

#### Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung, Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

#### Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht 012/2021

# Guidance Paper Auswahl geeigneter Raumluftreiniger

Durchgeführt im Auftrag von Dr. Tim van der Graaf Innovation Team Home Care Royal Philips P.O. Box 201 9200 AE Drachten Niederlande

Der Bericht umfasst 25 Seiten Text 8 Tabellen 3 Abbildungen

Dr. Ing. Christian Scherer

Valley, 12. März 2021

Abteilungsleiter

Stv. Abteilungsleiterin

Dr. Ing. Christian Scherer

Dr. rer. nat. Andrea Burdack-Freitag

# Inhalt

1	Executive Summary	3
2	Einleitung	4
3.1 3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.3 3.4	Luftreinigungstechnologien Mechanische Lüftungsanlagen oder raumlufttechnische (RLT) Mobile Filtrationsgeräte Filtrationsgeräte mit Hochleistungs-Schwebstofffiltern Filtrationsgeräte mit Elektretfiltern Filtrationsgeräte mit Aktivkohlefiltern UVC Plasma- und Ionisationsgeräte	<b>8</b> Anlagen 8 8 8 9 9
<b>4</b> 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	Empfehlungen Erforderlicher Luftdurchsatz Abscheide-/Inaktivierungsleistung Mobile Filtrationsgeräte Energie- und Platzbedarf Wartung Benötigte Informationen	10 12 12 12 12 12 13 13
5	Schulbau in Deutschland	16
<b>6</b> 6.1	Anforderungen an die Hygiene in Klassenräumen Raumluftqualität	<b>17</b> 17
<b>7</b> 7.1 7.2 7.3 7.4	Innenraumhygiene in deutschen Schulen Kohlendioxid Mikrobiologische Belastung Infektionsschutz Raumakustik	20 20 21 21 21
8	Literatur	23

# 1 Executive Summary

### Mobile Luftreiniger:

- senken die Grundbelastung mit möglicherweise virenbelasteten Aerosolpartikeln im Raum. Die Clean Air Delivery Rate (CADR) ist die maßgebliche Größe zur Beschreibung der Abscheideleistung eines Filtrationsgerätes, nicht die Filterklasse. Die CADR gibt das Luftvolumen an, das pro Stunde gereinigt wird. Der durch mobile Luftreiniger soll ein Mehrfaches des Raumvolumens pro Stunden betragen. Empfohlen wird ein CADR-Wert von 3 6 Raumvolumina pro Stunde. Zur Reinigung des identischen Luftvolumens benötigen Luftreiniger mit Hochleistungs-Schwebstofffiltern (HEPA H13 oder H14) mehr elektrische Energie und erzeugen ein höheres Betriebsgeräusch als Geräte mit Elektretfiltern. Bei der Auswahl von Luftreinigern für den Einsatz in Schulen ist die Abscheideleistung (CADR) bei 40 dB(A), dem maximalen Geräuschpegel für Unterrichtsräume, maßgeblich. Das Betriebsgeräusch soll konzentriertes Arbeiten während des Unterrichts nicht stören.
- können dazu beitragen, dass der thermische Komfort im Unterrichtsraum erhalten bleibt und die Konzentration an Aerosolpartikeln trotzdem möglichst niedrig gehalten wird.
- die mit Plasma, Ionisation oder UVC-Strahlung arbeiten, können Viren und andere Mikroorganismen effektiv inaktivieren. Sie können aber auch unerwünschte Nebenprodukte erzeugen. Sollten solche aktiven Technologien in Betracht gezogen werden, empfiehlt es sich, unabhängige Experten hinzuzuziehen oder Beratungsstellen zu kontaktieren. Zur Beurteilung der Produkteigenschaften und zur Interpretation der Unterlagen und Werbeaussagen ist Fachwissen unumgänglich. Dies gilt auch für Kombinationsgeräte mit Filtration. Für reine Filtrationsgeräte ist dies nicht der Fall. Sie können anhand des in diesem Papier skizzierten Entscheidungspfads ausgewählt werden.
- sollen während der Unterrichtszeit kontinuierlich betrieben werden. Sie sollten bereits vor Unterrichtsbeginn gestartet werden.
- müssen so aufgestellt werden, dass sie die Luft frei ansaugen und die gereinigte Luft frei in den Raum abgeben können. Ein Kurzschluss (direktes Ansaugen gereinigter Luft) muss vermieden werden.
- müssen regelmäßig gewartet werden. Dies sollte z. B. vom Hausmeister anhand der Bedienungsanleitungen durchführbar sein.
- können keine direkte Infektion z. B. durch Banknachbarn verhindern.
- ersetzen keine Frischluftzufuhr, denn sie können weder die Kohlendioxidkonzentration verringern, noch sonstige unerwünschte Stoffe (z. B. VOC, Bio-Effluenten) aus dem Raum entfernen.

Auch beim Einsatz mobiler Luftreiniger kann nicht auf die Einhaltung der Hygieneregeln (AHA+L) verzichtet werden!

### 2 Einleitung

Schulbaurichtlinien und -empfehlungen deutscher Bundesländer legen für die Größe von Unterrichtsräumen häufig eine Grundfläche von 60 m² bei einer Raumhöhe von 3 m fest (z. B. [1] - [4]). Um bei einer Belegung mit 30 Schülerinnen und Schülern eine hygienisch ausreichende Innenraumluftqualität sicherzustellen, ist damit ein fünf- bis sechsfacher Luftwechsel pro Stunde notwendig. Dieser Luftwechsel wird als nötig erachtet, um die Kohlendioxidkonzentration im Stundenmittel unter 1000 ppm zu halten und die Nutzungsfeuchte sowie die flüchtigen organischen Verbindungen aus der Innenraumluft zu entfernen ([5], [6]).

Die Mehrzahl der Schulen in Deutschland ist nicht mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet. Der notwendige Mindestluftwechsel ist zwar meist prinzipiell mittels Fensterlüftung erreichbar, doch zeigen Studien, dass die Luftqualität in Unterrichtsräumen häufig hygienisch nicht akzeptabel ist ([7] - [10]). Die Lüftungsintervalle, die bei Fensterlüftung für eine hygienisch akzeptable Innenraumluftqualität notwendig wären, können aus baulichen, Sicherheits-, Komfort- oder Lärmschutzgründen häufig nicht eingehalten werden.

Die Kommission Innenraumlufthygiene am Umweltbundesamt priorisiert eindeutig die Erhöhung der Außenluftzufuhr, da mit dieser Maßnahme alle hygienisch relevanten Parameter im Unterrichtsraum positiv beeinflusst werden können: die Nutzungsfeuchte, die Kohlendioxidkonzentration und die Konzentrationen an infektiösen Aerosolen, an flüchtigen organischen Verbindungen sowie an Bio-Effluenten ([5], [6], [11], [12], [13]).

Um während der andauernden SARS-CoV-2 Pandemie eine Öffnung der Schulen wieder zu ermöglichen und die Infektionsgefahr durch Aerosolpartikel zu begrenzen, können deshalb weitergehende technische Maßnahmen nötig sein. In den Fällen, in denen eine Erhöhung der Außenluftzufuhr nicht möglich ist, können mobile Luftreiniger dazu beitragen, die Konzentration an infektiösen Aerosolen und somit das Infektionsrisiko durch virushaltige Aerosolpartikel in Unterrichtsräumen zu verringern. ([14] - [17]).

Für die Verringerung der Konzentration an infektiösen Aerosolpartikeln werden mobile Luftreiniger mit unterschiedlichen Technologien angeboten. Neben Filtrationsgeräten, die virenhaltige Aerosolpartikel aus der Raumluft entfernen, finden sich am Markt auch Geräte, die Viren mittels UVC-Bestrahlung, Ionisierung, Plasma- oder Ozonbehandlung inaktivieren. Eine Zusammenfassung über Wirkung und Effektivität findet sich in [18]. Da bei der Inaktivierung unerwünschte Nebenprodukte entstehen können, sind diese Geräte teilweise mit nachgeschalteten Einrichtungen, z. B. Aktivkohlefiltern ausgestattet, die wiederum diese Nebenprodukte aus dem Abluftstrom entfernen.

Für die Wirkung eines Filtrationsgerätes auf die Aerosolkonzentration in der Raumluft ist nicht die Abscheiderate der Filtermedien alleine maßgebend, sondern die sog. Clean Air Delivery Rate (CADR). In dieser Kenngröße sind Abscheideleistung und Luftdurchsatz zusammengefasst ([14], [17], [18], [19]). Eine hohe CADR wird mit hochwertigen Filtern bei einem hohen Luftdurchsatz pro Stunde erreicht. Dafür sind nicht zwangsläufig Filter der Filterklasse HEPA H13 oder H14 [20] notwendig. Sogenannte Elektret-Filter erreichen ebenfalls hohe CADR-Werte, benötigen weniger Energie und erlauben den Bau kompakter Geräte [17].

