



## **BILDUNG UND RAUMKLIMA**

Whitepaper

Luftqualität und Belüftung in Schulen

**Swegon** 

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Abstrakt</b>	<b>3</b>	<b>7. Fakten und Erkenntnisse aus der Forschung</b>	<b>24</b>
<b>2. Kontext</b>	<b>4</b>	Innenraumklima in Schulen	24
Fakten über den Gebäudebestand	4	Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit	25
Fakten über den Bildungsgebäudebestand in der Europäischen Union und Nordamerika	5	Kohlendioxid-Konzentration	26
<b>3. In Schulen verbrachte Zeit</b>	<b>6</b>	Flüchtige organische Verbindungen	26
Bildungsstufen	6	Komfort, Leistung und Belüftung	27
Jahre, Wochen und Stunden in Schulen	6	Unterschiedliche Arten und Raten der Belüftung	27
Bildung der Weltbevölkerung	9	Tageslicht, Beleuchtung und Ausblicke nach draußen	29
<b>4. Normen und Vorschriften für Komfort und Belüftung in Schulen</b>	<b>10</b>	Kontrolle von Schall und Lärm	30
EN 16798 -1:2019	10	Jenseits der vier Wände - der Kontext zählt	32
ASHRAE 62.1:2019	11	Umweltverschmutzung im Freien und nahe gelegene Quellen	32
Baubulletin 101:2018	12	Fernbleiben von der Schule	33
Passivhausanforderungen für Schulen	14	Umweltpsychologie und andere Faktoren	33
<b>5. Grundlegende Anforderungen für Bildungseinrichtungen</b>	<b>16</b>	<b>8. Schluss</b>	<b>34</b>
Entwurf und Planung	16	Gesundheit in der Schule	34
Räumliche Gegebenheiten und Anforderungen an die Schule	17	Auswirkungen des Raumklimas auf das Lernen	34
Entwurfspläne im Vergleich zur tatsächlichen Nutzung	18	Das neue Paradigma für die Belüftung in Schulen	34
<b>6. Luftaustausch in Schulen</b>	<b>20</b>	Dynamische Beziehungen	35
Infiltration	20	Nachhaltigkeit und Klimabildung	35
Natürliche Belüftung	21	Die Zukunft von Bildung und Schule	35
Mechanische Belüftung	22	<b>9. Referenzen</b>	<b>36</b>

# Abstrakt

Vor mehreren tausend Jahren wurden die ersten sogenannten Schulen gegründet, und die schulische Ausbildung der Menschen begann. Heute nimmt die Bildung bis zu einem Viertel des menschlichen Lebens ein, und die meiste Zeit wird in Innenräumen - in Schulgebäuden - verbracht. Die Umgebung - innerhalb (indoor) und außerhalb (outdoor) - von Schulgebäuden beeinflusst die Gesundheit, das Denken und die Leistung der Schüler. Jahrzehntelange Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung zeigen, dass es bereits umfangreiche und solide Belege dafür gibt, wie sich ein gesundes Raumklima und eine gute Belüftung auf Kinder und ihre Leistungen in der Schule auswirken.

Das Schulgebäude ist eine hervorragende Gelegenheit, um einzugreifen und die Gesundheit der Schüler zu schützen. Die Schule bzw. der Gebäudeeigentümer muss für ein gesundes Umfeld sorgen und gleichzeitig nachhaltig, energieeffizient und kostengünstig sein. Die Schulumgebung muss lebenswert und lernfördernd sein: voller frischer Luft und gutem (Tages-)Licht, mit einer angenehmen Atmosphäre und guten akustischen Bedingungen. Die aktuellen Trends bei Schulgebäuden konzentrieren sich auf Systeme, die variabel und bedarfsorientiert sind, um ein angemessenes Raumklima zu schaffen, die flexibel und kontrollierbar in der Nutzung sind, die integriert und dennoch intelligent sind und sich an potenzielle und zukünftige Anforderungen anpassen lassen.

Schüler verdienen es, sich in einer gesunden Umgebung zu entwickeln, zu lernen und zu gedeihen, die ihr Erfolgspotenzial optimiert und das Wohlergehen der Kinder schützt. Die Zukunft braucht gesunde und intelligente Schulgebäude mit einem hervorragenden Innenraumklima für gesunde Luft in Schulen.

# Kontext

## Fakten über den Gebäudebestand in Europa

Ein großer Teil des europäischen Gebäudebestands (Wohn- und Nichtwohngebäude) ist renovierungsbedürftig, da 2/3 vor den 1970er Jahren gebaut wurden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die meisten dieser Gebäude auch in den 2050er Jahren noch stehen werden.

Jedes Jahr werden in Europa nur etwa 1 % des bestehenden Gebäudebestands neu gebaut (Artola, 2016).

Etwa 75 % der Gebäude sind Wohngebäude und 25 % Nichtwohngebäude (gewerbliche Gebäude). 17 % der Nichtwohngebäude machen Bildungseinrichtungen aus (bzw. 4,25 % des gesamten Gebäudebestands, siehe Abbildung 1).

Es ist zu beachten, dass in Amerika (USA und Kanada) der Gebäudebestand ein mittleres Alter aufweist und der größte Teil der Gebäude vor den 1980er Jahren gebaut wurde. In den USA machen Bildungs-, Handels-, Büro- und Lagergebäude 60 % der gesamten gewerblichen Nutzfläche und 50 % der Gebäude aus (EIA, 2018).

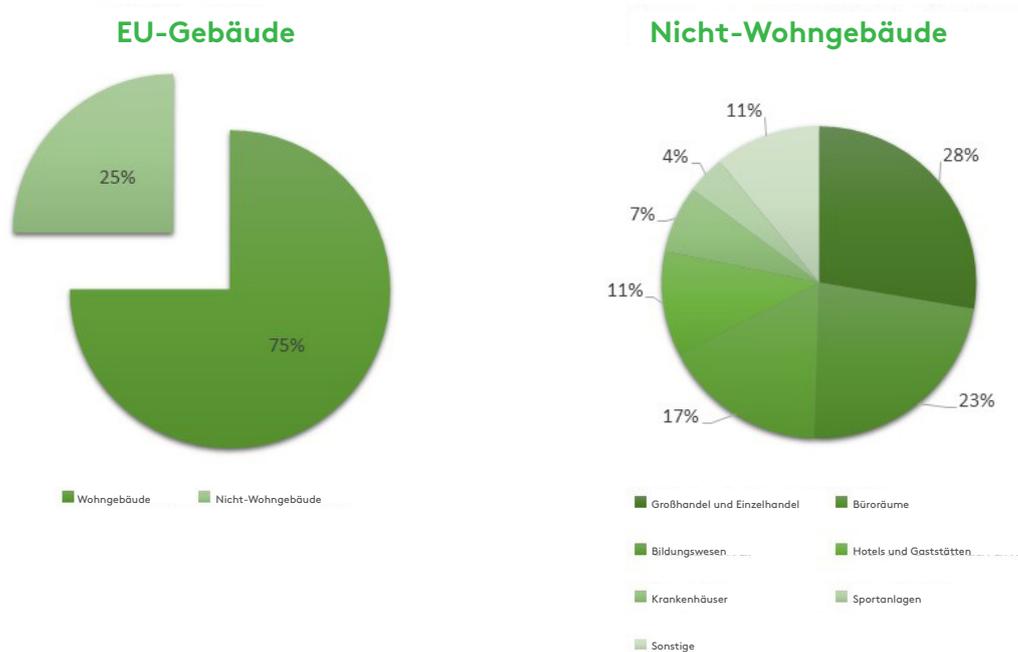


Abbildung 1: Überblick über den Nichtwohngebäude- und Wohngebäudebestand in Europa (BPIE-Bericht, 2011) und Wohngebäudebestand in Europa (BPIE-Bericht, 2011)



## Fakten über den Bildungsgebäudebestand in der Europäischen Union und in Nordamerika

- Der europäische Bildungsgebäudebestand ist relativ alt, oft baufällig und weist eine schlechte Energieeffizienz auf.
- Die meisten europäischen Schulgebäude sind für den traditionellen Frontalunterricht gebaut worden.
- Ein großer Teil der Betriebskosten von Schulen in Mitteleuropa und in den skandinavischen Ländern entfällt auf die Beheizung der Räumlichkeiten und die Wartung und Instandhaltung der Gebäude.
- Der heutige Gebäudebestand ist bereits alt, wird aber auch in den 2050er Jahren noch stehen. Allerdings variiert die durchschnittliche Lebensdauer eines Gebäudes je nach Gebäudetechnik und -ausrüstung erheblich. Außerdem hängt die Lebensdauer eines Gebäudes sehr stark von der Bauqualität und dem Instandhaltungsniveau ab (neben vielen anderen Faktoren).
- In Europa und Amerika gibt es kein vorgegebenes Modell für ein Schulgebäude. Einige Schulen haben eine sehr große Grundfläche und sind sehr weitläufig, mit ein-, zwei- oder mehrstöckigen Gebäuden.
- Das Gesamtalter der Schulgebäude in den USA beträgt 44 Jahre (davon 12 Jahre seit der letzten großen Renovierung), und auch in Kanada wird die Lebensdauer von Schulgebäuden auf etwa 40 Jahre geschätzt.
- Wenn ein Schulgebäude in Amerika 20 bis 30 Jahre alt ist, muss die Ausstattung häufig ersetzt werden. Nach 30 Jahren sollte die ursprüngliche Ausstattung ersetzt sein, einschließlich des Daches und der elektrischen Anlagen. Nach 40 Jahren beginnt das Schulgebäude zu verfallen, und nach 60 Jahren werden die meisten Schulen aufgegeben.
- In den USA sind neuere Schulgebäude in der Regel größer als ältere Gebäude. Die durchschnittliche Größe eines Schulgebäudes beträgt 31.000 ft<sup>2</sup> (bzw. 2.880 m<sup>2</sup>).

# In Schulen verbrachte Zeit

Eine Schule ist eine Bildungseinrichtung, die ein Lernumfeld für die Ausbildung (Schulbildung, Schulbesuch) von Lernenden unter der Leitung von Erziehenden und Lehrenden bietet. Die Schule bietet einen Bildungsraum für viele verschiedene Aktivitäten, die auf den zahlreichen Bedürfnissen und Anforderungen von Schülern und Lehrern basieren. Kinder verbringen den größten Teil ihres frühen Lebens in der Schule, weshalb die räumliche Umgebung in Schulen so wichtig ist.

## Bildungsstufen

In den meisten Ländern gibt es formale Bildungsstufen (in der Folge eine Reihe von Schulen), von denen einige obligatorisch und andere freiwillig sind. Die Bildungsstufen sind von Land zu Land unterschiedlich, umfassen aber in der Regel die Vorschule (Kindergarten, Vorschule), die Primarstufe für Kleinkinder (Grundschule oder Elementarschule), die Sekundarstufe für Jugendliche (Sekundarschule, Mittelschule oder Gymnasium) und die Tertiär- oder Hochschulbildung (Hochschule, Universität), siehe Abbildung 2.

Es gibt auch viele alternative Bildungseinrichtungen (für besondere Bildungsbedürfnisse, religiöse, private usw.) und Schulen für Erwachsene (z. B. Ausbildungsakademie, Handelsschule usw.). Unabhängige Bildung ist Heimunterricht oder Fernunterricht.

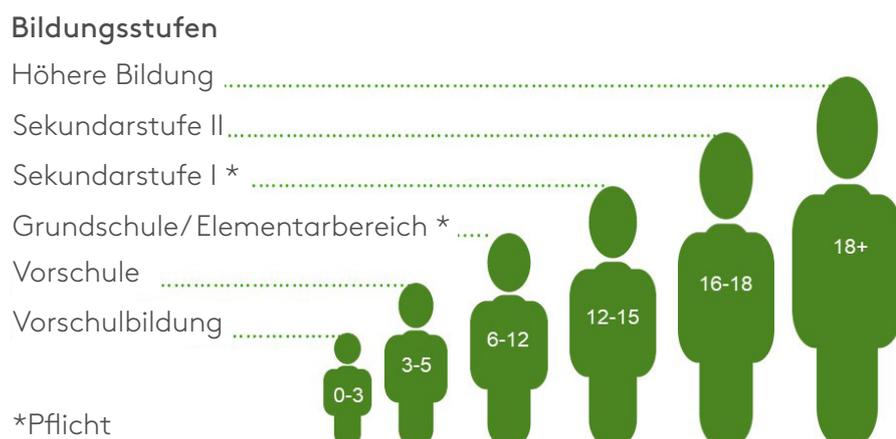


Abbildung 2: Bildungsstufen, die für die meisten entwickelten Länder gelten

## Jahre, Wochen und Stunden in Schulen

Kinder verbringen viele Jahre in der Schule. Die Bildungsstufen und Schulen variieren von Land zu Land, aber im Allgemeinen beginnen Kinder im Alter von 6-7 Jahren mit der Schule, gefolgt von der Grundschule im Alter von 7-10 Jahren, der Sekundarschule im Alter von 10-14 Jahren und der Oberstufe im Alter von 14-18 Jahren (in einigen Ländern bis zum Alter von 16 Jahren). In der Regel erreichen die Kinder das Alter von 18 Jahren und setzen ihre Ausbildung auf der dritten Ebene an einer Fachhochschule oder einer Universität für weitere 3-5 Jahre fort, siehe Abbildung 3.

Es ist zu bedenken, dass Kinder auch schon vor dem sechsten Lebensjahr eine freiwillige Ausbildung absolvieren können. Nach dem Hochschulabschluss setzen sie häufig ihre akademische Ausbildung oder ihre Selbstausbildung durch verschiedene Bildungsprogramme/Ausbildungen oder lebenslanges Lernen fort.

