- und CO₂-Konzentrationen können sich bei den verschiedenen Lüftungsverfahren sowohl gleich als auch gegenläufig zueinander verhalten. Die relative Luftfeuchtigkeit und auch die Raumtemperaturen zeigten bei den Versuchen einen bemerkenswert konstanten Verlauf. Die CO₂-Werte liegen beim KWL-Lüftungsgerät deutlich unter denen der M.-P.-Abluftanlage und auch der Fensterlüftung nach Lüftungskonzept.

In einem separaten Versuch in der Kindervilla wurde die deutlich höhere Wirksamkeit der Stoßlüftung auf die Senkung der CO₂-Konzentration gegenüber der Kipplüftung messtechnisch nachgewiesen.

5.3 Schlussfoggerungen und Empfehlungen

1. Die vielfach vertretene Auffassung, wonach CO₂ eine korrelierende Größe zur Aerosolemission ist, konnte in den Versuchen nicht eindeutig nachgewiesen werden.
2. Wiederholt war eine Senkung der CO₂-Konzentration bei Fensterlüftung mit einer Zunahme der Partikel in der Raumluft verbunden (störender Einfluss des Partikeleintrages von außen).
3. Die Partikelzunahme nach der Stoßlüftung muss insofern nicht mit einer Erhöhung der Virenanzahl bzw. des Infektionsrisikos verbunden sein, da Außenluft als praktisch virenfrei gilt.
4. Die vom Max-Planck für seine Abluftanlage propagierte 90%ige Entfernung der Aerosole konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden.
5. Versuche in der Südschule und Kindervilla ergaben über den Messzeitraum eine nur leicht sinkende Aerosolkonzentration.
6. Mit dem Luftwäscher war in allen Fällen eine deutliche Senkung der Aerosolkonzentration mit Hilfe des Partikelmessgerätes feststellbar, wobei die gemessene Partikelkonzentration keinen sicheren Aufschluss über die Virenbeladung der Raumluft liefert.