Für eine Verwendbarkeit eines mobilen Luftreinigers in Unterrichtsräumen ist der Geräuschpegel eine wichtige Größe. Luftreiniger, die für Unterrichtsräume geeignet sind, sollen 40 dB(A) bei der benötigten CADR nicht überschreiten ([21], [22]).

Infobox 1	Luftreinigungstechnologien und Fachbegriffe
Aerosolpartikel	Ein Aerosol ist physikalisch gesehen ein heterogenes Gemisch aus Partikeln zusammen mit dem sie umgebenden Gas oder Gasgemisch. Die luftgetragenen Partikel können sowohl Feststoffe wie z.B. Ruß oder Mineralstaub als auch flüssige Tropfen sein. [17] Die häufig anzutreffende Unterscheidung zwischen Tröpfchen (Durchmesser > 5 $\mu$ m) und Aerosolpartikeln (Durchmesser < 5 $\mu$ m) ist physikalisch nicht gerechtfertigt. Je kleiner die Aerosolpartikel sind, umso länger verweilen sie in der Luft bevor sie zu Boden sinken.
AHAM	<b>A</b> ssociation of <b>H</b> ome <b>A</b> ppliance <b>M</b> anufacturers: Vereinigung von Haushaltsgeräteherstellern in den USA. Die AHAM hat ein Prüfverfahren zur Bestimmung der CADR entwickelt [19].
Clean Air Delivery Rate	Die Clean Air Delivery Rate (CADR) beschreibt die Leistungsfähigkeit eines Luftreinigers. Sie wird üblicherweise unter Laborbedingungen in einer Prüfkammer bei maximaler Lüfterleistung ermittelt und ist das Produkt aus Filtrationseffizienz des Filtermediums und Luftdurchsatz durch das Filtermedium. Leckageströme werden vom Luftdurchsatz abgezogen. Hat ein Filter eine Abscheiderate von 90 % und beträgt der Luftdurchsatz durch das Gerät 1000 m³/h, so beträgt die CADR 900 m³/h. Ein Gerät mit einem Luftdurchsatz von 950 m³/h und einer Abscheiderate von 95 % erreicht dieselbe CADR [19].
Elektretfilter	Die Filterfasern tragen eine elektrische Ladung, sind also elektrostatisch aufgeladen. Damit wird eine höhere Abscheideeffizienz bei geringerem Druckabfall gegenüber einem reinen Filtervlies (non-woven) erreicht. Die elektrostatische Aufladung und damit die Filtrationseffizienz nimmt über die Zeit ab [17].
H13	Filterklasse für HEPA-Filter nach EN 1822-1:2019 [20]
H14	Filterklasse für HEPA-Filter nach EN 1822-1:2019 [20]
HEPA-Filter	High-Efficiency Particulate Air/Arrestance: Schwebstofffilter; Der Begriff "HEPA" gibt keine Filtrationseffizienz für Aerosolpartikel an. Die Leistungsfähigkeit eines Filters wird durch die Filterklasse beschrieben. Angegeben wird die Filtrationseffizienz bei der MPPS, der Partikelgröße, für die das Material der Men

terial den geringsten Abscheidegrad aufweist [20].

Die Filtrationseffizienz des Filtermediums alleine lässt keine Aussage über die Leistungsfähigkeit eines mobilen Luftreinigers zu. Die Reinigungsleistung eines Filtrationsgeräts wird durch die Clean Air Delivery Rate (siehe CADR) beschrieben.

Infobox 1	Luftreinigungstechnologien und Fachbegriffe
lonisations-/ Plasma- technologie	Durch Energiezufuhr werden bei Ionisations- oder Plasmageräten hochreaktive Spezies gebildet. Diese können rekombinieren und mit anderen Stoffen, z. B. der Lipidhülle eines Virus, reagieren. Neben der Inaktivierung von Mikroorganismen kann die Ionisations-/Plasmatechnologie zur Bildung von Ozon, Stickoxiden, Formaldehyd oder unerwünschten Geruchsstoffen führen [23].
IRK	Kommission Innenraumlufthygiene des Umweltbundesamtes
MPPS	Most Penetrating Particle Size: Partikelgröße, für die das Filtermaterial den geringsten Abscheidegrad aufweist.
Non-woven	Bezeichnung für Filtervliese. Die Fasern des Filters sind nicht gewebt. Je dichter die Vliese sind, umso besser ist ihre Filtrationseffizienz, umso höher ist aber auch der Durchlasswiderstand. Mit der Zeit nimmt durch die angelagerten Partikel die Filtrationseffizienz der Filtervliese zu. Gleichzeitig steigt aber auch der Durchlasswiderstand.
Ozon	Ozon (O₃) ist ein dreiatomiges, sehr reaktives, gasförmiges Sauerstoffmole- kül. Ozon ist in der Lage mit Bestandteilen von Mikroorganismen zu reagie- ren und diese damit zu deaktivieren. Ozon ist aber gleichzeitig reizend für die Atemwege. Ozon reagiert auch mit vielen VOC zu zum Teil uner- wünschten weil reizenden Nebenprodukten.
Ozonisierung	Inaktivierung von Mikroorganismen mittels Ozon. Bei mobilen Luftreinigern, die mit Ozonisierung arbeiten, muss sichergestellt sein, dass vom Luftreiniger kein Ozon in die Umgebungsluft abgegeben wird.
RLT/RLT-Anlagen	RaumLuftTechnik, raumlufttechnische Anlagen
UVC	Ultraviolettes Licht im Wellenlängenbereich 100 – 280 nm Ultraviolettes Licht in diesem Wellenlängenbereich kann Mikroorganismen inaktivieren.
VOC	Volatile Organic Compounds: Flüchtige organische Verbindungen.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

# Infobox 2 Leistungskriterien für die Auswahl von mobilen Luftreinigern

CADR	<ul> <li>Clean Air Delivery Rate: <ul> <li>Unter Laborbedingungen ermittelte Leistungsfähigkeit eines Luftreinigers.</li> <li>Angabe welches Luftvolumen von Aerosolpartikeln befreit wurde.</li> <li>Die CADR ist das Produkt aus Filtrationseffizienz und Luftdurchsatz.</li> <li>Die CADR der in Unterrichtsräumen eingesetzten Luftreiniger sollte bei einem Betriebsgeräusch von max. 40 dB(A) ein Mehrfaches des Raumvolumens pro Stunde betragen.</li> <li>Die Angabe der CADR erfolgt im europäischen Raum in m³/h.</li> </ul> </li> </ul>
Geräuschentwicklung	<ul> <li>Die Geräuschentwicklung durch Geräte im Dauerbetrieb sollte in einem Unterrichtsraum 40 dB(A) nicht überschreiten.</li> <li>Bei der Geräuschentwicklung ist zu berücksichtigen, dass die CADR üblicherweise bei maximaler Leistung bestimmt wird.</li> </ul>
Luftdurchsatz	<ul> <li>Luftvolumen, das pro Zeiteinheit durch das Filtermedium in einem Luftreiniger geführt wird. Die Angabe erfolgt meist in m³/h.</li> </ul>
Luftwechsel/Lüftung	<ul> <li>Ein mobiler Luftreiniger ersetzt keinen Luftwechsel. Kohlendioxid, Nutzungsfeuchte und flüchtige organische Verbindungen (VOC) können nur durch Lüftung aus dem Raum entfernt werden.</li> <li>Mobile Luftreiniger können aber Aerosolpartikel sehr effektiv aus der Luft entfernen.</li> </ul>

# 3 Luftreinigungstechnologien

Für die Behandlung von Innenraumluft mit mobilen Luftreinigern stehen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Verfügung, die Filtration und aktive Technologien. Filtrationsgeräte saugen die Innenraumluft an, leiten sie durch das Filterelement und geben die gereinigte Luft wieder an die Umgebung ab. Aerosolpartikel werden dabei auf dem Filtermedium abgeschieden. Aktive Technologien behandeln die durchströmende Luft mit UVC-Strahlung, Plasmaentladung oder Ionisation und inaktivieren dadurch die in den Aerosolpartikeln enthaltenen Mikroorganismen und Viren. Die Aerosolpartikel werden aber nicht zwangsläufig aus der Raumluft entfernt.

# 3.1 Mechanische Lüftungsanlagen oder raumlufttechnische Anlagen (RLT)

Die effektivste Methode, die Aerosolpartikelkonzentration in einem Raum zu senken, besteht in der Verdünnung. Durch die Einleitung von praktisch virenfreier Außenluft wird ein Teil der Luft im Raum verdrängt und damit die Konzentration an Aerosolpartikeln wirkungsvoll verringert. Gleichzeitig werden Kohlendioxid, Nutzungsfeuchte und flüchtige organische Verbindungen aus der Innenraumluft entfernt. RLT-Anlagen sollen dabei so ausgelegt sein, dass sie möglichst ausschließlich Frischluft, also Außenluft zuführen und die Luft nicht rezirkulieren. Ist eine Rezirkulation nicht zu vermeiden, muss der rezirkulierte Anteil z. B. mittels Hochleistungs-Schwebstofffiltern oder Hochleistungs-Partikelfiltern [20] von potenziell virenhaltigen Aerosolpartikeln befreit werden. Unter energetischen Gesichtspunkten ist die ausschließliche Versorgung mit Außenluft gerade im Winter problematisch, muss diese doch mit Energieeinsatz auf die gewünschte Raumtemperatur gebracht werden. Durch die Verwendung von Wärmetauschern kann der Energieverlust reduziert werden. RLT-Anlagen benötigen für den Betrieb elektrische Energie und müssen gewartet werden, denn die Außenluft muss zwar nicht mit Hochleistungs-Schwebstofffiltern gereinigt werden, Pollen und gröbere Staubpartikel müssen aber dennoch abgeschieden werden.