In den besten Bildungssystemen der Welt müssen die Schüler zwischen 175 und 220 Tagen im Jahr (oder zwischen 35 und 45 Wochen) zur Schule gehen. Der durchschnittliche Schultag dauert zwischen 5 und 8,5 Stunden pro Tag (siehe Abbildung 4). Diese Schwankung deutet darauf hin, dass die Gesamtzahl der Schultage (oder -stunden) pro Jahr kein entscheidender Faktor für die Leistung der Schüler ist. (NCEE, 2018)

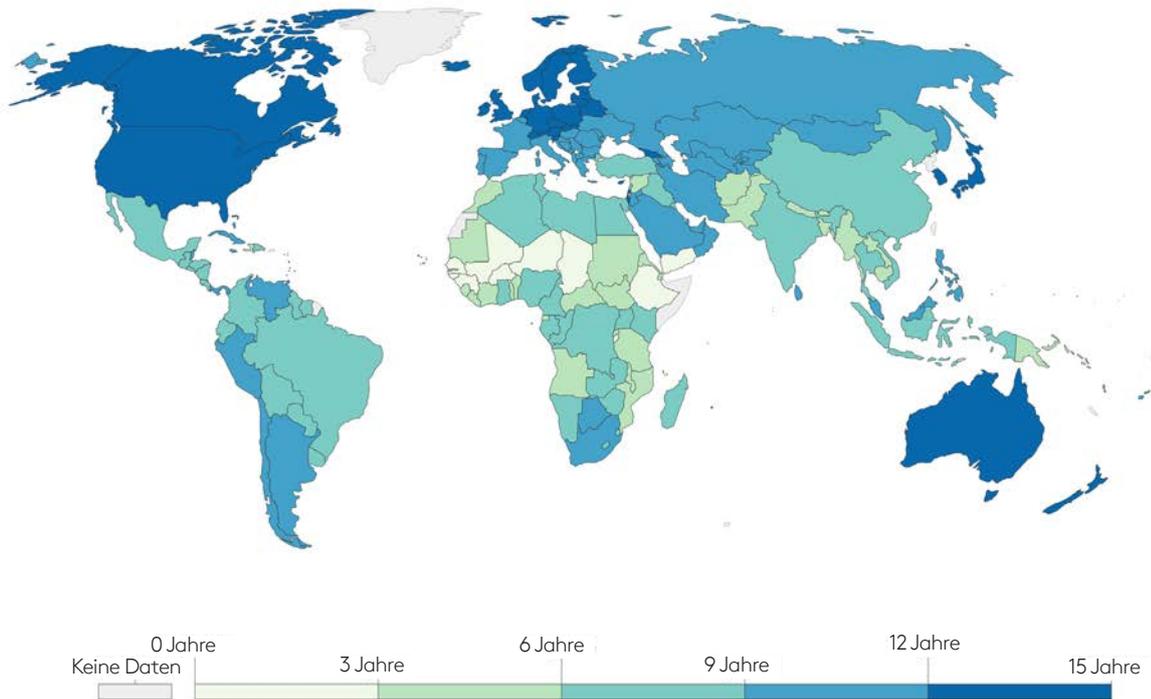


Abbildung 3: Durchschnittliche Anzahl der Schuljahre in der Welt im Jahr 2017 über alle Bildungsstufen ab 25 Jahren (Unsere Welt in Daten, 2016)

Es gilt zu beachten, dass die Gesamurlaubsdauer zwischen 8 und 16 Wochen liegen kann (einschließlich der Sommerferien von 5 bis 11,5 Wochen pro Jahr und zusätzlicher Pausen während des Jahres).

Auf der Grundlage dieser Informationen kann die formale Ausbildung im Allgemeinen auf 10-12 Jahre (Minimum), 17-20 Jahre (Standard mit Universitätsausbildung) geschätzt werden, und sie kann auch bis zu 20+ Jahre dauern (mit postgradualer Ausbildung). Dies gilt hauptsächlich für entwickelte Länder.

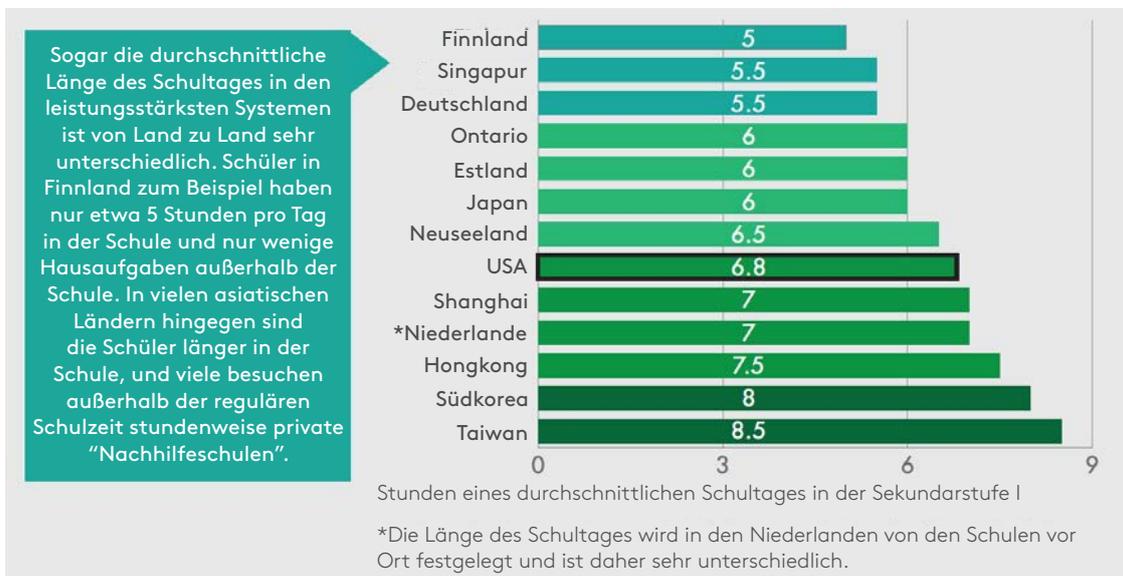


Abbildung 4: Wie lang ist der durchschnittliche Schultag (NCEE, 2018)



---

**Wichtiger als die Zeit, die die Schüler im Unterricht verbringen, ist die Art und Weise, wie sie diese Zeit verbringen (NCEE)**

---

# Bildung der Weltbevölkerung

Im Jahr 2021 beträgt die derzeitige Weltbevölkerung etwa 7,8 Milliarden Menschen. Die Bevölkerung im schulpflichtigen Alter (6-25 Jahre) macht etwa 33 % der Weltbevölkerung aus (Worldometers, 2021).

Es ist jedoch festzustellen, dass nicht alle Kinder Zugang zu einer angemessenen Bildung haben, insbesondere in unterentwickelten Ländern.

Zum Vergleich:

- Die derzeitige Bevölkerung in Europa macht 9,8 % der Weltbevölkerung aus (d. h. etwa 747 Millionen), und die europäischen Statistiken zeigen, dass 2018 etwa 76,2 Millionen Schülerinnen und Schüler in Schulen (davon 15,7 Millionen in Vorschulen) und weitere 17,5 Millionen Lernende im tertiären Bildungsbereich eingeschrieben waren. Dies entspricht einer Gesamtzahl von 76,2 Millionen Studierenden (Eurostat, 2020).
- Die Bevölkerung Nordamerikas macht 4,7 % der Weltbevölkerung aus (ca. 370 Millionen), und die Statistiken der USA und Kanadas zeigen, dass es im Jahr 2020 56,4 Millionen Lernende (in Grund-, Mittel- und Oberschulen) + 19,7 Millionen Studierende (in Colleges und Universitäten) + 2,1 Millionen Schülerinnen und Schüler in Kanada gibt. Dies entspricht einer Gesamtzahl von 78,2 Millionen.

Die Dauer der schulischen Ausbildung nimmt jedoch ständig zu. Wenn die derzeitigen altersspezifischen Einschulungsraten während der gesamten Schulzeit eines Kindes beibehalten werden, zeigt Abbildung 5 die Anzahl der Jahre, die ein Kind im Einschulungsalter erwarten kann.

Ausgehend von der durchschnittlichen Lebenserwartung von 79 Jahren in Europa und Nordamerika (82 Jahre für Frauen und 76 Jahre für Männer) und einer Ausbildungsdauer von 10 bis 20 Jahren kann geschätzt werden, dass ein Mensch etwa 1/7 oder sogar ein Viertel seines Lebens in der Schule verbringt (die Ausbildung vor und nach der Schule wird nicht berücksichtigt).

Dies entspricht 8.765 Stunden und bis zu 175.300 Stunden Bildung, und folglich, die in der Schule verbrachte Zeit.

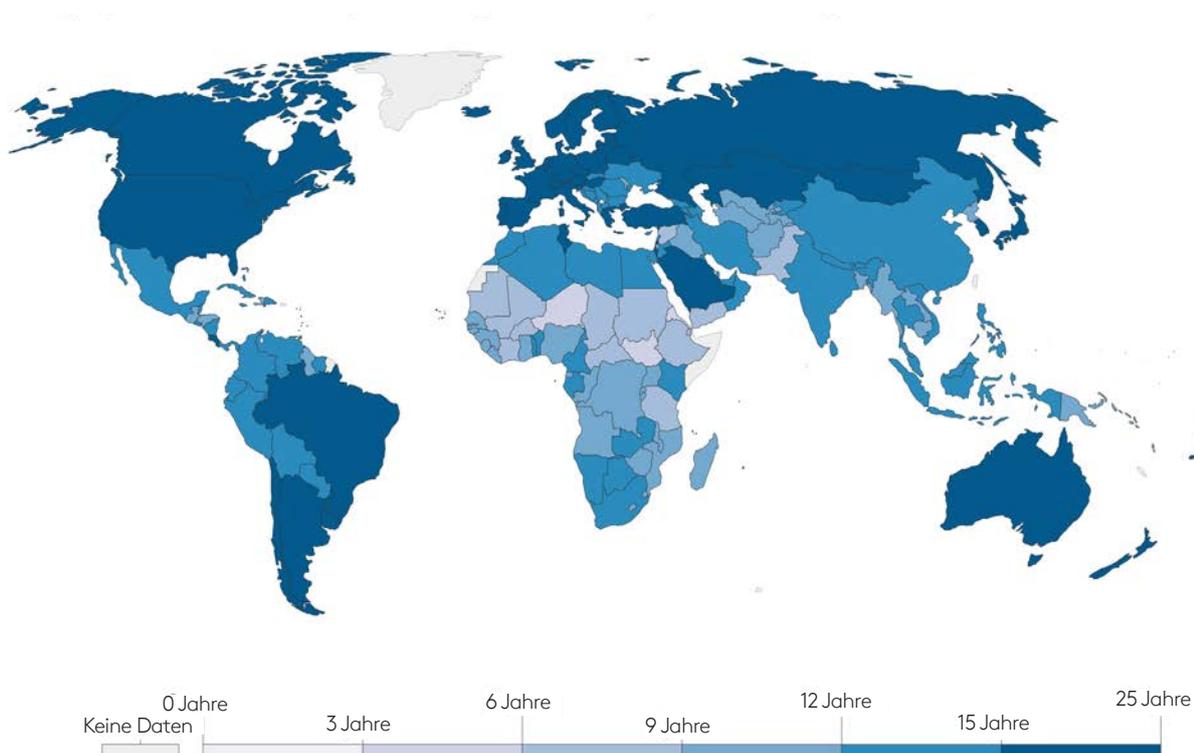


Abbildung 5: Erwartete Schuljahre im Jahr 2017, wenn die derzeitige Einschulungsrate beibehalten wird (Unsere Welt in Daten, 2016)

# Normen und Vorschriften für Komfort und Belüftung in Schulen

Die Belüftung in Schulen wirkt sich auf die Innenraumluftqualität (IAQ) aus, die im Allgemeinen anhand von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Konzentration und Belüftungsraten bewertet wird. Denken Sie daran, dass die IAQ Teil der Innenraumqualität (IEQ) ist, zu der auch andere Parameter (auf der Grundlage von PMV und PPD) gehören, wie z. B. thermischer Komfort, Tageslicht/Licht- und Schallbedingungen usw.

Der vorhergesagte Mittelwert der Stimmabgabe (PMV) und der vorhergesagte Prozentsatz der Unzufriedenheit (PPD) sind Indizes, die die Zufriedenheit der Gebäudenutzer mit der thermischen Umgebung ausdrücken (basierend auf der subjektiven Bewertung der Nutzer).

In Baunormen werden Bemessungswerte für verschiedene Gebäudetypen empfohlen. Diese allgemeinen Werte werden in der Regel auf internationaler und nationaler Ebene akzeptiert. Siehe Tabelle 1 der europäischen Baunormen (REHVA) und Tabelle 2 der amerikanischen Baunormen (ASHRAE). Es gibt auch einige spezifische Richtlinien für den Bau von Schulen - Belüftung, Komfort und IAQ (Building Bulletin und Passivhausanforderungen).

In den Normen für Schulen (Klassenzimmer, Hörsäle und andere Räume) werden häufig die Temperaturen für Sommer und Winter (min., max. in °C), die relative Luftfeuchtigkeit (%), der CO<sub>2</sub>-Gehalt (ppm), die Belüftungsrate und anderes mehr angegeben. Außerdem gibt es Richtlinien für die visuellen und akustischen Werte.

## EN 16798-1:2019

Die für eine bestimmte Sehaufgabe erforderlichen Lichtstärken und die empfohlenen Werte für Schulen sind 100 Lux für Bewegung in Fluren, 300 Lux für einfache Aufgaben in Klassenräumen, 500 Lux für mäßig komplexe Aufgaben in Hörsälen und Labors und 750-1.000 Lux für komplizierte Aufgaben. Die empfohlenen Werte für die künstliche Beleuchtung in Schulen sind jedoch 300 Lux.

Der empfohlene Geräuschpegel (in Innenräumen) beträgt 35 dB(A) für Klassenräume und 40 dB(A) für andere Bereiche.

EN 16798-1:2019 Energieleistung von Gebäuden. Belüftung von Gebäuden. Eingangsparemeter für die Innenraumumgebung für die Planung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden unter Berücksichtigung der Luftqualität in Innenräumen, der thermischen Umgebung, der Beleuchtung und der Akustik.				
	IEQ I (hoch)	<b>IEQ II (mittel)</b>	IEQ III (mässig)	IEQ IV (niedrig)
Temperatur [°C]-Bereich für den Winter mit Clo 1,0 (*bei einem Aktivitätsniveau von 1,2 erfüllt)	21-23 [°C]	<b>20-24 [°C]</b>	19-25 [°C]	17-25 [°C]
Temperatur [°C]-Bereich für den Sommer mit Clo 0,5 (*adaptiv - weniger strenge Temperaturgrenzen)	23.5-25.5 [°C]	<b>23-26 [°C]</b>	22-27 [°C]	21-28 [°C]
Relative Luftfeuchtigkeit - mit optimalen Werten von 40-60%	30-50%	<b>25-60 [%]</b>	20-70 [%]	<20, >70 [%]
CO <sub>2</sub> -Konzentration - Höchstwerte (*Werte über der Außenkonzentration von 480 ppm + maximal zulässige Konzentration oben)	1,030 [ppm] (480+550)	<b>1,280 [ppm] (480+800)</b>	1,830 [ppm] (480+1,350)	>1,830 [ppm] (480+>1,350)
Lüftungsrate (*Frischluftezufuhr von mindestens 3-5-8 l/s/p)	1.0-6.0 [l/s, m2]	<b>0.7-4.2 [l/s, m2]</b>	0.4-2.4 [l/s, m2]	0.3-2.0 [l/s, m2]

Tabelle 1: Parameter für Gebäude aus den europäischen Baunormen

**Diese Norm konzentriert sich auf die Festlegung neuer Regeln und Anforderungen für Innenraum-Umweltparameter für das thermische Umfeld, die Raumluftqualität, Beleuchtung und Akustik, und erläutert die Verwendung dieser Parameter für die Gebäudesystemplanung und Berechnung der Energieleistung. (CEN, 2021)**

## ASHRAE 62.1:2019

ASHRAE empfiehlt 300-500 Lux und 30-45 dB(A) für den Klassenraum.

ASHRAE 62.1:2019 Lüftung für akzeptable Innenraumluftqualität ASHRAE 55:2020 Thermische Umgebungsbedingungen für den menschlichen Aufenthalt		
Temperaturbereich [°C] für den Winter (*unter der Annahme einer sitzenden und leicht aktiven Tätigkeit)		20-24 [°C] (68-75°F)
Temperaturbereich [°C] für den Sommer		23-26 [°C] (73-79°F)
Relative Luftfeuchtigkeit - optimale Werte		30-60 [%]
CO2-Konzentration (*Außenkonzentration von 400 ppm)		1,000 [ppm] for teaching facilities (*1,500 [ppm] maximum level)
Belüftungsrate	Klassenzimmer, Kunstraum, Computerraum (*Insassendichte 20-35 Personen pro 100 m2)	10 [ft3/min/p (or cfm/p)] or 5 [l/s/p] or 0.6 [l/s, m2]
	Vorlesungsraum, Hörsaal (*Besetzungsdichte 65-150 Personen pro 100 m2)	7.5 [ft3/min/p (or cfm/p)] or 3.8 [l/s/p] or 0.3 [l/s, m2]

Table 2: Parameters from the American building standards

**Bis zum Schulabschluss verbringen die Schüler mehr als 15.000 Stunden in der Schule, was nach der Zeit zu Hause die zweitlängste Exposition in Innenräumen ist (Schools for Health).**

## Baubulletin 101:2018

Ein weiteres interessantes Dokument ist B.B. 101:2018 Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools (herausgegeben von der Education and Skills Funding Agency, U.K.) mit strengeren Luftqualitätszielen und CO<sub>2</sub> als Schlüsselindikator für Belüftung und IAQ. (BB 101, 2018)

- Bei natürlicher Belüftung sollte ausreichend Außenluft zur Verfügung gestellt werden, um eine durchschnittliche tägliche CO<sub>2</sub>-Konzentration <1.500 ppm zu erreichen. Die maximale Konzentration sollte auch nicht länger als 20 Minuten pro Tag 2.000 ppm überschreiten.
- Bei mechanischer Belüftung sollte während der Aufenthaltsdauer ausreichend Außenluft zugeführt werden, um eine durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration von <1.000 ppm pro Tag zu erreichen (die maximale Konzentration sollte 1.500 ppm nicht länger als 20 Minuten pro Tag überschreiten).

---

**Um die Konzentration von Kohlendioxid in allen Lehr- und Lernräumen zu begrenzen wird eine mechanische Belüftung empfohlen (Building Bulletin 101:2018).**

---

- Zur Kontrolle des Raumklimas sollte eine kontinuierliche Überwachung mit Parametern wie Temperatur, CO<sub>2</sub>, Energieverbrauch usw. eingesetzt werden.
  - Außerdem wächst die Besorgnis über die Umweltqualität in Innenräumen (IEQ) von Schulgebäuden sowie über die Notwendigkeit, Schadstoffe in Innenräumen, wie z. B. CO<sub>2</sub>, zu kontrollieren.
  - Ein erheblicher Teil der Außenluftverschmutzung in Städten und Stadtzentren wird den Gebäuden zugeführt und erhöht dadurch die Schadstoffbelastung in Innenräumen. Dies bedeutet, dass die einströmende Luft stärker als üblich gefiltert werden muss.
  - Ein Luftzug (hohe Luftgeschwindigkeit), (manchmal von der Außenluft verursacht) wird dem Innenraum durch eine mechanische Lüftungsanlage zugeführt, so dass die akzeptable Zulufttemperatur für jeden Raumtyp in der Regel bei 16°C liegt (unter der Annahme, dass die Raumtemperatur 21°C betragen soll). Die Luftgeschwindigkeit sollte im Bereich von ca. 0,12-0,25 m/s und innerhalb des Temperaturbereichs von 19-27°C gehalten werden.
- In einem neuen Gebäude sollte die Lüftungslösung so ausgelegt sein, dass eine CO<sub>2</sub>-Konzentration <1.200ppm für den Großteil der bewohnten Zeit während des Jahres einzuhalten ist (entspricht einer Außenkonzentration von 400 ppm im Freien + 800 ppm in Innenräumen). In einem renovierten Gebäude kann die CO<sub>2</sub> Konzentration auf bis zu 1.750 ppm ansteigen.

- Das Konzept der adaptiven thermischen Behaglichkeit wird ebenfalls eingeführt, um eine Überhitzung in Gebäuden zu vermeiden, so dass sich die Temperaturschwelle je nach den äußeren Bedingungen täglich ändern kann. Mit dem Hauptkriterium, dass die Anzahl der Stunden, in denen die vorhergesagte Betriebstemperatur die maximal akzeptable Betriebstemperatur um 1 K oder mehr übersteigt, darf sie im Zeitraum vom 1. Mai bis zum 30. September nicht mehr als 40 belegte Stunden betragen.
- Der Geräuschpegel in einem normalen Klassenzimmer sollte 35 dB(A) nicht überschreiten, einschließlich des Außenlärms. Räume für Schülerinnen und Schüler mit besonderen pädagogischen Bedürfnissen (SEN) sollten 30 dB(A) nicht überschreiten. Dies erfordert in der Regel eine Kombination aus einem geräuscharmen Betrieb des Belüftungssystems selbst und einer Dämpfung des Außenlärms, entweder durch eine zusätzliche Dämpfung des Kanalnetzes im zentralen System oder durch Einzelgeräte, die in den Luftkanälen ein hohes Maß an Schalldämmung aufweisen.

Weitere Bau Bulletins für Schulen sind B.B. 87 (Leitfaden für die Umweltgestaltung in Schulen) und B.B. 93 (Akustische Gestaltung von Schulen).



# Passivhausanforderungen für Schulen

Heute wird der Passivhausstandard häufig für alle Arten von Gebäuden verwendet, und die Forschungsgruppe hat auch eine Reihe von Kriterien für den Bau von Passivhausschulen entwickelt. (Passipedia, 2020)

Im Folgenden sind einige allgemeine Anforderungen an ein Passivhaus aufgeführt: Jahresheizwärmebedarf von  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (bezogen auf die gesamte Nettonutzfläche), erforderliche Luftdichtheit von  $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$  ( $< 0,3$  wird empfohlen), Fenster-U-Wert  $\leq 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (einschließlich Installationswärmebrücken), Jahresprimärenergiebedarf  $\leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  für alle dem Gebäude zugeführten nicht erneuerbaren Energien usw.

## Es gibt auch Anforderungen für Passivhausschulen:

- Eine moderne Schule sollte über eine mechanisch kontrollierte Belüftung verfügen, um Frischluft zuzuführen, die den Kriterien einer akzeptablen Innenraumluftqualität entspricht.
- Die Luftmengen des Belüftungssystems der Schule sollten sich an Gesundheits- und Bildungszielen orientieren und nicht an den Obergrenzen der Komfortkriterien ( $\text{CO}_2$ -Werte von  $1.200$ - $1.500 \text{ ppm}$ ).
- Die geplanten Luftvolumenströme sollten zwischen  $15$ - $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person}$  liegen (bei einem höheren Durchschnittsalter der Schüler möglicherweise mehr).
- Die relative Luftfeuchtigkeit in den Räumen sollte über  $\sim 30\%$  gehalten werden.
- Wenn die Außentemperaturen niedrig sind (unter  $\sim 14^\circ\text{C}$ ), muss ein Luftbefeuchter verwendet und stets sauber gehalten werden.
- Der Frischluftbedarf in einem Klassenzimmer beträgt etwa  $3 \text{ h}^{-1}$  oder sogar noch mehr, wenn er durch eine mechanische Frischluftzufuhr gedeckt wird.
- Lüftungsanlagen in Schulen müssen periodisch oder bedarfsabhängig betrieben werden.
- Die Regulierung der Luftmenge erfolgt nach Bedarf und in Abhängigkeit von der Belegung ( $\text{CO}_2$  wird als Luftqualitätsindikator verwendet).
- Passivhausschulen müssen mit einer Gebäudehülle mit hohem Wärmeschutz ausgestattet sein. Dies ist das zentrale und entscheidende Kriterium für Schulen.
- Um den sommerlichen Komfort in einer Passivhausschule zu gewährleisten, sollte die Häufigkeit von Temperaturen über  $25^\circ\text{C}$  auf weniger als  $10\%$  der Nutzungsstunden begrenzt werden.
- Aufgrund der extrem hohen temporären inneren Lasten in Schulgebäuden ist der Behaglichkeit im Sommer besondere Aufmerksamkeit zu schenken (bei Hitzeperioden durch ausreichende Nachtlüftung - mechanische und/oder freie Kühlung - sowie durch eine wirksame Beschattung der Verglasung).

Swegon in Schulen:  
Jean-Giono-Gymnasium  
Marseille, Frankreich  
Fläche: 6,000 m<sup>2</sup>



# Grundlegende Anforderungen für Bildungseinrichtungen

## Entwurf und Planung

Schulen bestehen aus organisierten Bereichen, die auf den Zweck des Lehrens und Lernens ausgerichtet sind und sich in einem oder mehreren Gebäuden befinden. Die grundlegenden Bereiche sind Klassenräume für die Hauptfächer (allgemeinbildende Fächer, Informatik, Sprachen usw.), Werkstätten (Kunst, Naturwissenschaften, Labore usw.) und andere Bildungsräume (Medienzentrum, Bibliothek).

Das Schulgebäude verfügt in der Regel auch über große Bildungs-/Veranstaltungsräume (Aula und Hörsaal), Verwaltungsräume (für Lehrkräfte, Verwaltungspersonal, Besuchende und Eltern) und Sporträume (Sporthalle, Turnhalle usw.), einschließlich Einrichtungen. Es gibt auch andere Räume wie eine Cafeteria/Speisesaal und Außenbereiche zum Entspannen (Hannover Research, 2011).

Alle Schulgebäude sind das Ergebnis des sozialen Handelns verschiedener relevanter Akteure (Architektinnen und Architekten, Regierungsmitarbeitende, Planerinnen und Planer, Abteilungen, Schulbehörden, Lernende, Lehrende usw.), die die Planung und Gestaltung eines Gebäudes beeinflussen und das Gebäude während der Nutzung (neu) interpretieren können.

---

**Licht, Temperatur und Luftqualität.  
Diese Elemente machen zusammen  
mehr als die Hälfte der Faktoren aus,  
der sich über die Schulbaugestaltung  
auf den Lerneffekt auswirken.  
(Building better schools, Velux).**

---

Swegon in Schulen:  
Allgemeines und technisches Gymnasium  
Carquefou, Frankreich  
Fläche: 11,500 m<sup>2</sup>



## Design-Anforderungen

- Zugänglich und anpassungsfähig - so konzipiert, dass es flexibel ist, um das Potenzial zu erhöhen, z. B. durch Änderung der Bereiche, einfache Änderung der Anordnung der Möbel und der Nutzung.
- Ästhetik - ausgewogen und die Werte der Bildung widerspiegelnd.
- Effektiv und effizient - in Bezug auf Kosten und Energie, Abwägung von Entwurfs- und Baukosten mit Wartungs- und Betriebskosten.
- Umweltfreundlich - in Bezug auf Baumaterialien, Ausrüstung und Produkte.
- Komfortabel und funktional - ein produktives Schulumfeld, das Schülern und Mitarbeitern ein komfortables, sicheres und gesundes Umfeld bietet. Insbesondere im Hinblick auf die Qualität der Innenraumluft und den thermischen Komfort der Bewohner.
- Sicher und nachhaltig - in Bezug auf alle Sicherheitsaspekte und sicheres Schuleigentum (menschliche und materielle Werte für Bewohner und Besucher) und widerstandsfähig gegenüber Umwelt- und Klimaveränderungen.