# 3.2 Mobile Filtrationsgeräte

Mobile Filtrationsgeräte können Aerosolpartikel aus der Innenraumluft entfernen. Filtrationsgeräte arbeiten im Umluftbetrieb, d. h. sie saugen Raumluft an und geben die gereinigte Luft wieder in den Raum ab. Die Konzentration an Aerosolpartikeln kann durch Filtrationsgeräte wirksam reduziert werden, wenn ihr Luftdurchsatz ein Mehrfaches des Raumvolumens pro Stunde beträgt.

Die Leistungsfähigkeit von Filtrationsgeräten wird durch die Clean Air Delivery Rate (CADR) ausgedrückt. Hochleistungs-Schwebstofffilter [20] oder Elektretfilter [17] sind in der Lage, mit SARS-CoV-2 beladene Aerosolpartikel effektiv abzuscheiden. Hochleistungs-Partikelfilter sind ebenfalls für eine effiziente Luftreinigung geeignet ([16], [20]).

Maßgeblich für die Leistungsfähigkeit von mobilen Filtrationsgeräten ist jedoch weniger die Filterklasse der verwendeten Filtermaterialien als vielmehr die Clean Air Delivery Rate (CADR).

#### 3.2.1 Filtrationsgeräte mit Hochleistungs-Schwebstofffiltern

Schwebstofffilter werden zur Entfernung von Staubpartikeln seit langer Zeit eingesetzt. Die Abscheideleistung der Filtermaterialien beträgt mindestens 99,95 % beim Nennvolumenstrom des Filters. Die Effizienz wird durch ein entsprechend dichtes Filtervlies erreicht. Mit steigender Dichte des Filtervlieses steigen der Druckverlust, der Energieaufwand [17] und der Geräuschpegel. Durch die auf dem Vlies abgeschiedenen Partikel nimmt die Filtereffizienz mit der Zeit zu. Gleichzeitig steigt aber der Druckverlust. Sobald der Druckverlust einen vorgegeben Wert erreicht hat, muss die Filtereinheit gewechselt werden. Trotz einer hohen Abscheideleistung der Filtermaterialien erreichen Luftreiniger mit Hochleistungs-Schwebstofffiltern (HEPA) bei einem Geräuschpegel von 40 dB(A) aufgrund des großen Druckverlusts häufig nur relativ geringe CADR-Werte.

#### 3.2.2 Filtrationsgeräte mit Elektretfiltern

Die Filtermaterialien dieser Filtrationsgeräte tragen eine elektrische Ladung. Da ein Teil der luftgetragenen Partikel ebenfalls eine elektrische Ladung trägt, lassen sich diese mit einer hohen Effizienz aus der Luft entfernen. Ungeladene Partikel können im Inneren des Filters durch Wechselwirkung mit den Ladungsträgern auf den Fasern polarisiert werden. Diese polarisierten Partikel werden dann ebenfalls an den geladenen Fasern abgeschieden. Elektretfilter finden dort Anwendung, wo ein hoher Druckverlust vermieden werden soll ([14], [17]). Die Filtrationseffizienz von Elektretfiltern nimmt mit der Betriebsdauer nicht zu, da die Filter mit der Zeit entladen werden und ein Teil der Filterwirkung auf der elektrischen Ladung beruht. Da die Wiederaufladung des Filtermaterials bislang nicht möglich ist, muss auch ein Elektretfilter nach einer gewissen Betriebsdauer ersetzt werden.

Filtrationsgeräte mit Elektretfiltern können aufgrund des geringeren Druckabfalls höhere CADR-Werte bei niedrigerem Geräuschniveau und kompakteren Gehäusen erreichen.

#### 3.2.3 Filtrationsgeräte mit Aktivkohlefiltern

Filtrationsgeräte, die nur mit Aktivkohlefiltern ausgerüstet sind, entfernen praktisch keine Aerosolpartikel aus der Innenraumluft, sondern nur Gase. Für die Reduzierung der potenziellen Virenlast sind sie nicht geeignet.

#### 3.3 UVC

Luftreiniger auf der Basis von UVC-Strahlung entfernen keine Viren aus der Innenraumluft. UVC-Strahlung ist aber in der Lage, Viren wie z. B. SARS-CoV-2 zu inaktivieren. Maßgeblich für die Inaktivierung von Viren in der Luft sind die Verweildauer der Viren im Strahlungsbereich und die dort herrschende Strahlungsintensität. Für diese Parameter sind bislang noch nicht ausreichend experimentelle Daten vorhanden. Für die Desinfektion von Oberflächen wird UVC-Strahlung seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt.

Je nach Qualität der UVC-Quelle können UVC-Geräte Ozon erzeugen, das wiederum mit anderen Stoffen in der Innenraumluft reagieren kann. UVC-Strahlung kann Augen und Haut schädigen. Deshalb ist sicherzustellen, dass die UVC-Strahlung nicht aus dem Gerät austreten kann und das Gerät gegen Öffnen im Betrieb gesichert ist. In ihrer Stellungnahme empfiehlt die Kommission Innenraumlufthygiene (IRK) am Umweltbundesamt [12], sich vom Hersteller Nachweise über die Wirksamkeit und die Betriebssicherheit aushändigen zu lassen. Die dafür notwenigen Prüfungen sollten von einer unabhängigen Stelle durchgeführt worden sein.

# 3.4 Plasma- und Ionisationsgeräte

Als Plasmaquellen kommen verschiedene elektrische Entladungsvarianten zum Einsatz, wie Corona-, Mikrowellen-, Gleitlichtbogen- und dielektrische Barriere-Entladung. Im Plasma sind hochreaktive Radikale, Molekül- und Radikalionen enthalten, die mit den Zell- oder Capsoid-Bestandteilen der Mikroorganismen und Viren reagieren und diese damit schädigen oder zerstören. Plasma-Luftreiniger können also virushaltige Aerosolpartikel mit einer hohen Effizienz inaktivieren Ein Nachteil der Plasmatechnologie ist, dass Plasmageräte Begleitstoffe wie z. B. Ozon, Stickoxide oder Formaldehyd erzeugen ([18], [23]), die wiederum mit anderen Stoffen in der Raumluft reagieren und zur Bildung weiterer, unerwünschter Stoffe führen können. Häufig werden deshalb Aktivkohlefilter der Behandlungseinheit nachgeschaltet, um die Begleitstoffe aus der Abluft zu entfernen.

# 4 Empfehlungen

Ist aus baulichen oder aus Sicherheitsgründen eine Erhöhung des Luftwechsels nicht möglich und ist auch der Einbau zusätzlicher Lüftungseinrichtungen keine Option, bietet es sich an, die Belegung zu reduzieren bzw. zur Unterstützung der Lüftung mobile Luftreinigungsgeräte einzusetzen ([12], [11]). Mobile Luftreinigungsgeräte können Keime durch Filtration mechanisch abscheiden oder mithilfe von UVC-Strahlung, Plasma oder Ionisation deaktivieren. Luftreinigungsgeräte tragen nicht zum Abbau von flüchtigen organischen Verbindungen oder zum Abtransport von Nutzungsfeuchte oder Kohlendioxid bei. Auf eine ausreichende Lüftung kann auch beim Einsatz von Luftreinigungsgeräten nicht verzichtet werden. Luftreinigungsgeräte benötigen einen Stromanschluss und müssen regelmäßig gewartet werden. Je nach Wirkprinzip (UVC, Plasma oder Ionisation) müssen diese Geräte auch gegen unbefugtes Öffnen und gegen Manipulationen gesichert sein.

Mobile Luftreiniger können keine direkte Infektion von Person zu Person (z. B. Banknachbarn ohne Mund-Nasen-Bedeckung) verhindern. Sie können aber das Infektionsrisiko in einem Raum durch die Reduzierung der Konzentration an virushaltigen Aerosolpartikeln senken.

Der Entscheidungspfad für oder gegen den Einsatz mobiler Luftreiniger ist in Bild 1 dargestellt.

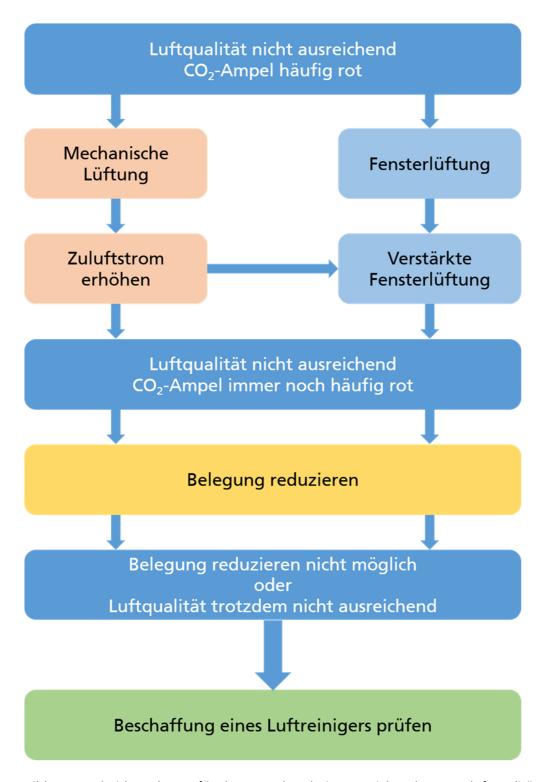


Bild 1: Entscheidungsbaum für das Vorgehen bei unzureichender Raumluftqualität als Beurteilungsparameter. Für die Luftqualität wird, da mit einer Lüftungs- oder CO2-Ampel einfach zu ermitteln, die Kohlendioxidkonzentration im Unterrichtsraum herangezogen.

#### 4.1 Erforderlicher Luftdurchsatz

Mobile Luftreiniger saugen Raumluft an, verringern den Gehalt an Aerosolpartikeln oder inaktivieren in der Raumluft enthaltene Viren und Mikroorganismen und gegen die behandelte Luft wieder in den Raum ab. Forschungsarbeiten [15] und das Umweltbundesamt ([11], [12]) empfehlen deswegen bei mobilen Luftreinigern einen Luftdurchsatz von bis zu 6 Raumvolumina pro Stunde. Dieser Luftdurchsatz ist nicht mit dem Luftwechsel bei der freien oder mechanischen Lüftung gleichzusetzen, da mit mobilen Luftreinigern keine sonstigen Stoffe wie VOC, Kohlendioxid oder Nutzungsfeuchte abgeführt werden.

# 4.2 Abscheide-/Inaktivierungsleistung

Bei der Auswahl der Geräte und der Ermittlung der notwendigen Geräteanzahl ist zu berücksichtigen, dass bei filtrierenden Geräten die Leistungsfähigkeit eines mobilen Luftreinigers in Form der sog. Clean Air Delivery Rate (CADR) [19] angegeben wird. Die CADR, also das Produkt aus Luftdurchsatz und Filtrationseffizienz, wird im standardisierten Laborversuch für Aerosole (Rauch, Staub, Pollen) im Größenbereich von 0,09 µm bis 11 µm bei der maximalen Leistung eines Luftreinigers ermittelt und gibt das Luftvolumen an, das innerhalb einer festgelegten Zeit von Aerosolen gereinigt wurde. Bei maximaler Leistung liegt insbesondere bei Filtrationsgeräten mit Schwebstofffiltern das Betriebsgeräusch meist über den vom Umweltbundesamt empfohlenen 40 dB(A) [12]. Es empfiehlt sich daher, grundsätzlich bei den Herstellern die CADR für unterschiedliche Leistungsstufen des Luftreinigers anzufragen. Die Luftreiniger müssen bei einem unterrichtsverträglichen Dauerschallpegel (z. B. 40 dB(A)) die benötigte CADR erbringen. Eine geringfügig niedrigere Filtrationseffizienz gepaart mit einem höheren Luftdurchsatz bei einer geringeren Geräuschentwicklung kann hier vorteilhafter sein als eine höhere Filtrationseffizienz bei geringerem Luftdurchsatz und höherem Betriebsgeräusch.

Für Luftreiniger, die nicht abscheidend, sondern inaktivierend wirken, sind bislang keine standardisierten Testverfahren etabliert. Nichtsdestotrotz können auch diese mobilen Luftreiniger das Infektionsrisiko durch die Inaktivierung der in den Aerosolpartikeln enthaltenen Viren effektiv senken.

# 4.3 Mobile Filtrationsgeräte

Sollte der Einsatz von Luftreinigungsgeräten unumgänglich sein, empfiehlt das Umweltbundesamt Luftreinigungsgeräte, die einen Luftdurchsatz bis zum Sechsfachen des Raumvolumens pro Stunde liefern ([12], [15]). Ggf. kann dies nur durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Geräte in einem Raum erreicht werden. In diesem Zusammenhang ist zu bedenken, dass auch das Betriebsgeräusch mit der Anzahl der eingesetzten Geräte zunimmt. Das Betriebsgeräusch durch technische Einrichtungen soll in Unterrichtsräumen nicht über 40 dB(A) liegen [12]. Im "Schulleitfaden" des Umweltbundesamts wird der maximale Schalldruckpegel (Summenpegel, LA, F) in Unterrichtsräumen, verursacht durch Installationen, haustechnische und sonstige Anlagen im Schulgebäude mit 30 [dB(A)] angegeben [21].

# 4.4 Energie- und Platzbedarf

Mobile Luftreiniger benötigen unabhängig von ihrem Wirkprinzip elektrische Energie und Aufstellfläche. Mobile Luftreiniger müssen über die gesamte Unterrichtsdauer in Betrieb sein. Die Elektroinstallation muss in den betroffenen Räumen dahingehend überprüft werden, ob sie für eine solche Dauerbelastung ausgelegt ist. Ggf. ist die Elektroinstallation zu ertüchtigen.

Im Vorfeld der Beschaffung und der Aufstellung ist außerdem zu klären, wo im Raum die mobilen Luftreiniger aufgestellt werden sollen. Einen wesentlichen Beitrag zur Risikominimierung liefern diese Geräte nur, wenn sie quellnah, also in der Nähe der Raumnutzer aufgestellt werden. Zudem ist sicherzustellen, dass es aufgrund der Aufstellsituation zu keinem "Kurzschluss" in der Luftführung kommt, der Luftreiniger also nicht die soeben gereinigte Abluft sofort wieder ansaugt.

# 4.5 Wartung

Mobile Luftreiniger müssen regelmäßig gewartet werden. Bei Filtrationsgeräten sind die Filter zu tauschen, bei Geräten, die mit UVC-Strahlung arbeiten, müssen in regelmäßigen Abständen die Strahlungsquellen und ggf. die Grobfilter ausgetauscht werden. Es ist von Vorteil, wenn die Wartung von hauseigenem Personal durchgeführt werden kann.

# 4.6 Benötigte Informationen

Vor der Entscheidung über die Beschaffung von mobilen Luftreinigern sollten folgende Daten vorliegen:

- Benötigte CADR in Abhängigkeit von der Raumgröße
- CADR des Luftreinigers bei einem Betriebsgeräusch von max. 40 dB(A)
- Betriebsgeräusch in Abhängigkeit von der CADR
- Energieverbrauch und Stromaufnahme
- Platzbedarf
- Standzeit der Filter bzw. der Strahlungsquellen
- Verwendete Wellenlänge
- Kosten der regelmäßig zu tauschenden Komponenten
- Intervalle für die Wartung durch den Hersteller oder einen Beauftragten des Herstellers
- Bei inaktivierenden Luftreinigern (UVC, Ionisation, Plasma)
  - o Prüfbericht eines unabhängigen Forschungs- oder Prüfinstituts der mindestens enthält
    - Bewertung hinsichtlich der Sicherungseinrichtungen, die einen Austritt von UVC-Strahlung verhindern
    - Bewertung hinsichtlich der Gerätelautstärke
    - Nachweis, dass keine unerwünschten Stoffe (z. B. Ozon, VOC, Formaldehyd, etc.) gebildet werden
    - Bewertung der Wirksamkeit des eingesetzten Verfahren gegenüber Viren und Mikroorganismen
    - die Beschreibung der Testverfahren, mit denen die o. g. Eigenschaften nachgewiesen wurden
- Sicherheit im Betrieb und im Umfeld

Bislang existieren keine allgemeinverbindlichen Prüfvorschriften zur Beurteilung der Filtrations- bzw. Inaktivierungseffizienz von mobilen Luftreinigern und für die Bestimmung von unerwünschten Reaktionsprodukten. Angesichts der vielen Anbieter und der unterschiedlichen angebotenen Technologien, empfiehlt es sich, vor der Beschaffung ein unabhängiges Prüfinstitut oder eine Beratungsstelle einzubinden

In Bild 2 sind die wichtigsten Informationen, die einer Entscheidung zugrunde liegen sollten, zusammengefasst.