## Räumliche Gegebenheiten und Anforderungen an Schulen

Die Gestaltung der Schule bzw. die räumlichen Gegebenheiten, die spezifischen Merkmale für den Unterricht und die äußeren Bedingungen haben großen Einfluss auf die Schulgebäude. Von traditionellen Schulgebäuden (z. B. Ein-Klassen-Schulen um 1900) bis hin zu den pädagogischen Anforderungen des 21. Jahrhunderts (offene Klassenzimmer mit Räumen für gemeinschaftliche Aufgaben) ist eine effektive Strategie erforderlich, und die Flexibilität aller Räume muss auch in Zukunft höchste Effizienz und Anpassungsfähigkeit aufweisen (Rigolon, 2010).

---

### **Nach Angaben des US-Umweltbundesamtes (EPA) befinden sich in Schulen bis zu viermal mehr Menschen als in Bürogebäuden auf der gleichen Fläche (EPA).**

---

Es gibt viele verschiedene Arten von Schulgebäuden (z. B. Innenhof, Block, Cluster, stadtähnliche Gebäude). Die heutigen Lernmethoden beruhen auf projektbasierten Aktivitäten, die die Lernenden aktiv einbeziehen (nicht wie früher auf der einfachen Wissensvermittlung), und daher hat eine effektive Flexibilität bei der Raumnutzung wichtige Auswirkungen auf die Gestaltung der Schulgebäude.

Die Anzahl der Schülerinnen und Schüler ist relativ hoch und reicht von einigen Hundert bis zu mehreren Tausend. Der Klassenraum hat eine durchschnittliche Grundfläche von 40-80 m<sup>2</sup>. Die Klassengröße schwankt zwischen 17 und 30 Lernenden, wobei es jedoch große Unterschiede zwischen den Ländern geben kann (siehe Abbildung 6). Dies entspricht einer durchschnittlichen Bodenfläche pro Schülerin bzw. Schüler zwischen 2,27 m<sup>2</sup> und 3,63 m<sup>2</sup>, ohne Berücksichtigung der Bodenfläche, die durch Möbel belegt ist. (Trachte et al., 2015)

Überraschenderweise gibt es nur wenige Bauvorschriften für den Raumbedarf, in denen die Abmessungen und das Volumen der Klassenräume (in Bezug auf m<sup>2</sup> - oder m<sup>3</sup> - und pro Schüler) angegeben sind. Andere Forschungsergebnisse weisen auf den Richtwert von 0,6-3 m<sup>2</sup>/Student für große Hörsäle/Auditorienräume hin (Engineering Toolbox, 2003).

Im Durchschnitt sitzen etwa 10-13 Lernende pro Unterrichtsleiter:in im Klassenzimmer (Eurostat, 2020).

\*Im Vergleich dazu zeigen die Daten für die Bürobelegung 7-13 m<sup>2</sup>/Bewohner in Bürogebäuden.

Durchschnittliche Klassengröße, nach Bildungsniveau (2018)

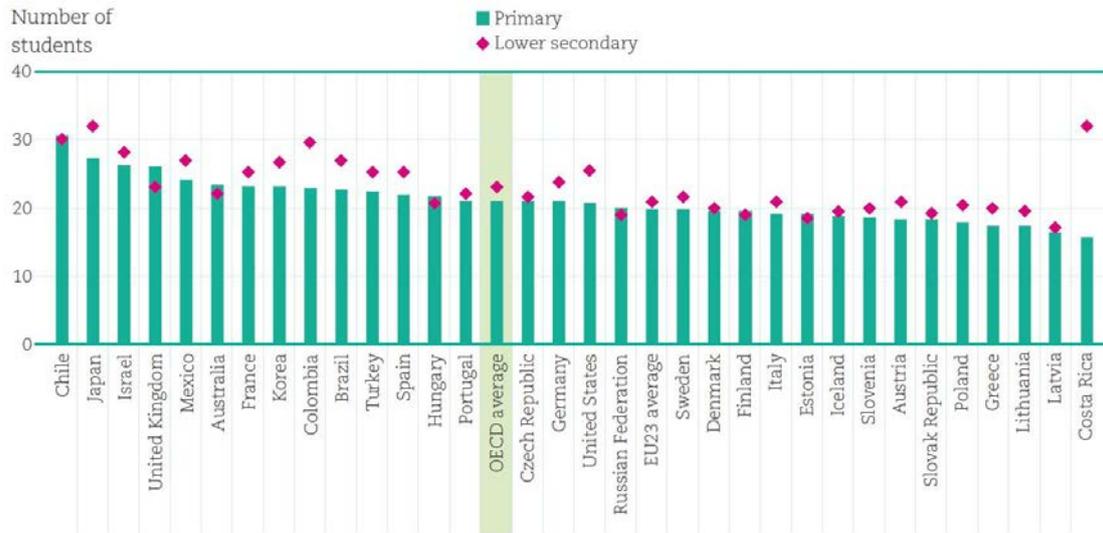


Abbildung 6: Durchschnittliche Anzahl der Schüler im Klassenzimmer nach Bildungsniveau (OECD, 2018).

## Entwurfspläne im Vergleich zur tatsächlichen Nutzung

In modernen Gebäuden werden Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HVAC) häufig zunächst auf der Grundlage einfacher Belegungspläne (und anderer Pläne wie Beleuchtung, Heizungs-/Kühlungsanforderungen) geplant.

Diese Planungswerte werden in der Regel in der ersten Phase verwendet, und in der Folgezeit werden die Gebäudesysteme mit Steuerungen zur Feinabstimmung der tatsächlichen (realen) Belegung auf der Grundlage einer kontinuierlichen Datenerfassung (oder Überwachung) eingesetzt.

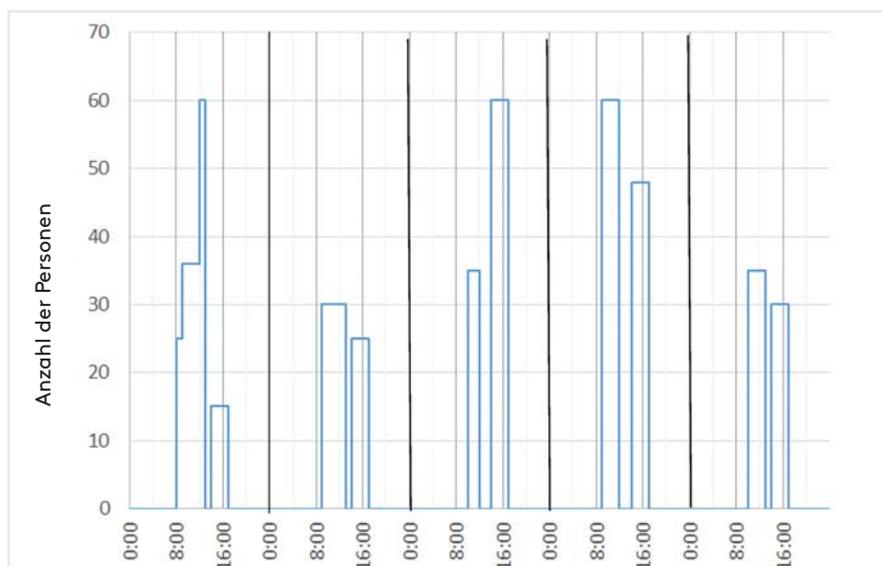


Abbildung 7: Tatsächliche (gemessene) Belegung der Klassenräume während einer Woche (Montag bis Freitag) an der KU Leuven in Belgien. Anmerkung dass die maximale Belegung 80 Personen oder 1,78 m<sup>2</sup>/Person beträgt. (Breesch et al., 2019)

Die Daten über die tatsächliche Belegung zeigen jedoch, dass die Klassenzimmer in der Regel mehr unbelegt als belegt sind und die Schulen hauptsächlich während der Schulzeit belegt sind und an Wochenenden und Feiertagen mehr oder weniger leer stehen (siehe Abbildung 7).



Die Nutzung von Räumen in Schulen hängt stark von der Art der Schule/Bildung (typisches College im Vergleich zu einer naturwissenschaftlichen Schule), der Art des Raumes (Nutzung eines Klassenzimmers im Vergleich zu Computerräumen) und der Anzahl der typischen Räume (normalerweise viele allgemeine Klassenzimmer im Vergleich zu einer einzigen Sporthalle) ab, siehe Abbildung 8.

Schulgebäude werden etwa 30 Wochen bzw. 200 Tage im Jahr genutzt, mit relativ langen Leerstandszeiten, und im Allgemeinen finden an Wochenenden und Abenden nur wenige Aktivitäten statt, abgesehen von der teilweisen Belegung von Sporthallen oder einigen Kulturräumen.

Ein weiterer Faktor, der Bildungseinrichtungen in gewisser Weise einzigartig macht, ist die Art und Weise, wie sie genutzt werden. Studien zeigen, dass die Auslastung in der Regel niedrig oder sehr niedrig ist. Das bedeutet, dass die meisten Räume im Schulgebäude zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht genutzt werden und die Belüftung minimiert werden könnte. Andererseits ist der Bedarf an Lüftung (und damit auch an einem guten Raumklima) sehr hoch, wenn die Räume genutzt werden.

Kurz gesagt, die Forschungsdaten zeigen, dass die Schulen Probleme mit einer hohen Belegungsichte in den Klassenzimmern haben, was zu einer Überbelegung und einem höheren Lüftungsbedarf aufgrund der hohen internen Gewinne und erheblichen Schadstoffemissionen innerhalb (und oft auch außerhalb) der Gebäude führt.

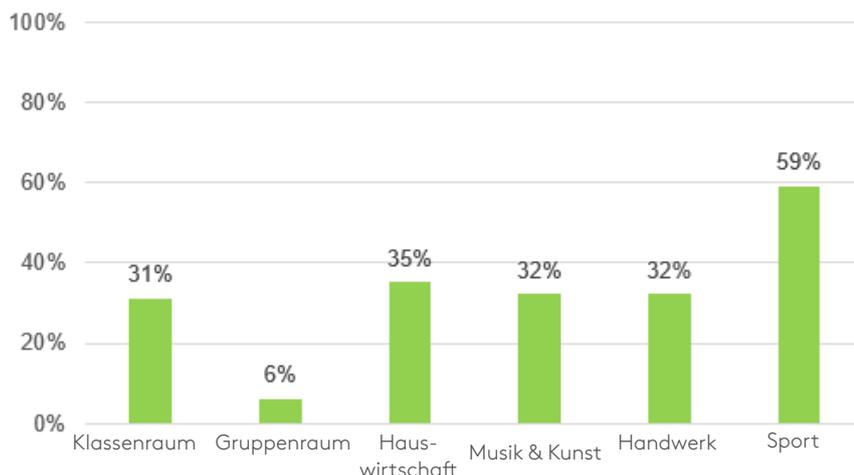


Abbildung 8: Belegungsrate der verschiedenen Raumtypen in Schulgebäuden (Johansson, 2010).

# Luftaustausch in Schulen

Um ein gutes Raumklima zu gewährleisten, muss das Schulgebäude über ein Luftaustauschsystem verfügen - zufällige und/oder kontrollierte Luftbewegung. Der Luftaustausch kann durch Infiltration (durch eine nicht luftdichte Gebäudehülle), Lüften (manuelle Betätigung von Öffnungen) und Belüftung (natürlich, mechanisch oder hybrid) erfolgen. Weitere Informationen finden Sie in Abbildung 9.

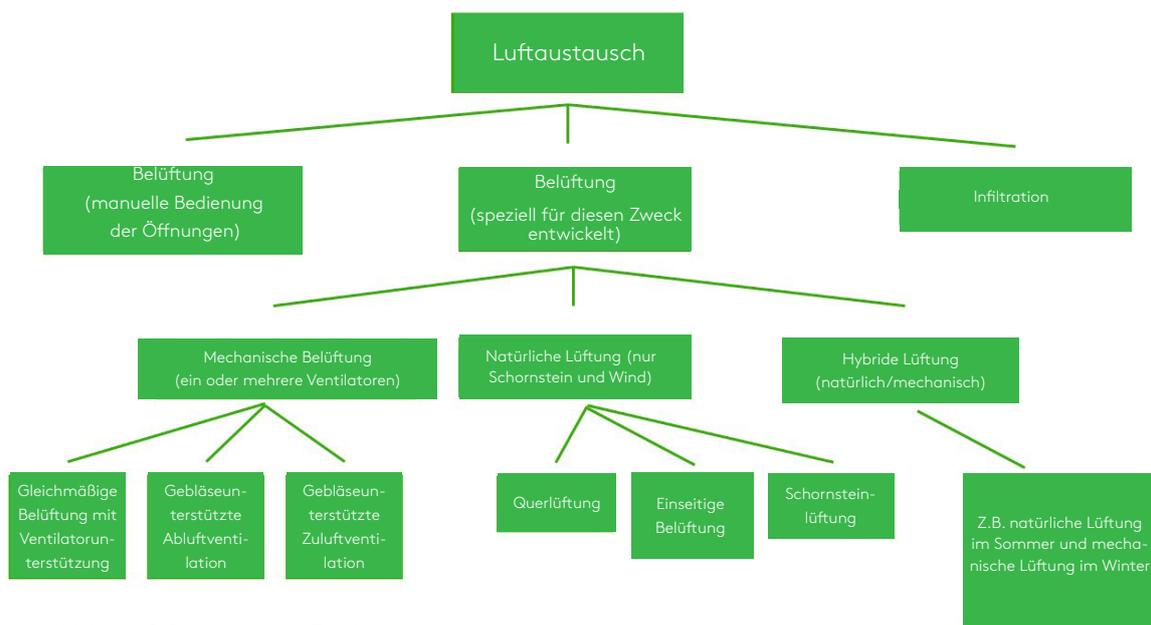


Abbildung 9: Beispiel für eine Typologie von Lüftungssystemen.