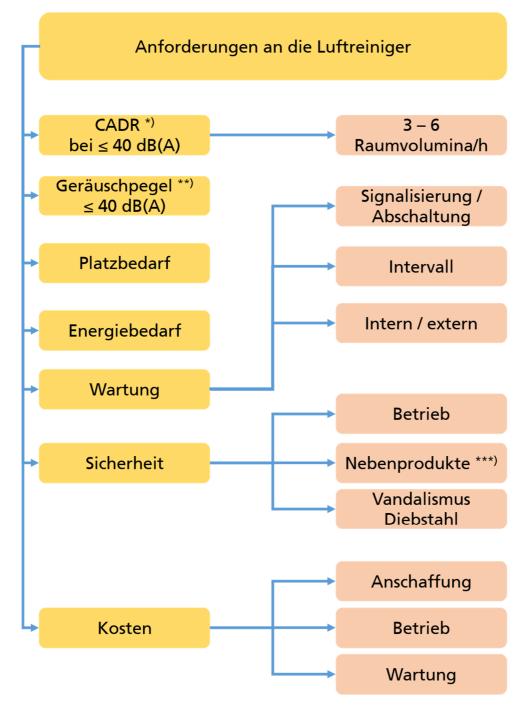


Bild 2: Wesentliche Entscheidungskriterien bei der Auswahl mobiler Luftreiniger

Es wird empfohlen, vor der Beschaffung ein unabhängiges Prüfinstitut oder eine Beratungsstelle mit einzubinden.

In Bild 3 sind die wesentlichen Technologien zusammengefasst. Zum Teil werden auch unterschiedliche Technologien kombiniert. So können z. B. bei UVC-Geräten Grobstaubfilter im Zuluftstrom eingesetzt

<sup>\*)</sup> Die CADR nicht bei voller Leistung, sondern bei einem Geräuschpegel von maximal 40 dB(A) ist ein wesentliches Auswahlkriterium.

<sup>\*\*)</sup> Das anlagenbedingte Hintergrundgeräusch soll in Unterrichtsräumen 40 dB(A) nicht überschreiten.

<sup>\*\*\*)</sup> Mobile Luftreiniger mit Plasma- oder Ionisierungstechnologie können Nebenprodukte erzeugen.

werden, um eine Staubablagerung auf den Strahlungsquellen zu verhindern. Bei Plasma- oder Ionisationsgeräten können nach der Inaktivierungseinheit Aktivkohlefilter eingesetzt werden, um evtl. gebildete unerwünschte Begleitstoffe zurückzuhalten. Alle Filtermedien müssen in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden.

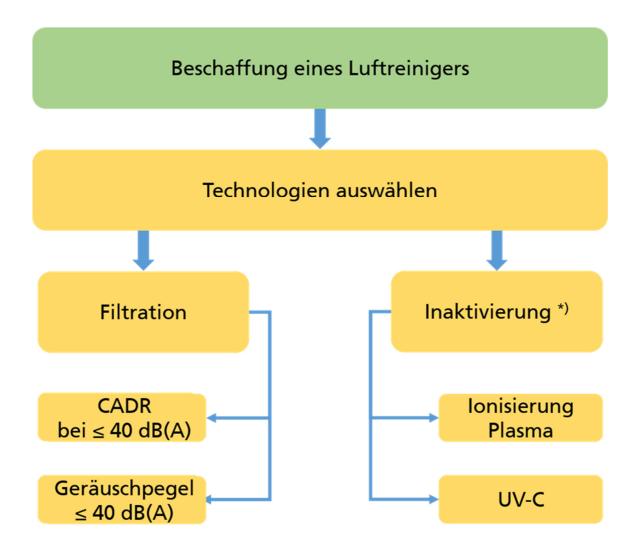


Bild 3: Technologien, die in mobilen Luftreinigern eingesetzt werden und Eigenschaften der Geräte, die bei der Auswahl berücksichtigt werden sollten

- \*) Für den Nachweis der Inaktivierungsleistung bei Viren und sonstigen Keimen unter realitätsnahen Bedingungen und der Betriebssicherheit der Geräte existieren bislang keine anerkannten, standardisierten Prüfverfahren (DIN, EN, ISO, etc.).
  - Alle Inaktivierungstechnologien können zur Bildung unerwünschter Nebenprodukte (z. B. Ozon, Formaldehyd, weitere VOCs) führen. UVC Strahlung ist schädlich für den Menschen und darf den mobilen Luftreiniger nicht verlassen.
  - Das ist durch technische Maßnahmen sicherzustellen.
  - Es wird empfohlen, vor der Beschaffung ein unabhängiges Prüfinstitut oder eine Beratungsstelle mit einzubinden.

#### 5 Schulbau in Deutschland

In der Bundesrepublik Deutschland liegt die Bildungshoheit bei den Bundesländern und somit auch die Verantwortung für den Schulbau und die Ausstattung der Schulen. Der Bund kann daher in erster Linie Empfehlungen aussprechen aber keine verbindlichen Vorgaben einführen. Empfehlungen des Umweltbundesamts für die Innenraumhygiene in Schulen finden sich im sogenannten "Schulleitfaden" aus dem Jahr 2008 [21].

Die Vorgaben für ein typisches Klassenzimmer in Deutschland gehen von 2 m² Flächenbedarf pro Schüler aus. In den Schulbaurichtlinien einiger Bundesländer werden 60 m² als Standardmaß für Klassenräume genannt (z. B. [1] - [3]). Der Arbeitsplatz der Lehrkraft und der Raum vor der Tafel sind in diesem Flächenansatz bereits enthalten. Die Raumhöhe wird in den Schulbaurichtlinien der Bundesländer (z. B. Baden-Württemberg, Bayern und Thüringen, ([1] - [3]) üblicherweise mit 3 m angegeben, so dass pro Schüler 6 m³ Raumvolumen zur Verfügung steht. Fach- und Gruppenräume können sowohl nach oben als auch nach unten von diesen Werten abweichen. Das Raumprogramm für die städtischen Schulen der Landeshauptstadt München sieht 64 m² pro Unterrichtsraum für Grundschulen, 60 m² für Mittelschulen, 72 m² für Realschulen und Gymnasien vor [4]. Die thüringischen Schulbauempfehlungen [3] schlagen pro Schüler eine Fensterfläche von 0,3 m² vor, die vollständig öffenbar sein soll, das entspricht bei 30 Schülern in einem Standard-Klassenzimmer einer öffenbaren Fensterfläche von 9 m². Der Einbau von mechanischen Lüftungsanlagen als Regelfall ist nicht vorgesehen.

Schätzungen gehen davon aus, dass in ca. 10 % der annähernd 48000 Schulen in Deutschland eine raumlufttechnische Anlage eingebaut ist [24]. D. h. die Lüftung erfolgt in der überwiegenden Anzahl an Schulen in Form von freier Lüftung bzw. Fensterlüftung. Bei der Fensterlüftung sind kontinuierliche Lüftung und Stoßlüftung zu unterscheiden. Sowohl die kontinuierliche Lüftung als auch die Stoßlüftung können in Form der einseitigen (die Lüftungsöffnungen befinden sich nur an einer Seite des Raumes) als auch der Querlüftung erfolgen. Bei der Querlüftung befinden sich die Lüftungsöffnungen an gegenüberliegenden Seiten des Raumes. Im "Schulleitfaden" [21] wird die Stoßlüftung empfohlen. Es wird aber gleichzeitig darauf hingewiesen, dass zusätzliche lüftungstechnische Maßnahmen ergriffen werden müssen, sollte ein natürlicher Luftwechsel über Fenster nicht möglich sein.

# 6 Anforderungen an die Hygiene in Klassenräumen

# 6.1 Raumluftqualität

Bei Klassenräumen handelt es sich um Räume mit einer sehr hohen Personenbelegung. Dies hat einen hohen Eintrag an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Geruchsstoffen, Kohlendioxid und Feuchte durch die Nutzer zur Folge. Die Lüftung in einem Unterrichtsraum muss diese Stoffe abführen, um hygienisch akzeptable Bedingungen aufrechtzuerhalten. Es ist bekannt, dass ein Anstieg der Kohlendioxidkonzentration auf Werte über 1500 ppm zu einem Leistungs- und Konzentrationsverlust führen kann.

In Tabelle 1 sind Kohlendioxidkonzentrationen und die zu ergreifenden Maßnahmen nach der Arbeitsstättenregel ASR A3.6 [25] zusammengefasst.

Tabelle 1: CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft, entnommen aus ASR A3.6

	The decimal of the control of the co
CO <sub>2</sub> -Konzentration	Maßnahmen
[ml/m3] bzw. [ppm]	
< 1000	Keine weiteren Maßnahmen (sofern durch die Raumnutzung kein Kon-
	zentrationsanstieg über 1000 ppm zu erwarten ist)
1000 - 2000	Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
	Lüftungsplan aufstellen (z. B. Verantwortlichkeiten festlegen)
	Lüftungsmaßnahme (z. B. Außenluftvolumenstrom oder Luftwechsel erhö-
	hen)
> 2000	weitergehende Maßnahmen erforderlich (z. B. verstärkte Lüftung, Redu-
	zierung der Personenzahl im Raum)

ASR A3.6 schreibt für Räume mit einer lichten Höhe von 3 m und einer maximalen Raumtiefe von 7,5 m für die einseitige Stoßlüftung eine öffenbare Fensterfläche von mindestens 1,05 m²/10 m² Grundfläche vor. Für die Unterrichtsräume mit 60 m² Grundfläche ergibt sich damit eine öffenbare Fensterfläche von 6,3 m². Die in Unterrichtsräumen im Vergleich zu gewerblichen Räumen höhere Belegungsdichte ist hierbei aber nicht berücksichtigt. Bei nicht bekannter Belegungsdichte ist bei der Auslegung der öffenbaren Fensterflächen von 10 m² Grundfläche/Person auszugehen [25]

DIN EN 15251 [26] sieht vier Kategorien für die Klassifizierung des Innenraumklimas vor. Die Klassifizierung orientiert sich am Prozentsatz Unzufriedener. In den folgenden Tabellen (bis Tabelle 4) wurde die Kategorie IV mit mehr als 30 % unzufriedenen Nutzern nicht berücksichtigt. In Tabelle 2 sind die Kategorien beschrieben.