## Infiltration

Luftleckagen, auch bekannt als Infiltration, sind in der Regel unbeabsichtigt und können verschiedene Probleme verursachen, wie z. B. Energieineffizienz (25-50 % der Kühl-/Heizkosten), Probleme mit dem Komfort (Zugluft, Feuchtigkeitsleckagen, Radon und Schimmel), und es ist fast unmöglich, das gewünschte Innenraumklima aufrechtzuerhalten und zu kontrollieren (Younes et al., 2011).

Die Infiltration kann in der Tat durch einen Blower-Door-Test gemessen werden. Für die Passivhauszertifizierung ist beispielsweise eine gute Luftdichtheit von  $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$  erforderlich.

Der Luftdrucktest bzw. der  $n_{50}$ -Wert misst die Gesamtleckage durch die Gebäudehülle (beschreibt die Luftwechsel bei einem Differenzdruck von 50 Pa). Die  $n_{50}$ -Leckraten dürfen nicht größer als  $0,6 \text{ h}^{-1}$  sein, um die Zertifizierungskriterien für Passivhäuser zu erfüllen (laut Passivhaus Institut).

Eine wirksame Reduzierung der Infiltration erfordert ein durchgängiges Luftdichtheitssystem, um eine luftdichte Gebäudehülle zu schaffen usw.

Es gibt zahlreiche Messungen der durchschnittlichen Infiltration in Klassenzimmern, die eine Spanne von unter  $0,6 \text{ h}^{-1}$  (moderne Schulgebäude) über  $1,1-4,6 \text{ h}^{-1}$  (neuere Schulgebäude) bis hin zu  $7-9 \text{ h}^{-1}$  (Standardschulgebäude) zeigen.

## Natürliche Belüftung

Das Lüften, auch als natürliche Belüftung bezeichnet, ist eine traditionelle Technik zum Austausch von (verbrauchter) Innenluft gegen (frische) Außenluft. Natürliche Belüftung ist der absichtliche Austausch von Luft durch Öffnungen (Fenster/Türen, Entlüftungsöffnungen, Dachschnornsteine usw.). Die Bedienung der Öffnungen kann manuell, automatisch oder beides erfolgen. Die treibende Kraft der natürlichen Lüftung ist der Wind und der Kamineffekt. Dazu gehören einseitige Lüftung, Querlüftung oder Schornsteinlüftungssysteme.

Die natürliche Belüftung hängt von der architektonischen Gestaltung, der Gebäudehülle, der Rolle der Bewohner (wie oft sie die Fenster öffnen oder nicht öffnen) sowie von der Außen- und Innenumgebung ab.

Das Öffnen der Fenster zum Lüften kann problematisch sein, wenn die Außenbedingungen nicht gut sind, sei es durch Luftverschmutzung, kaltes/heiβes Wetter, Lärm von außen, Wind usw. Es ist auch schwierig, die Menge des Luftaustauschs zu kontrollieren, d. h. das Innenraumklima aufrechtzuerhalten, da die Luftströme komplexer sind und sich nur schwer vorhersagen lassen. Ein Teil der natürlichen Belüftung kann auch eine freie Kühlung sein, die in der Regel nachts eingesetzt wird, um das Schulgebäude abzukühlen und eine Überhitzung im Sommer zu vermeiden.

Damit die natürliche Belüftung wirksam ist, sollte die Außenluftzufuhr zu allen Lehr- und Lernbereichen mindestens 3 l/s pro Person betragen, einen Tagesdurchschnitt von mindestens 5 l/s pro Person aufweisen und in der Lage sein, zu jeder belegten Zeit mindestens 8 l/s pro Person zu erreichen (BB 101, 2018).

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Fenster ausreichend Luft liefern können, um die Anforderungen an die Luftqualität in Innenräumen zu erfüllen, wenn die Außentemperatur über 8 °C liegt und die Windgeschwindigkeit unter 10 m/s beträgt (Angelopoulos, 2017).

Bei Verwendung einer natürlichen Lüftung (mindestens 4 l/s/p) zeigt die Forschung, dass eine angemessene Belüftung nur für etwa ein Viertel des Jahres (24 %) erreicht wird (Duarte et al., 2017).



# Mechanische Belüftung

Der Luftaustausch oder die mechanische Belüftung ist die wirksamste Methode, um frische, gefilterte Luft in die Klassenzimmer zu bringen. Die Belüftung wird eingesetzt, um die Exposition gegenüber Luftschadstoffen zu verringern, die sich auf die menschliche Reaktion auswirken, und die mechanische Belüftung kann nur ein Teil einer Lösung zur Verringerung der Exposition sein (siehe Abbildung 10). Die Exposition kann auch auf andere Weise verringert werden, z. B. durch Quellenkontrolle, d. h. durch die Verringerung der Emissionen von Produkten, die in Gebäuden verwendet werden, oder durch das Auffangen von Schadstoffen an der Quelle, durch Filterung und Reinigung der Luft.

Die mechanische Belüftung ist die letzte Möglichkeit zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen, um die Risiken im Zusammenhang mit Expositionen zu verringern, die mit anderen Mitteln nicht reduziert werden können. Alles basiert auf der Annahme, dass die in den Innenraum zugeführte Luft sauber ist. Diese Voraussetzung muss immer erfüllt sein. (Wargocki, 2021)

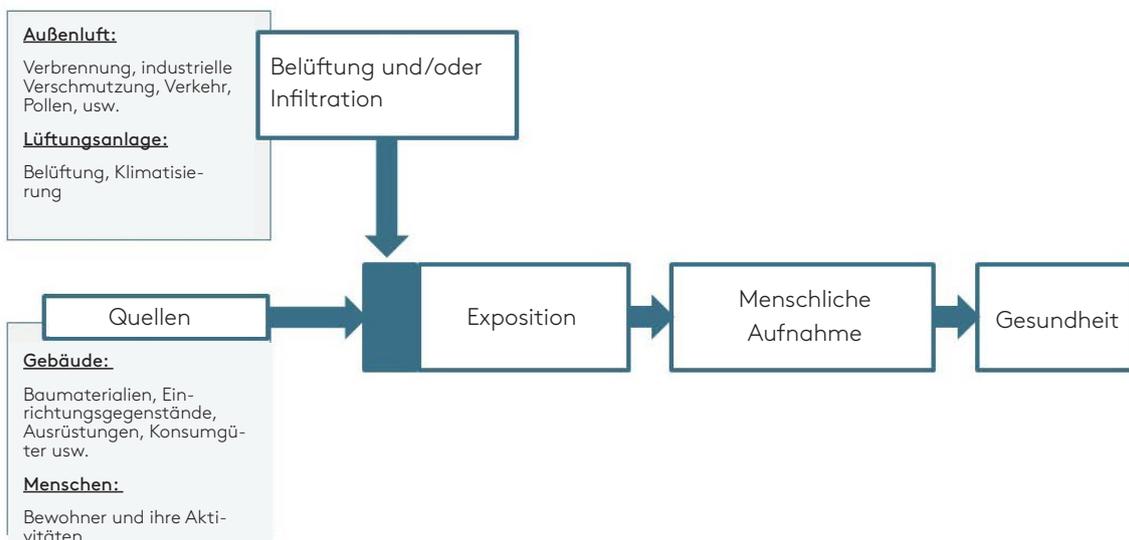


Abbildung 10: Mechanische Beatmung als vermittelnder Faktor, nicht als Ursache (Wargocki, 2021).

Die mechanische Lüftung sorgt für einen kontrollierten Zu- und Abluftstrom, der eine wesentliche Kontrolle von Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftqualität ermöglicht. Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und CO<sub>2</sub>-Sensoren (die mit VOC gekoppelt sein können) erkennen Veränderungen im Verschmutzungsgrad und passen die Ventilatorgeschwindigkeit automatisch an, um eine zuverlässige Kontrolle der Luftqualität zu gewährleisten.

Es gibt viele Arten und Systeme der mechanischen Lüftung - zentral oder dezentral, verdrängend oder zonenbasiert, konstant oder variabel oder bedarfsgesteuert (CAV, VAV, DCV). Die mechanische Lüftung (HVAC) ist ein komplexes System mit vielen Komponenten wie Wärmerückgewinnung, Abluft, Luftfilter, Gebläse, Ventilatoren, Kanäle, Sensoren, Steuerungssystem usw.

Mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung kann bis zu 92 % der Energie zurückgewinnen, die normalerweise durch andere Arten des Luftaustauschs verloren gehen würde.

Swegon in Schulen:  
Olympus De Gouges Schule  
Paris, Frankreich  
Fläche: 12,600 m<sup>2</sup>



# Fakten und Erkenntnisse aus der Forschung

Kinder und Schulen erfordern ein besonderes Augenmerk, da der sich entwickelnde Körper von Kindern empfindlicher auf Umwelteinflüsse reagieren kann als der von Erwachsenen. Kinder atmen mehr Luft, essen mehr Nahrung und trinken mehr Flüssigkeit im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht als Erwachsene. Aus diesem Grund ist die Luftqualität in Schulen besonders wichtig. Die ordnungsgemäße Bereitstellung von Raumluft ist mehr als nur eine Frage der "Qualität"; sie umfasst auch die Sicherheit und den verantwortungsvollen Umgang mit den Investitionen in Lernende, Personal und Einrichtungen.

Viele Faktoren können die schulischen Leistungen der Schüler beeinflussen, aber die Qualität der Innenraumluft (IEQ) in den Klassenzimmern kann sich positiv auf das Lehren und Lernen auswirken, was die Wahrscheinlichkeit besserer schulischer Leistungen der Schüler erhöht (siehe Abbildung 11).

**Kinder sind keine kleinen Erwachsenen. Sie haben einzigartige Bedürfnisse, Empfindlichkeiten und Verwundbarkeiten. Es wird immer deutlicher, dass die derzeitigen Bedingungen in den Schulgebäuden den sich entwickelnden Körper und Geist der Schüler möglicherweise nicht ausreichend schützen (Schulen für Gesundheit).**

Viele Schulen bieten den Schülern kein gutes Raumklima; sie sorgen nicht für eine ausreichende Außenluftzufuhr und sind in den Sommermonaten oft zu warm. Forschungsergebnisse deuten auf Luftverschmutzung in Innenräumen, überhöhte CO<sub>2</sub>-Werte, unzureichendes Tageslicht, einen hohen Lärmpegel und schlechte Belüftung hin. Im Zusammenhang mit Schulen gibt es - über die vier Wände der Schule hinaus - auch andere Faktoren, die auf die Schülerinnen und Schüler einwirken, wie Luftverschmutzung, Lärm und der Standort von Außenquellen. Verschiedene andere Faktoren beeinflussen die Luft in Schulen, wie z. B. eine veraltete Infrastruktur oder eine unzureichende Wartung der Geräte. Viele Probleme sind sowohl in alten als auch in ganz neu errichteten Schulgebäuden zu finden.

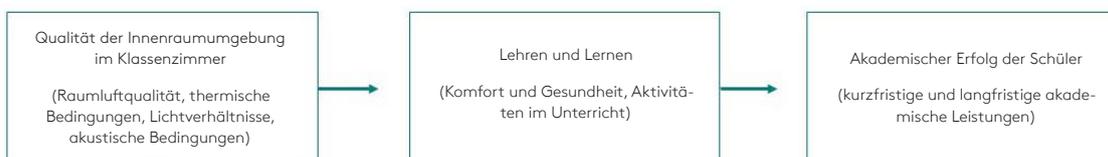


Abbildung 11: Konzeptueller Rahmen für den Einfluss der Umweltbedingungen in Innenräumen auf die schulischen Leistungen Schulen (Brink et al., 2020).

## Innenraumklima in Schulen

Umweltprobleme in Innenräumen können sehr subtil sein und haben nicht immer leicht erkennbare Auswirkungen auf Gesundheit, Wohlbefinden oder Leistung. Beim Innenraumklima in Schulen geht es um die Qualität der Innenraumluft (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO<sub>2</sub>, VOC usw.) und andere damit verbundene Bedingungen (thermischer Komfort, Licht, Lärm usw.). In Schulen gibt es jedoch auch verschiedene Schadstoffe aus Baumaterialien (Chemikalien, Reinigungsmittel für Kunst und Wissenschaft usw.) und lokale Probleme wie Schimmel, Asbest, Radon usw.

Das Innenraumklima in Schulen (Luftqualität und thermischer Komfort) wirkt sich auf die Schularbeit aus und verursacht vermutlich Unbehagen, verringert die Aufmerksamkeit und die Motivation (siehe Abbildung 12).

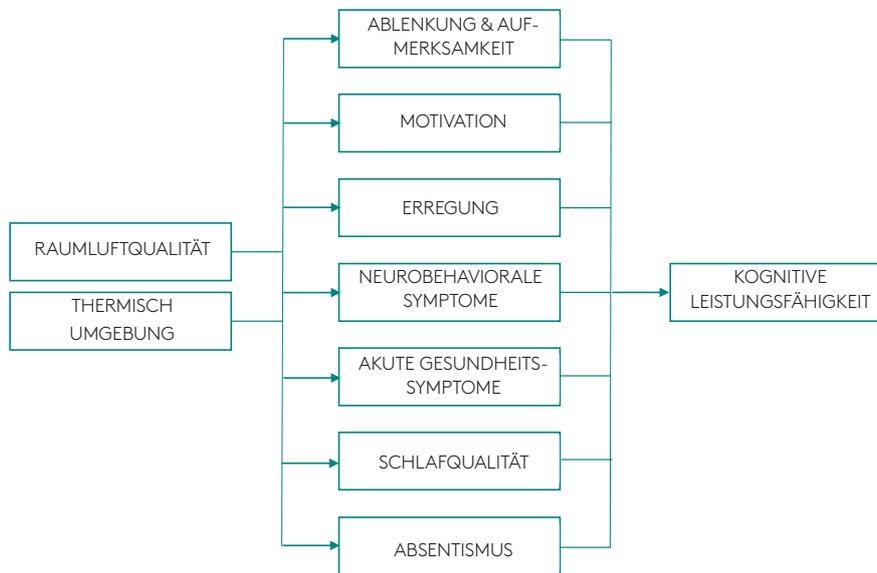


Abbildung 12: Der Mechanismus, durch den die geistige Arbeit durch die Luftqualität in Innenräumen und die thermische Umgebung beeinflusst wird (Wargocki et al., 2016).

### Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit (T, RH)

- In einer Umfrage unter mehr als 4 200 Schüler:innen und 134 Schulleiter:innen, die 297 Schulen in Finnland repräsentierten, wurden die Zusammenhänge zwischen den Gebäudeeigenschaften der Schule, der Luftqualität und den selbstberichteten Symptomen der oberen Atemwege untersucht. Die Forscher stellten fest, dass die von den Lernenden berichteten Symptome der oberen Atemwege signifikant mit den Berichten der Lehrenden über unbefriedigende (zu heiße oder zu kalte) Temperaturen in den Klassenzimmern während der Heizperiode verbunden waren (Toyinbo et al., 2016).
- Wärmere Temperaturen in den Klassenzimmern wurden auch mit der von den Schüler:innen wahrgenommenen schlechten Luftqualität sowie mit selbstberichteten Symptomen wie Verstopfung, Kopfschmerzen, Augen-, Nasen- und Rachensymptomen, Müdigkeit und Atemnot in Verbindung gebracht (Turunen et al., 2014; Bidassey-Manilal et al., 2016).
- In einer anderen Studie mit 10- bis 12-jährigen Kindern wurde beobachtet, dass die Senkung der Temperatur in den Klassenzimmern von 25 auf 20 °C während des warmen Wetters mit signifikanten Verbesserungen der Geschwindigkeit der Schüler bei arithmetischen und sprachbasierten Tests verbunden war. Die Kinder berichteten, dass sie die Raumluft als viel frischer empfanden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse berechneten die Forscher eine Dosis-Wirkungs-Beziehung, die besagt, dass jede Temperatursenkung um 1 °C (1,8 °F) zu einer Verbesserung der Leistungsgeschwindigkeit der Schülerinnen und Schüler um 4 % führen kann (Wargocki et al., 2013).
- Eine Studie mit mehr als 3 000 Schülern in 140 Klassenzimmern von Fünftklässlern im Südwesten der Vereinigten Staaten ergab ebenfalls, dass jede Temperatursenkung um 1 °C im Bereich von 20-25 °C mit einem zusätzlichen Anstieg der durchschnittlichen Testergebnisse der Schüler in Mathematik um 12-13 Punkte verbunden war. In den Naturwissenschaften und beim Lesen waren die Auswirkungen ähnlich groß, jedoch mit mehr Schwankungen. Die Forscher kamen zu dem Schluss, dass die akademischen Leistungen der Schüler erheblich von der Aufrechterhaltung eines angemessenen thermischen Komforts in Klassenzimmern profitieren könnten (Haverinen-Shaughnessy et al., 2015).
- In dem Bericht wurden die Ergebnisse von mehr als 200 wissenschaftlichen Studien ausgewertet. Einige Ergebnisse: Eine Umfrage unter 75 000 High-School-Schülern in New York City ergab, dass die Wahrscheinlichkeit, eine Prüfung nicht zu bestehen, an einem Tag mit 32°C (90°F) um 12,3 % höher ist als an einem Tag mit 24°C (75°F).

## Kohlendioxid-Konzentration (CO<sub>2</sub>)

- Bei normaler Atmung eines Kindes im Alter von 7-9 Jahren werden 14 Liter CO<sub>2</sub> pro Stunde freigesetzt, das sind 50 % weniger als bei einem Teenager (bei mäßiger körperlicher Aktivität kann ein 15-jähriger Schüler bis zu 85 Liter CO<sub>2</sub> pro Stunde freisetzen). Eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration macht Klassenräume ungemütlich.
- Die Ergebnisse von Studien mit 20 oder mehr Klassenzimmern zeigen CO<sub>2</sub>-Werte zwischen 1.400 ppm und 5.200ppm, siehe Abbildung 13 (Fisk, 2017).
- CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über 1.000 ppm können Konzentrationsschwäche, verschwommenes Sehen, Schwitzen, Unruhe, Erbrechen, Hautrötung und sogar Panikattacken verursachen.
- Für erhöhte CO<sub>2</sub>-Werte in Klassenzimmern wurden nachteilige Auswirkungen berichtet, darunter eine geringere Zufriedenheit mit der Luftqualität (Chatzidiakou et al., 2014) und Symptome von Keuchen bei Kindern in Kindertagesstätten (Carreiro-Martins et al., 2014).

- Bei ähnlich schlechten CO<sub>2</sub>-Werten (und Lüftungsraten) in Schulgebäuden wurden bei Schülern größere Müdigkeit und eine geringere Aufmerksamkeitsspanne (Chatzidiakou et al., 2012), schlechtere Leistungen bei Konzentrationstests (Dorizas et al., 2015) und eine geringere Konzentration bei Universitätsstudenten während der Vorlesungen beobachtet, siehe Abbildung 14 (Uzelac et al., 2015).

## Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

- VOC sind geruchlich nicht wahrnehmbar, können aber selbst bei Konzentrationen von weniger als 3 µg/m<sup>3</sup> die Gesundheit beeinträchtigen.
- Die Exposition gegenüber VOC in Innenräumen, wie Formaldehyd (das in vielen Klebstoffen, Leimen, Polyurethan, Schaumstoffisierungen, Spanplatten, Sperrholz, Pressholz, Faserplatten, Teppichböden und Stoffen enthalten ist), wird mit asthmaähnlichen Symptomen bei Schulkindern in Verbindung gebracht (Annesi-Maesano et al., 2013) sowie mit Reizungen der Augen, der Nase und des Rachens, Kopfschmerzen, Übelkeit und mehr (EPA, 2016)
- Feinstaub (PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub>) ist ein weiterer Schadstoff. Hohe Konzentrationen von PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub> in Innenräumen können zu Herz-Lungen-Erkrankungen führen.

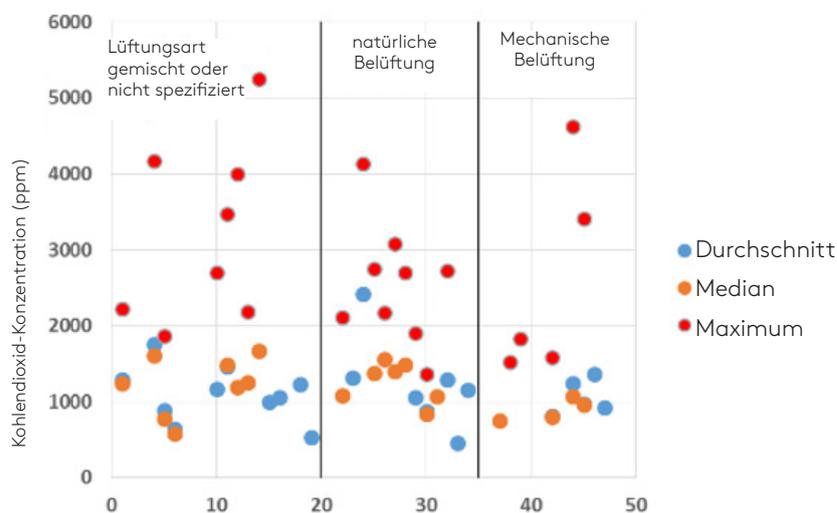


Abbildung 13: Gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration aus Studien mit 20 oder mehr Klassenräumen - Zeitdurchschnitt (Fisk, 2017).

# Komfort, Leistung und Belüftung

## Unterschiedliche Arten und Raten der Belüftung

- Die Belüftungsrate in den Klassenräumen steht in direktem Zusammenhang mit den schulischen Leistungen der Schüler. Messbare Fortschritte in den Fächern Mathematik und Lesen (bewertet durch standardisierte Tests) können beobachtet werden, wenn die Luftqualität in den Klassenräumen verbessert wird.
- Die internen Faktoren in den Klassenräumen, die sich negativ auf die Luftqualität auswirken, scheinen jedoch einen größeren Einfluss zu haben als Schadstoffe, die von außen kommen.
- Die Art des Belüftungssystems (natürlich, gemischt und mechanisch) hat ebenfalls Einfluss auf die CO<sub>2</sub>- und die Belüftungsrate (siehe Abbildung 13). Im Einklang mit den hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen berichten viele Studien über durchschnittliche oder mittlere Lüftungsraten im Bereich von 3 bis 5 l/s (6 bis 11 cfm) pro Bewohner, wobei eine Studie einen Durchschnitt von nur 1 l/s (2 cfm) pro Bewohner angibt (Fisk, 2017).
- Geringere Lüftungsraten wurden mit mehr Fehltagen in der Schule aufgrund von Atemwegsinfektionen in Verbindung gebracht (Toyinbo et al., 2016) sowie mit einer größeren Prävalenz und Häufigkeit von Symptomen des "Sick Building Syndroms" (Chatzidiakou et al., 2015).
- Geringere Lüftungsraten können zu vermehrten Asthmasymptomen, einer erhöhten Nasendurchlässigkeit und einem erhöhten Risiko für Virusinfektionen führen (Chatzidiakou et al., 2012) sowie zur Übertragung von luftübertragenen Infektionskrankheiten wie Windpocken, Masern und Influenza (Luongo et al., 2015).
- Forscher beobachteten einen Zusammenhang zwischen den Belüftungsraten und den Leistungen bei standardisierten Tests in Mathematik und Lesen. Sie schätzten, dass jede Erhöhung der Belüftungsrate um 1 l/s/p mit einer erwarteten Steigerung der Ergebnisse in Mathematik um 2,9 % bzw. in Lesen um 2,7 % verbunden war (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011).
- Der Zusammenhang zwischen Belüftung und Leistung wurde in einer anderen Studie bestätigt, in der festgestellt wurde, dass Schüler in Schulen, die eine Mindestlüftungsrate von 6 l/s/p nicht einhielten, mit größerer Wahrscheinlichkeit schlechtere Leistungen in Mathematiktests erzielten (Toyinbo et al., 2016).
- Die Ergebnisse von 11 Studien zeigen, dass sich die Leistung im Allgemeinen um bis zu 15 % verbessert, wenn die Beatmungsrate erhöht oder die CO<sub>2</sub>-Konzentration gesenkt wird (Fisk, 2017).

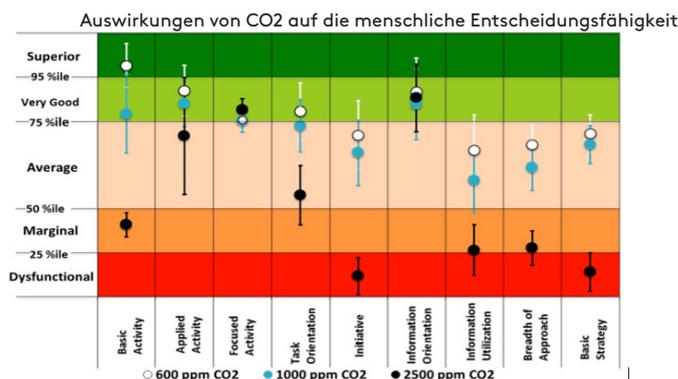
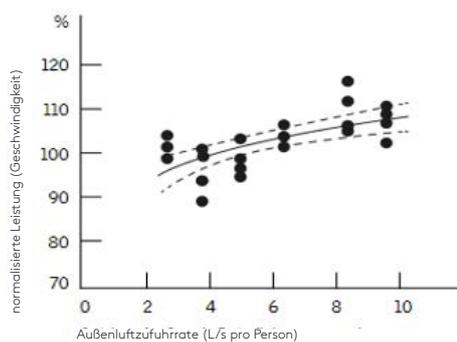


Abbildung 14: Auswirkungen von CO<sub>2</sub> auf die menschliche Entscheidungsfähigkeit - für Erwachsene (Satish et al., 2012).

- Eine Verdoppelung der Außenluftzufuhr (von 3 auf 9,6 l/s/p) würde die Leistung bei Schularbeiten in Bezug auf die Geschwindigkeit insgesamt um etwa 8 % und bei den Aufgaben, die erheblich betroffen waren, um 14 % verbessern, wobei die Auswirkungen auf Fehler nur vernachlässigbar sind, siehe Abbildung 15 (Wargocki et al., 2016).
- In den USA wurden der CO<sub>2</sub>-Gehalt in 100 Klassenzimmern von Fünftklässlern gemessen. Es stellte sich heraus, dass eine schlechte Belüftung die Anzahl der Schülerinnen und Schüler erhöhte, die Sprach- und Mathematiktests nicht bestehen konnten.
- Eine weitere Studie in Klassenräumen der fünften Klasse an 70 Schulen in den USA zeigte, dass sich die Ergebnisse in Mathematik um etwa 0,5 % verbesserten, wenn die Belüftungsrate um 1 l/s pro Person im Bereich von 0,9 bis 7 l/s pro Person erhöht wurde (Haverinen-Shaughnessy et al., 2015).

**Geschwindigkeit**



**Genauigkeit**

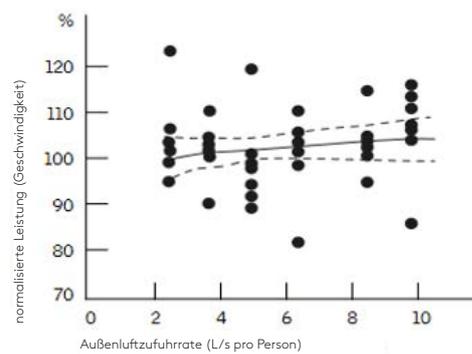


Abbildung 15 (a,b): Schülerleistung im Vergleich zur Beatmungsrate, basierend auf einer Studie in Dänemark. Die Leistung basierte auf der Geschwindigkeit (a) und Genauigkeit (b) bei der Erledigung verschiedener Schulaufgaben (Fisk, 2017).