Tabelle 2: Beschreibung der Anwendbarkeit der verwendeten Kategorien, entnommen aus DIN EN T15251:2012 [26].

Kategorie	Beschreibung	
1	hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr emp-	
	findliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z.B.	
	Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere	
	Personen	
II	normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude	
II	annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäu-	
	den angewendet werden	
IV	Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur	
	für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden	
ANMERKUNG Auch in anderen Normen wie z.B. EN 13779*) [27] und EN ISO 7730 [28] wird eine		

ANMERKUNG Auch in anderen Normen wie z. B. EN 13779\*) [27] und EN ISO 7730 [28] wird eine Einteilung in Kategorien vorgenommen; diese können jedoch unterschiedlich benannt sein (A, B, C oder 1, 2, 3 usw.)

In Tabelle 3 sind die empfohlenen Lüftungsraten nach DIN EN 15251 für Klassenräume in Abhängigkeit von den Emissionseigenschaften des Gebäudes zusammengefasst [26]. Die sich daraus ergebenden Lüftungsraten für einen Unterrichtsraum finden sich beispielhaft in Tabelle 4.

Tabelle 3: Beispiele für empfohlene Lüftungsraten für Klassenräume bei Standardbelegungsdichte für drei

Kategorien der Verschmutzung durch das Gebäude selbst.

Katego-	Grundflä-	QР	Qв	q <sub>tot</sub>	Qв	q <sub>tot</sub>	Qв	q <sub>tot</sub>
rie	che [m²] je	[l/(s m²)]	[l/(s m²)]	bei sehr	[l/(s m²)] l	oei schad-	[l/(s m²)]	bei nicht
	Person	bei Bele-	schadsto	offarmen	stoffarme	en Gebäu-	schadsto	offarmen
		gung	Gebä	iuden	de	en	Gebä	iuden
1	2,0	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0
II	2,0	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9
III	2,0	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8

Tabelle 4: Rechenbeispiele für empfohlene Lüftungsraten in Klassenräumen für drei Kategorien der Verunreinigung durch das Gebäude selbst. Die Raten sind je Person oder je  $m^2$  Grundfläche angegeben.  $q_P$  bezeichnet die personenbezogene Komponente der Lüftungsrate,  $q_B$  die gebäudebezogene und  $q_{tot}$  die

Gesamtlüftungsrate.

Katego-	Grundfläche	Q <sub>P</sub>	Q <sub>B</sub>	q <sub>tot</sub>	Q <sub>B</sub>	q <sub>tot</sub>	Q <sub>B</sub>	q <sub>tot</sub>
rie	[m²] des Un- terrichts-	[l/(s m²)] bei maxi-		bei sehr offarmen		pei schad- en Gebäu-	schadsto	bei nicht offarmen
	raums *)	maler Belegung		uden	de		Gebä	
1	60	130	30	160	60	190	120	250
П	60	91	18	109	42	133	84	175
III	60	52	12	64	24	76	48	100

<sup>\*)</sup> Standard-Unterrichtsraum

Da in der überwiegenden Mehrheit der Schulen in Deutschland keine mechanische Lüftungsanlage eingebaut ist, muss der hygienisch notwendige Mindestluftwechsel durch die Fensterlüftung sichergestellt werden. Die effektivste Form der Fensterlüftung ist die sog. Querlüftung. Sie setzt aber öffenbare Fenster

<sup>\*)</sup> zurückgezogen und durch DIN EN 16798-3 [29] ersetzt

<sup>\*\*) 30</sup> Schüler und eine Lehrkraft

an zwei gegenüberliegenden Seiten eines Unterrichtsraumes voraus. Bei hinreichender Temperatur- oder Druckdifferenz kann auch mittels Stoßlüftung (öffenbare Fenster nur an einer Seite des Raumes) ein ausreichender Luftwechsel erreicht werden. Die Lüftungsphasen sind dann aber länger als bei der Querlüftung.

Folgende Gleichung lässt eine Abschätzung des Luftwechsels durch Stoßlüftung zu:

$$V_{zu} = 0.65 \cdot 1/3 \cdot A \cdot \sqrt{(g \cdot \Delta T \cdot \frac{\Delta h}{T_{innen}})}$$

 $V_{zy}$  Zuluftvolumenstrom in [m<sup>3</sup>/s]

A geöffnete Fensterfläche [m²]

g Gravitationskonstante = 9,81 [m/s<sup>2</sup>]

ΔT Temperaturdifferenz innen-außen [K]

Δh Höhe des Fensters oder Höhendifferenz bei übereinanderliegenden Fenstern in [m]

 $T_{innen}$  Temperatur im Raum in [K]

Tabelle 5: Einfache Rechenbeispiele für Klassenräume mit Fensterlüftung. Als Fensterfläche wurde die in Thüringen empfohlene Fensterfläche von 0,3 m²/Schüler bei einer Fensterhöhe  $\Delta h$  von 1,5 m angenommen. Das Volumen des Unterrichtsraums wurde mit 180 m³ angesetzt.  $t_{Lw}$  gibt die Fensteröffnungszeit in Sekunden an, die für einen einfachen Luftwechsel im Raum benötigt wird.

ΔT [K]	Δh [m]	$T_{innen}$ [K]	$V_{zu}$ [m <sup>3</sup> /s]	$t_{Lw}$ [s]
5	1,5	296	0,97	186
10	1,5	296	1,37	131
15	1,5	296	1,68	107
20	1,5	296	1,94	93
23	1,5	296	2,09	86

# 7 Innenraumhygiene in deutschen Schulen

Mehrere Untersuchungen in den letzten 10 Jahren haben gezeigt, dass die Luftqualität in Unterrichtsräumen besonders in den Wintermonaten unzureichend ist.

#### 7.1 Kohlendioxid

In einer Untersuchung unter der Leitung des Bayerischen Landesamtes für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit [7] wurde im Winter 2004/2005 und im Sommer 2005 die Luftqualität in 92 bzw. 76 Klassenzimmern in der Landehauptstadt München und im Landkreis Dachau untersucht. Die Medianwerte der Kohlendioxidkonzentrationen lagen im Winter zwischen 598 und 4172 ppm, im Sommer zwischen 480 und 1875 ppm. Im Winter lagen die Tagesmediane in 92 % der Klassenräume über 1000 ppm, im Sommer in 28 % der Klassenräume. Die Autoren sehen in den vorliegenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen einen Hinweis auf eine insbesondere im Winter häufig unzureichende Raumluftqualität, die unter lufthygienischen Gesichtspunkten als nicht akzeptabel anzusehen ist.

In Bremen wurden im Rahmen eines studienvorbereitenden Praktikums sieben unterschiedliche Schulgebäude ausgewählt, wie sie in Bremen üblich sind [8]. Von August bis September 2006 wurden an zwei Tagen in jedem ausgewählten Raum gemessen. An Tag I erfolgte die Lüftung wie bislang üblich, an Tag II wurde die Lüftung nach Vorgabe durchgeführt. D. h. vor dem Unterricht und in den Pausen (nach 45 bei Einzel- oder nach 90 min bei Doppelstunden) sollte durch das vollständige Öffnen der Fenster und Türen ein maximaler Luftaustausch erzielt werden.

In sieben Unterrichtsstunden an Tag I überschritten die Medianwerte der Kohlendioxidkonzentration den Wert von 1500 ppm. Ansonsten bezeichneten die Autoren die Luftqualität als gut bis akzeptabel. In 65 % der Unterrichtsstunden wurde eine Kohlendioxidkonzentration von 1000 ppm nicht überschritten. Hier muss angemerkt werden, dass die Untersuchungen bei warmen Außentemperaturen stattfanden.

Beim Lüften nach Vorgabe an Tag II wurde der lufthygienische Zielwert von 1000 ppm nur in 3 der erfassten Unterrichtsstunden unterschritten. In zwölf Schulstunden lag der Median über 1500 ppm, in 6 Stunden sogar über 2000 ppm. Die Autoren schlossen daraus, die Pausenlüftung und die Lüftung vor und nach dem Unterricht nicht ausreichen, um eine gute oder akzeptable Luftgualität sicherzustellen.

Zwischen Dezember 2013 und April 2015 wurden in der kühlen Jahreszeit Untersuchungen zur Luftqualität in Berliner Schulen durchgeführt, die zwischen 2011 und 2013 energetisch saniert worden waren [9]. Von den betrachteten 22 Klassenräumen waren 10 weiterhin mittels Fenster frei belüftet, 12 verfügten über eine raumlufttechnische Anlage. Die Lüftungsanlagen waren noch nicht auf den Anforderungswert 1000 ppm Kohlendioxid ausgelegt. Die Auslegung erfolgte vielmehr entsprechend DIN EN 13779: IDA 3 "mäßige Luftqualität". Das entspricht einer Kohlendioxidkonzentration zwischen 1000 und 1400 ppm [27]. Für die frei belüfteten Räume war eine Mindestlüftung vor dem Unterricht, in jeder Pause und nach dem Unterricht festgelegt. Den Nutzern wurden zusätzliche Lüftungsmaßnahmen empfohlen. Zudem wurde nach Bedarf zusätzlich gelüftet, so dass von einer überdurchschnittlichen Lüftung ausgegangen werden kann.

Die Auswertung von 445 Unterrichtsstunden zeigte deutliche Unterschiede bei der Kohlendioxidkonzentration. In den maschinell belüfteten Räumen stieg die Kohlendioxidkonzentration nicht über 1500 ppm, während sie in Klassenräumen mit freier Lüftung bis auf 2730 ppm anstieg. In frei belüfteten Räumen fanden 82 % der Unterrichtszeit bei Kohlendioxidkonzentrationen oberhalb des hygienisch unbedenklichen Bereichs von 1000 ppm statt, in 30 % der Unterrichtszeit lagen die Kohlendioxidkonzentrationen über 1500 ppm. Die Autoren gingen davon aus, dass bei freier Lüftung eine Verbesserung der Situation insbesondere in der kalten Jahreszeit nur schwerlich umsetzbar sein dürften.

Ausgelöst durch das Konjunkturprogramm II in der Folge der Bankenkrise wurden Schulen in der Stadt Nürnberg energetisch ertüchtigt. Es zeigte sich, dass die durch die Sanierung erzielte Luftdichtheit zu einer Verschlechterung der Luftqualität in den Unterrichtsräumen führte. Deshalb wurden beginnend im Winter 2012/2013 Untersuchungen zur Raumluftqualität durchgeführt [10]. Eine untersuchte Grundschule verfügte über eine raumlufttechnische Anlage, die anderen Schulen wurden mit CO<sub>2</sub>-Ampeln oder sog. Klimagriffen ausgerüstet. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Raumluftqualität "... mindestens hygienisch auffällig, meist aber hygienisch inakzeptabel." ist ([10], S. 15). Das Messprogramm zeigte,

- dass nur mit freier Lüftung eine deutliche Verbesserung der raumlufthygienischen Situation möglich ist.
- Raumluftkonzentrationen < 1000 ppm Kohlendioxid ohne raumlufttechnische Anlage nicht erreichbar zu sein scheinen und
- bei einer raumlufttechnischen Anlage die zusätzliche Möglichkeit zur Fensterlüftung einen positiven Effekt auf die Raumluftqualität hat.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die raumlufthygienische Situation in Unterrichtsräumen, die ausschließlich mittels Fensterlüftung belüftet werden können zumindest während der kalten Jahreszeit nicht akzeptabel ist. Untersuchungen in anderen Ländern konnten zeigen, dass sich zu hohe Kohlendioxidkonzentrationen leistungsmindernd auswirken können.

# 7.2 Mikrobiologische Belastung

Der Anstieg der Feuchte durch die ausgeatmete Luft und durch die Feuchteabgabe über die Haut wiederum führt zu einem Anstieg der relativen Feuchte im Unterrichtsraum. Die feuchte Raumluft kann an kalten Bauteilen kondensieren und Schimmelpilzwachstum an den entsprechenden Oberflächen begünstigen. Deshalb muss die Nutzungsfeuchte durch einen ausreichenden Luftwechsel aus dem Raum entfernt werden.

#### 7.3 Infektionsschutz

SARS-CoV-2 wird primär durch virushaltige Partikel unterschiedlicher Größe übertragen. Diese Partikel werden von infizierten Personen beim Atmen, Sprechen und Singen freigesetzt und natürlich in besonderem Maße beim Husten oder Niesen. Die Partikel können nach ihrer Größe unterschieden werden. Die kleineren Partikel (< 100 µm) werden häufig als Aerosol bezeichnet, wobei die Grenze zwischen Tröpfchen und Aerosol nicht exakt festgelegt werden kann. Es handelt sich um einen fließenden Übergang ([17] S. 8). Im Gegensatz zu den größeren Tröpfchen sinken Aerosole nicht schnell zu Boden. Sie verhalten sich ähnlich wie Gase und können mehrere Stunden im Raum schweben. Insbesondere in Räumen mit einer hohen Belegungsdichte und unzureichender Lüftung besteht daher die Gefahr einer Ansteckung mit SARS-CoV-2 auch über größere Distanzen als 1,5 m. Daraus ergibt sich, dass die wirksamste gebäudebezogene Maßnahme gegen eine Übertragung von SARS-CoV-2 eine ausreichend hohe Frischluftzufuhr mit einem Luftwechsel von mehreren Raumvolumina pro Stunde ist. Damit werden zugleich das von den Raumnutzern ausgeatmete Kohlendioxid, die flüchtigen organischen Verbindungen und die Nutzungsfeuchte abgeführt. Ist ein ausreichender Luftwechsel nicht sicherzustellen, trägt der Einsatz von mobilen Luftreinigern zur Verringerung der Konzentration an Aerosolpartikeln bei.

#### 7.4 Raumakustik

Schulen und Unterrichtsräume sollen optimale Bedingungen bieten, um die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Schülerinnen und Schüler zu fördern und deren Beeinträchtigung zu verhindern. In Tabelle 6 sind akustische Zielwerte für Unterrichtsräume zusammengefasst.

Tabelle 6: Maximaler Geräuschpegel (kennzeichnender Schalldruckpegel L<sub>A, F</sub>) in Unterrichtsräumen verursacht durch haustechnische Anlagen, Installationen sowie sonstige Anlagen im Schulgebäude, in Anlehnung an DIN 4109, entnommen aus [21].

Geräuschwirkung in	Max. Schalldruckpegel (Summenpegel) L <sub>A,F</sub> [dB(A)]
Unterrichtsräumen	30
Besonderen Unterrichtsräumen (Musik, Sport, Werkstätten etc.)	35

In Tabelle 7 sind die Auslegungswerte für den äquivalenten A-bewerteten Dauerschallpegel für Unterrichtsräume und Turnhallen wiedergegeben. Wie beim maximalen Geräuschpegel sind auch hier 30 dB(A) als Wert genannt. Menschen können diese numerischen Werte nicht mit Geräuschen in Einklang bringen. In Tabelle 8 sind deshalb bekannte Umgebungsgeräusche den Schalldruckpegeln gegenübergestellt. Der Ziel- bzw. Auslegungswert für ein Dauergeräusch, verursacht durch haustechnische Einrichtungen würde einer ruhigen Wohnlage oder einem Flüstern entsprechen. Hierbei geht man davon aus, dass es zu keinen Geräuschspitzen kommt und auch keine Einzelfrequenzen besonders prominent in Erscheinung treten.

Tabelle 7: Auslegungswert des äquivalenten A-bewerteten Dauerschallpegels, L<sub>eq,nT,A</sub> [dB(A)] für dauerhafte Quellen (Ausschnitt aus DIN EN 16798-1, Tabelle B5-1 [22])

Gebäude	Art dos Paums	Äquivalenter Dauerschallpegel L <sub>eq,nT,A</sub> [dB(A)]		
Gebaude	Art des Raums		II	III
Schule	Klassenräume	≤ 30	≤ 34	≤ 38
Scriule	Turnhallen	≤ 35	≤ 40	≤ 45

Tabelle 8: Gegenüberstellung von Schalldruckpegeln mit bekannten Umgebungsgeräuschen [30]

Tabelle 6. degenaberstellang von Senaliaraekpe	gent tille bekanntert omgebangsgeraasenen [50]
Schalldruckpegel L <sub>p</sub> [dB(A)]	Umgebungsgeräusch
0	Hörschwelle
10	Gerade hörbarer Schall
15 - 20	Leises Blätterrauschen
30 - 40	Ruhige Wohnlage, Flüstern
40 - 50	Leise Unterhaltung, ruhiges Büro
50 - 60	Normale Unterhaltung
70 - 80	Starker Straßenverkehr
80 - 85	Rufen, Schreien