## Tageslicht, Beleuchtung und Ausblicke nach draußen

- Viele Studien über die gesundheitlichen Auswirkungen des Tageslichts haben gezeigt, dass Tageslicht sich positiv auf die Sehkraft und Schlafqualität auswirkt sowie für die Verringerung von Symptomen wie Überanstrengung der Augen, Kopfschmerzen und Depressionen sorgt.
- Die von der Universität Salford in Großbritannien durchgeführte Studie "Clever Classrooms" kam zu dem Schluss, dass gutes Tageslicht zu einem Gefühl des körperlichen und geistigen Wohlbefindens beiträgt: seine Vorteile sind weitreichender als nur eine Sehhilfe (Barrett et al., 2015).

---

**In einer Studie mit 172 US-amerikanischen Drittklässlern wurde die Auswirkung einer blendfreien "Fokus"-Beleuchtung mit hoher Lichtintensität (1.000 Lux und 6.500 K) auf die mündliche Leseleistung der Schüler über ein ganzes Schuljahr hinweg untersucht.**

**In der Mitte des Semesters zeigten die Schüler in der "Fokus"-Beleuchtung einen höheren prozentualen Anstieg der mündlichen Leseleistung im Vergleich zu den Schülern in Klassenzimmern mit "Standard"-Beleuchtung (500 Lux und 3.500 K) (36 % gegenüber 17 %) (Mott et al., 2014).**

---

- Der Zugang zu qualitativ hochwertiger und aufgabengerechter Beleuchtung in der Schule ist wichtig, da viele Aktivitäten im Klassenzimmer - wie Lesen und Schreiben - visuell orientiert sind und das Lernen der Schüler prägen. Die mündliche Lesefertigkeit (gemessen als korrekt gelesene Wörter pro Minute) ist ein wichtiger Vorläufer für die Entwicklung des Leseverständnisses.
- Kinder reagieren empfindlicher auf Lichteinwirkung als Erwachsene, da ihre Pupillen größer sind und die lichtbedingte Melatoninunterdrückung deutlich stärker ausgeprägt ist, wobei junge Heranwachsende empfindlicher auf das zirkadiane System reagieren als ältere Jugendliche (O'Hagan et al., 2016).
- Geringes Licht in Innenräumen in Verbindung mit weniger Zeit im Freien wurde mit einem erhöhten Risiko für Kurzsichtigkeit (Myopie) in Verbindung gebracht. Studien zeigen auch, dass eine Erhöhung der Zeit, die Kinder im Freien verbringen, das Risiko der Entwicklung von Myopie verringern oder ihr Fortschreiten verlangsamen kann (Kocak et al., 2015).
- Eine Studie der Universität Sorbonne, an der 2 387 Kinder aus 13 europäischen Ländern teilnahmen, kam zu dem Schluss, dass die schulischen Leistungen um bis zu 15 % steigen können, wenn die Schüler in Klassenzimmern mit größeren Fenstern arbeiten - sowohl aufgrund des vermehrten Tageslichts als auch der besseren Sicht nach draußen (Maesano, 2016).
- Bei Kindern wurde eine höhere durchschnittliche tägliche Tageslichtexposition mit einer geringeren sitzenden Tätigkeit unter der Woche und am Wochenende sowie einer höheren körperlichen Aktivität an den Wochenenden in Verbindung gebracht (Aggio et al., 2015).

## Kontrolle von Schall und Lärm

- In der Schule hängt der Erwerb von Wissen, Fähigkeiten und sozialen Normen sehr stark von der mündlichen Kommunikation ab. Die Schüler müssen in der Lage sein, die Stimme des Lehrers zu hören und zu verstehen. Da es wichtig ist, dass die Schüler lernen, mit ihrem eigenen Lärm umzugehen, um die Gruppe nicht zu stören, ermöglicht die Kontrolle der Geräusche und des Lärms in der Schule eine akustische Umgebung von geeigneter Qualität für die körperliche und geistige Entwicklung der Kinder. Lehranstalten sind also Gebäude, deren akustisches Umfeld untrennbar mit ihrer funktionalen Qualität verbunden ist.
- Chronische Lärmbelastungen durch interne und externe Lärmquellen können zu einer Verschlechterung der Testergebnisse führen. Die Lärmbelastung wird häufig durch den Standort bestimmt, z. B. durch die Nähe zu Hauptverkehrsstraßen oder Flughäfen, aber interne Lärmquellen können ebenso wichtig sein (siehe Abbildung 16).
- Eine optimale akustische Umgebung ist die Voraussetzung dafür, dass man auch bei längerer Aufmerksamkeit gut verstehen kann. Das Lernen ist einfacher und weniger ermüdend, und der Lehrer ist effektiver und weniger gestresst (Deoux, 2010). Zwei wichtige Aspekte für gutes Hören in einem Klassenzimmer sind geringe Hintergrundgeräusche (unerwünschte Geräusche) und eine kurze Nachhallzeit (die Zeit, die der Schall im Raum verweilt), (Acoustical Society of America, 2010).
- Die Acoustical Society of America empfiehlt einen maximalen Hintergrundlärmpegel von 35 dB(A) für unbesetzte Lernräume in festen Schulgebäuden und eine maximale Nachhallzeit von 0,6-0,7 Sekunden, je nach Lautstärke des Klassenzimmers (Acoustical Society of America, 2010).
- Kinder unter 15 Jahren reagieren empfindlicher auf schwierige Hörbedingungen, da sie noch reife Sprachkenntnisse entwickeln. Im Vergleich zu Erwachsenen haben Kinder mehr Schwierigkeiten mit komplexen Höraufgaben (Sullivan et al., 2015).

---

### **Es gibt immer mehr Belege dafür, dass die Lärm- und Nachhallbedingungen in Klassenzimmern variieren und häufig nicht den empfohlenen Standards entsprechen (Lewis et al., 2014).**

---

- Lärmbelästigung im Klassenzimmer kann das Sprach- und Hörverständnis von Kindern ebenso beeinträchtigen wie ihre Konzentration, ihr Verständnis von verbalen Informationen, ihr Leseverständnis und ihr Gedächtnis (Stansfeld et al., 2015).
- Lärm hat sowohl auditive Auswirkungen, wie z. B. Hörverlust, als auch nicht-auditive Auswirkungen, wie z. B. Belästigung, Schlafstörungen, Stress, Bluthochdruck und Auswirkungen auf die Leistung. Internationale Studien über die Auswirkungen von Lärm zeigen verschiedene gesundheitliche Folgen bei Schülern, darunter erhöhte Müdigkeit, Stress und Reizbarkeit (Seabi et al., 2015).
- Es wurde auch festgestellt, dass sich Lärm negativ auf das Lesen und Schreiben auswirkt; Untersuchungen legen nahe, dass chronische Lärmbelastung die kognitive Entwicklung von Kindern beeinträchtigt (Klatte et al., 2013).
- So wurden beispielsweise HLK-Anlagen als häufige Quelle von Hintergrundlärm in Klassenzimmern identifiziert. In einer Studie an 73 Grundschulen in Florida wurde festgestellt, dass Schüler in Schulen, die mit den lautesten Arten von HLK-Systemen gekühlt werden, bei Leistungstests schlechter abschneiden als Schüler in Schulen mit leiseren Systemen (Jaramillo, 2013).
- Darüber hinaus wurde die Belästigung durch Umgebungslärm bei städtischen Gymnasiasten auch mit schlechteren Leistungen bei Mathematiktests in Verbindung gebracht (Zhang et al., 2015).

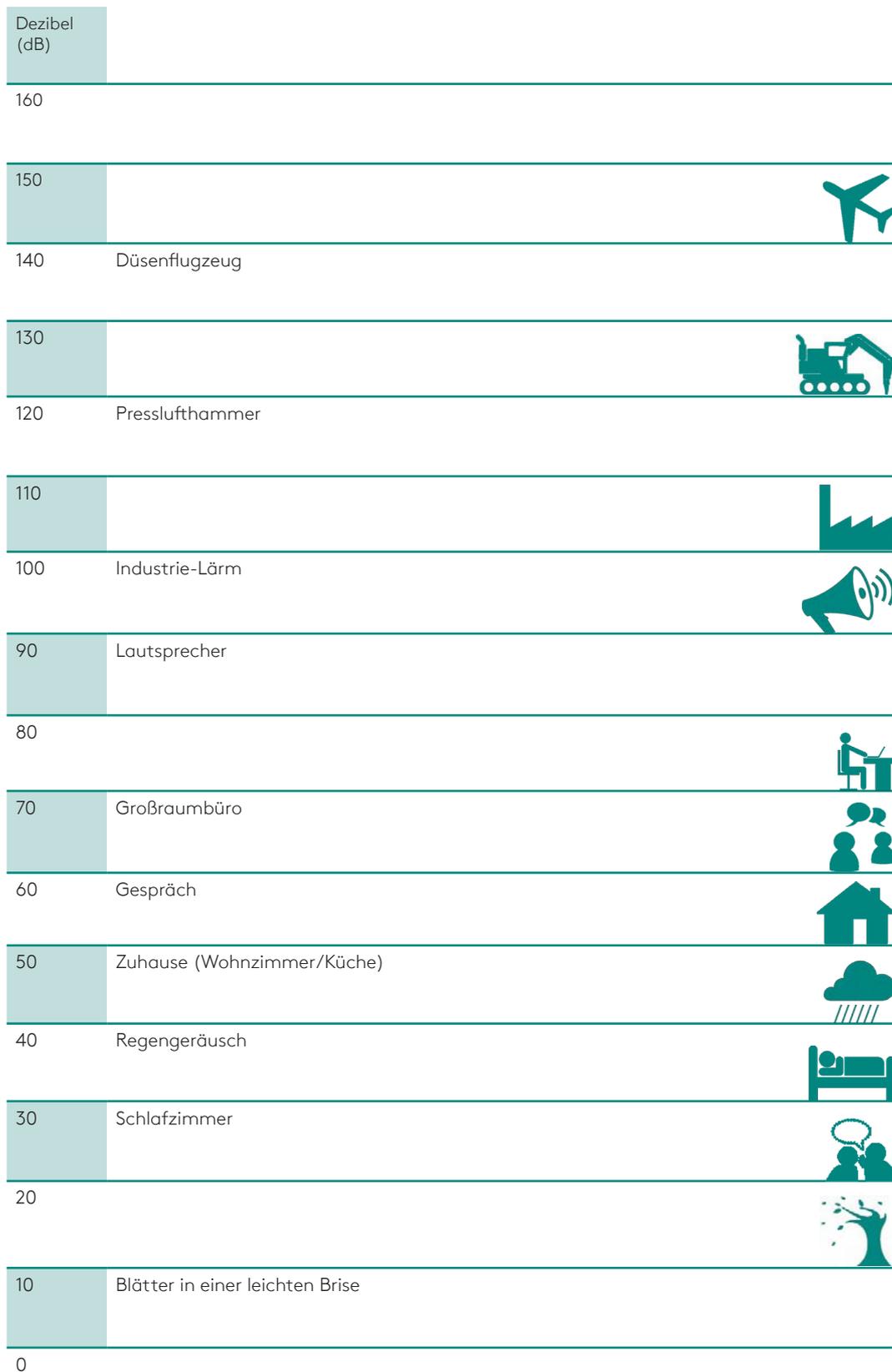


Abbildung 16: Typische Schallpegel (Building better schools, Velux).

# Jenseits der vier Wände - der Kontext zählt

Neben den vier Wänden des Schulgebäudes können viele umweltbedingte und soziale Faktoren das Wohlbefinden der Schüler beeinträchtigen und ihr akademisches Potenzial beeinflussen. Es gibt auch viele andere Faktoren, die sich auf die Gesundheit und Abwesenheit der Schüler auswirken, z. B. die Nähe zu starkem und lautem Verkehr sowie zu Industrie- und Chemieanlagen (siehe Abbildung 17).

## Umweltverschmutzung im Freien und nahe gelegene Quellen

- CO<sub>2</sub> kann auch von außerhalb der Schule stammen und wird in großem Umfang durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe oder den Straßenverkehr und andere anthropogene Aktivitäten, die für die Emission von Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) verantwortlich sind, erzeugt.
- Die Untersuchungen ergaben, dass sich die Indikatoren für die kognitive Entwicklung (z. B. Aufmerksamkeit und Merkfähigkeit) in den Schulen mit den niedrigsten Werten für verkehrsbedingte ultrafeine Partikel, Kohlenstoffpartikel und NO<sub>2</sub> besser entwickelten (bis zu + 13 %).
- Stickstoffdioxidemissionen NO<sub>2</sub>, die in großem Umfang durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe oder den Straßenverkehr und andere anthropogene Aktivitäten entstehen, können bei Schulkindern Atemprobleme verursachen (d. h. Asthmaverschlechterungen, erhöhte Anfälligkeit für Virusinfektionen usw.).
- Die natürliche Emission des Gases Radon stammt aus unterirdischen Hohlräumen, das sich typischerweise in schlecht belüfteten Klassenräumen ansammelt und bei chronischer Exposition die Lungenfunktion beeinträchtigen kann.
- Darüber hinaus wurde die Exposition gegenüber verschiedenen verkehrsbedingten Feinpartikeln (z. B. Kraftfahrzeugabgase und Straßenstaub) mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Keuchen, Kurzatmigkeit, Inhalation und Asthmasymptomen bei Kindern mit Asthma in Verbindung gebracht (Gent et al., 2009).
- Schulen in der Nähe von Flughäfen stellen aufgrund der Auswirkungen von Fluglärm eine besondere Untergruppe von Schulen dar. Fluglärm ist eine häufige Quelle von Lärmbelästigung; er kann die Lebensqualität des Einzelnen beeinträchtigen und verursacht Irritationen, Unbehagen, Ärger oder Frustration, Kopf- und Magenschmerzen (Seabi, 2013).
- In Schulen, die starkem Fluglärm ausgesetzt sind, gaben 86 % der Lehrer an, die Fenster auch bei wärmerem Wetter geschlossen zu halten, und 38 % gaben an, weniger Aktivitäten im Freien mit ihren Schülern zu unternehmen (Bergstrom et al., 2015).