#### 8 Literatur

- [1] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg: Schulhausbau in Baden-Württemberg https://km-bw.de/,Lde/Startseite/Schule/Schulhausbau; aufgerufen am 01.12.2020
- [2] Bayerische Schulbauverordnung: Schulbauverordnung (SchulbauV) Vom 30. Dezember 1994 (GVBl 1995 S. 61) BayRS 2230-1-1-3-K (§§ 1–7) <a href="https://www.gesetze-bayern.de/(X(1)S(l2fmlvjyild1ougdy54vdwnd))/Content/Document/BaySchul-BauV">https://www.gesetze-bayern.de/(X(1)S(l2fmlvjyild1ougdy54vdwnd))/Content/Document/BaySchul-BauV</a>: aufgerufen am 01.12.2020
- [3] Schulbauempfehlungen für den Freistaat Thüringen mit Raumprogrammempfehlungen für allgemeinbildende Schulen vom 10. Juli 1997; Az.: Z5/50724 http://www.thueringen.de/mam/th9/tmblv/schulbau/schulbauempfehlungen.pdf, aufgerufen am 01.12.2020
- [4] Landeshauptstadt München Referat für Bildung und Sport: Standard-Raumprogramme für Grundschulen, Mittelschulen, Realschulen und Gymnasien; 20.05.2015 https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:75a9461b-8ad7-47ce-bf67-515b3db50972/Muster-raumprogramme%20Schulen.pdf; aufgerufen am 01.12.2020
- [5] Umweltbundesamt: Richtig Lüften in Schulen <a href="https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#warum-ist-ein-regelmassiger-luftaus-tausch-in-klassenzimmern-wichtig">https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#warum-ist-ein-regelmassiger-luftaustausch-in-klassenzimmern-wichtig</a>; aufgerufen am 22.12.2020
- [6] Lüften in Schulen: Empfehlungen des Umweltbundesamtes zu Luftaustausch und effizientem Lüften zur Reduzierung des Infektionsrisikos durch virushaltige Aerosole in Schulen <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/umweltbundesamt.de/sites/de/site
- [7] Fromme, H.; Dietrich, S.; Kiranoglu, M.; Twardella, D.; Schierl, R.; Nowak, D.; Heitmann, D.; Körner W: Frische Luft an bayerischen Schulen Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität. Vorläufige Zusammenfassung; Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit; September 2006 https://www.lgl.bayern.de/downloads/gesundheit/doc/alt/luft\_ergebnisse.pdf; aufgerufen am 07.12.2020
- [8] Schaefer, I.; Ross, M.: Kohlendioxid-Konzentrationen (CO2) in ausgewählten Bremer Schulen Bericht über ein Untersuchungsprojekt des Referats Umwelthygiene im Bremer Gesundheitsamt; Hrsg. Gesundheitsamt Bremen, Abteilung Umwelt & Gesundheit; Bremen; April 2007;
- [9] Lahrz, T.; Burghardt, R.; Pfeiler, P.; Kadler, D.; Fromme, H.: Länderuntersuchungsprogramm V (LUPE V) Luftqualität in Schulklassenräumen im Anschluss an energetische Sanierungen. Kurzfassung; Juni 2016; <a href="https://www.berlin.de/lageso/">https://www.berlin.de/lageso/</a> assets/gesundheit/publikationen/bericht lupe v kurzfassung.pdf; aufgerufen am 7.12.2020
- [10] Daten zur Nürnberger Umwelt 3. Quartal 2013: Ist in Schulen eine freie Fensterlüftung möglich? Erste Ergebnisse einer Feldstudie der Stadt Nürnberg <a href="http://umweltdaten.nuernberg.de/fileadmin/Dokumente/Quartalsberichte/13-3.pdf">http://umweltdaten.nuernberg.de/fileadmin/Dokumente/Quartalsberichte/13-3.pdf</a>; aufgerufen am 22.12.2020
- [11] Umweltbundesamt: Mobile Luftreiniger in Schulen: Nur im Ausnahmefall sinnvoll Empfehlungen des Umweltbundesamtes zum Einsatz von mobilen Luftreinigern als lüftungsunterstützende Maßnahme bei SARS-CoV-2 in Schulen vom 22. Oktober 2020; <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/uba\_empfehlung\_mobile\_luftreiniger\_in\_schulen\_0.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/uba\_empfehlung\_mobile\_luftreiniger\_in\_schulen\_0.pdf</a>; aufgerufen am 20.01.2021
- [12] Einsatz mobiler Luftreiniger als lüftungsunterstützende Maßnahme in Schulen während der SARS CoV 2 Pandemie Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene (IRK) am Umweltbundesamt

- https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/201116 irk stellungnahme luftreiniger.pdf; aufgerufen am 22.12.2020
- [13] Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene am Umweltbundesamt

  https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk\_stellungnahme\_lueften\_sars-cov-2\_0.pdf; aufgerufen am 22.12.2020
- [14] Curtius, J.; Granzin, M.; Schrod, J.: Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2; In: Aerosol Science and Technology, 2021; https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1877257
- [15] Kähler, C. J.; Fuchs, T.; Mutsch, B.; Hain, R. (2020): Schulunterricht während der SARSCoV-2 Pandemie Welches Konzept ist sicher, realisierbar und ökologisch vertretbar?

  DOI: 10.13140/RG.2.2.11661.56802
- Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Positionspapier zu lüftungsunterstützenden Maßnahmen durch Einsatz von Luftreinigern zur Covid-19 Prävention und Einbringung von Wirkstoffen in die Innenraumluft Positionspapier des Arbeitskreises Innenraumluft; Stand 20. November 2020; Wien, 2020; r20.rs6.net/tn.jsp?f=001otz3OeWoW-8SPzXbDT0GXGKdRVs\_8KUeqd-JR0A\_-Sp8AC74o4XysEni9Xw6JqRo2fYenz-msWfJZJ6\_5ocejJp4ipW\_bYV1TAxfgoseQ5PXgCeE2SCuFUT8wmjVpYKS5fMm-ZYZJXr2uLK7PU1qX\_ysh5TwTJz\_euRb4NIGb0fUz\_9-e5QPW2zGtF7ApP0AiR&c=MYIFJGLTSqs-SdId6EJKg9xM-z5tVrHWyBwD28\_VvXpzFhAhT\_T6gg==&ch=jj\_2k2\_Gtwd95EYM-nnvpSf3bgrMNKWmQfWqaqLkPjW9fO3nje\_vXSw== Aufgerufen am 20.01.2020.
- [17] Gesellschaft für Aerosolforschung GAeF: Positionspapier der Gesellschaft für Aerosolforschung zum Verständnis der Rolle von Aerosolpartikeln beim SARS-CoV-2 Infektionsgeschehen vom 7. Dezember 2020; <a href="https://ae00780f-bbdd-47b2-aa10-e1dc2cdeb6dd.file-susr.com/ugd/fab12b">https://ae00780f-bbdd-47b2-aa10-e1dc2cdeb6dd.file-susr.com/ugd/fab12b</a> d4531412f58448ed8138d37b0dcac3d3.pdf; aufgerufen am 20.01.2021.
- Zhang, Y.; Moa, J.; Li, Y.; Sundell, J.; Wargocki, P.; Zhang, J.; Little, J. C.; Corsi, R.; Deng, Q.; Leung, M. H. K.; Fang, L.; Chen, W.; Li, J.; Sun, Y.: Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. In: Atmospheric Environment 45 (2011); S. 4329-4343; Doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.041
- [19] AHAM AC-1-2020 (Portable Electric Room Air Cleaners): Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners AHAM AC-1-2020
- [20] DIN EN 1822-1:2019-10 Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) – Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN 1822-1:2019
- [21] Umweltbundesamt: Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. Ausgabe 2008. <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3689.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3689.pdf</a>; aufgerufen am 01.12.2020
- [22] DIN EN 16798-1:2015-07 Entwurf
  Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Module M1-6; Deutsche und Englische Fassung prEN 16798-1:2015
- [23] Bahri, M.; Haghighat, F.: Plasma-Based Indoor Air Cleaning Technologies: The State of the Art-Review. In: Clean Soil, Air, Water 42(12);2014; S. 1667-1680; DOI: 10.1002/clen.201300296
- [24] VDMA e. V. Raumklima deutscher Schulen erfordert Handlungsbedarf () https://alt.vdma.org/documents/105643/52060450/PI\_Raumklima%20deutscher%20Schulen%20erfordert%20Handlungsbedarf\_1600343834592.pdf/ed94cf1d-161c-524c-cbb7-8a1c9e6e1f83, aufgerufen am 01.12.2020
- [25] Ausschuss für Arbeitsstätten: Technische Regeln für Arbeitsstätten Lüftung ASR A3.6; Ausgabe Januar 2012; zuletzt geändert GMBI 2018, S. 474

- https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-6.pdf?\_\_blob=publicationFile, aufgerufen am 01.12.2020
- [26] DIN EN 15251:2012-12 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung der EN 15251:2007
- [27] DIN EN 13779: 2007-09 Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007 (zurückgezogen)
- [28] DIN EN ISO 7730:2006-05
  Ergonomie der thermischen Umgebung Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005
- [29] DIN EN 16798-3:2017-11 Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4); Deutsche Fassung EN 16798-3:2017
- [30] Schalldruckpegel verschiedener Geräusche <a href="https://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall/Buch/Tabellen.htm#tab06">https://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall/Buch/Tabellen.htm#tab06</a>; aufgerufen am 01.12.2020