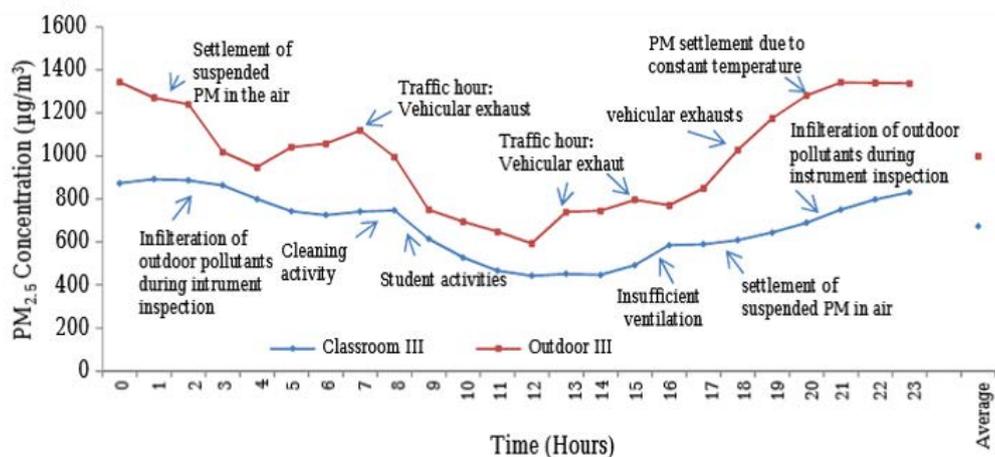


Abbildung 17: PM<sub>2,5</sub>-Durchschnittskonzentrationen für 24 Stunden im Klassenzimmer mit Belegung (7:00-17:00). Beachten Sie, dass die Luftwechselrate 0,43 h<sup>-1</sup> bei geschlossenen Türen und 1,1 h<sup>-1</sup> bei geöffneten Türen betrug (Aziz et al., 2015).

## Fernbleiben von der Schule

- Bei Grundschülerinnen und -schülern ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass sie aus gesundheitlichen Gründen oder aufgrund von Umständen, die sich ihrer Kontrolle entziehen (z. B. Asthma, Verkehrsmittel oder instabile Wohnverhältnisse), abwesend sind.
- Höhere Luftverschmutzungswerte in der Umgebung von Schulen wurden mit höheren Raten chronischer Fehlzeiten in Verbindung gebracht (MacNaughton et al., 2017).
- Fast eines von 13 Kindern im schulpflichtigen Alter leidet an Asthma, der Hauptursache für Schulabsentismus aufgrund einer chronischen Erkrankung. Asthma ist jedes Jahr für 13,8 Millionen versäumte Schultage verantwortlich (Centres for Disease Control and Prevention, 2013).
- Es gibt zahlreiche Belege dafür, dass die Exposition gegenüber Allergenen in Innenräumen, wie Hausstaubmilben, Ungeziefer und Schimmelpilze, eine Rolle bei der Auslösung von Asthmasymptomen spielt. Diese Allergene sind in Schulen weit verbreitet (Centres for Disease Control and Prevention, 2015).
- Die aussagekräftigste Studie, bei der 162 Klassenzimmer zwei Jahre lang beobachtet wurden, ergab einen Rückgang der Fehlzeiten um 1,6 % pro 1 l/s (2 cfm) pro Person, wenn die Lüftungsrate erhöht wurde (Mendell et al., 2013).
- In einer anderen Studie wurde festgestellt, dass die Fehlzeiten um 0,4 Tage pro Jahr abnehmen, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration um 100 ppm abnimmt (Gaihre et al., 2014).
- Eine Studie in 434 amerikanischen Klassenzimmern ergab, dass die Abwesenheit von Schülern um 10-20 % abnahm, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration um 1.000 ppm sank (Shendell et al., 2004).

## Umweltpsychologie und andere Faktoren

- Forscher im Bereich der Umweltpsychologie (biophiles Design) interessieren sich zunehmend für die erholsamen Auswirkungen des visuellen Zugangs zu einer natürlichen Umgebung (Li et al., 2016).
- Es wurde beobachtet, dass sich Lernende in Klassenzimmern, die durch ihre Fenster Zugang zu Grünflächen haben, deutlich schneller von Stress und geistiger Ermüdung erholen und bei Aufmerksamkeitstests deutlich besser abschneiden als Schüler in Klassenzimmern ohne Fenster oder mit Fenstern, die auf andere Gebäudefassaden blicken (Li et al., 2016).
- Der soziale Faktor - der Verbleib der Kinder in der Schule - ist für ihre Bildung von entscheidender Bedeutung, und das Bildungsniveau hat einen stärkeren Einfluss auf die langfristige Gesundheit als der sozioökonomische Status der Kinder. Es hat sich gezeigt, dass ein höheres Bildungsniveau die mit einem ungleichen sozioökonomischen Status verbundenen Unterschiede bei Gesundheit und Lebenserwartung verringert. (Montez et al., 2014).



# Schluss

## Gesundheit in der Schule

Die jahrzehntelange wissenschaftliche Forschung hat zu zahlreichen Erkenntnissen darüber geführt, wie sich das Raumklima auf das Wohlbefinden und die Gesundheit von Schülern auswirkt. Diese Erkenntnisse liefern der öffentlichen Gesundheit handfeste Beweise dafür, dass Umwelteinflüsse in Schulgebäuden das Denken und die Leistung von Schülern beeinflussen können. Studien zeigen auch, dass Umweltfaktoren in und um das Schulgebäude auf komplexe Weise zusammenwirken können. Das Schulgebäude selbst, in dem die Schüler einen großen Teil ihrer Kindheit verbringen, bietet daher eine hervorragende Gelegenheit, einzugreifen und die Gesundheit der Kinder - der am meisten gefährdeten Bürger - zu schützen..

---

**Die Zeit, die Kinder in der Schule verbringen, ist für ihr physiologisches, soziales und emotionales Wachstum und ihre Entwicklung von entscheidender Bedeutung, da Kinder bei schlechten Bedingungen in Innenräumen anfälliger sind als Erwachsene. (Schools for Health).**

---

## Auswirkungen des Raumklimas auf das Lernen

Die Umweltqualität in Innenräumen (IEQ) ist ein Schlüsselement für die Eignung des Gebäudes zum Lernen und Arbeiten. Die in den letzten Jahrzehnten gesammelten Erkenntnisse haben gezeigt, dass eine große Vielfalt an IEQ-Einflüssen auf Bildungsprozesse und -ergebnisse besteht. Ein gutes IEQ in Bildungsgebäuden erhöht die akademischen Leistungen der Schüler, d. h. ihre Produktivität, Effizienz und Lernfähigkeit. Sie wirkt sich auch auf die Effizienz, die Konzentration, das Selbstvertrauen, die Lernergebnisse und die Fehlzeiten der Schüler aus. Darüber hinaus kann der IEQ unter anderem auch die Qualität und Wirksamkeit des Unterrichts beeinflussen. Insgesamt können die Auswirkungen von IEQ in Schulen enorme Vorteile bieten - im Hinblick auf bessere akademische Leistungen, die Gesundheit der Schülerinnen und Schüler und die Zukunftsaussichten einer wachsenden Bevölkerung.

## Das neue Paradigma für die Belüftung in Schulen

Die Belüftung ist und bleibt eine Möglichkeit, das Recht auf gesunde Innenraumluft in Schulen zu gewährleisten. Die Kriterien für Schulen sollten die unterschiedlichen Auswirkungen auf die Gebäudenutzer berücksichtigen und sicherstellen, dass die Gebäudesysteme so ausgelegt sind, dass sie deren Bedürfnisse erfüllen und effektiv genutzt werden. Der notwendige Paradigmenwechsel sollte sich auf neue Konstruktionsanforderungen, neue Belüftungslösungen und neue Wege für die Planung, den Betrieb und die Wartung energie- und kosteneffizienter Methoden beziehen. Auch die Kosten der negativen Folgen einer schlechten Belüftung für Gesundheit, Leistung und sozioökonomisches Wohlergehen müssen im Mittelpunkt stehen. Das neue Paradigma für die Belüftung von Schulgebäuden sollte jeden einzelnen Gebäudenutzer (Schüler, Personal und andere) in den Mittelpunkt aller Empfehlungen und Maßnahmen stellen.

## Dynamische Beziehungen

In der Vergangenheit waren die Welt und das Verständnis von Bildung ganz anders als heute. Die Schulgebäude wurden von der Sonne beleuchtet und mit massiven Öl- und Kohleöfen beheizt. Die Kinder sollten gesehen und nicht gehört werden. Die Schulen waren auf eine geringere Schülerzahl und den Unterricht in einzelnen Fächern ausgelegt und legten weniger Wert auf Anpassungsfähigkeit. Die gestiegene Schülerzahl mit einer größeren Vielfalt an Unterrichtsfächern bedeutet, dass man sich um die Mehrzweckfähigkeit und Flexibilität aller Räume bemühen muss.

Die Gebäudesysteme müssen sich an künftige bauliche Veränderungen anpassen können - die Schulen müssen sich im Laufe der Zeit bewähren und sich in künftige bauliche Veränderungen integrieren lassen, wobei die Lebenszykluskosten und nicht nur die Kapitalkosten zu berücksichtigen sind. Alle Systeme werden sich an der Nachfrage und der Belegung orientieren, d. h. sie müssen mit variabler Belegung zurechtkommen, sich schnell an verschiedene Parameter anpassen und räumliche Anforderungen erfüllen. Und der Betrieb aller Schulgebäude und Gebäudesysteme wird auf Überwachung, Handhabbarkeit und Vorhersagbarkeit basieren.

---

**Gesunde Gebäude, gesunde Menschen und gesunde Kinder (Schulen für Gesundheit).**

---

## Nachhaltigkeit und Klimabildung

Bildung ist auch ein wesentliches Element für die Nachhaltigkeit unseres Planeten und die globale Reaktion auf den Klimawandel. Sie hilft jungen Menschen, die Auswirkungen der globalen Erwärmung zu verstehen und sich mit ihnen auseinanderzusetzen, fördert Veränderungen in ihren Einstellungen und ihrem Verhalten und hilft ihnen, sich an die Trends des Klimawandels anzupassen. Es muss wirksame Möglichkeiten für die Schulen geben, das Thema Klimawandel zu unterrichten, damit die Kinder besser auf künftige ökologische Herausforderungen vorbereitet werden können. Es geht um das Wissen, die Einstellung und das Verhalten eines jeden und für jeden.

---

**Bildung verändert das Leben (UNESCO).**

---

## Die Zukunft von Bildung und Schule

Bildung gewinnt weltweit immer mehr an Bedeutung. Das globale Bild zeigt Schätzungen und Projektionen der gesamten Weltbevölkerung nach Bildungsniveau. Es zeigt, dass immer mehr gebildete Menschen unsere Welt bevölkern werden. Während es in den 1970er Jahren weltweit nur etwa 700 Millionen Menschen mit Sekundar- oder Hochschulbildung gab, wird diese Zahl bis zum Jahr 2100 voraussichtlich zehnmal so hoch sein. Infolge des Bevölkerungswachstums und der wachsenden urbanen und globalisierten Welt wird die Bildung florieren, und es werden weltweit mehr Ressourcen für die Bildung benötigt. Daher muss auch verstärkt darauf geachtet werden, dass das Innenraumklima in den Schulen der Gesundheit der Kinder und ihrer Lernfähigkeit angemessen ist. Die Zukunft braucht gesunde und intelligente Schulgebäude mit einem guten Innenraumklima für gesunde Luft in Schulen.

# Referenzen

**Acoustical Society of America (2010).**

ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools.

**Aggio D., Smith L., Fisher A., Hamer M.**

**(2015).** Association of Light Exposure on Physical Activity and Sedentary Time in Young People. *International journal of environmental research and public health* 12.

**Angelopoulos C., Cook M., Iddon C.R.,**

**Porritt S. (2017).** Evaluation of thermal comfort in naturally ventilated school classrooms using CFD. Loughborough University.

**Annesi-Maesano I., Baiz N., Banerjee S., Rudnai P., Rive S., SINPHONIE Group.**

**(2013).** Indoor air quality and sources in schools and related health effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health (Part B)* 16.

**Artola I., Rademaekers K., Williams**

**R., Yearwood J. (2016).** Boosting building renovation: What potential and value for Europe? Study by European Parliament.

**ASHRAE 55:2020.** Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Standard.

**ASHRAE 62.1:2019.** Ventilation for acceptable indoor air quality. ASHRAE Standard.

**Aziz K., Ali Z., Nasir Z.A., Colbeck I. (2015).**

Assessment of airborne particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in university classrooms of varying occupancy. *Journal of Animal and Plant Sciences* 25.

**Barrett P.S., Zhang Y., Davies F., Barrett**

**L.C. (2015).** *Clever Classrooms: Summary report of the HEAD project.* University of Salford, Manchester.

**B.B. 101:2018.** Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools. Education and Skills Funding Agency. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/publications/building-bulletin-101-ventilation-for-school-buildings>

**Bidassey-Manilal S., Wright C.Y., Engelbrecht J.C., Albers P.N., Garland R.M., Matooane M. (2016).** Students'

Perceived Heat-Health Symptoms Increased with Warmer Classroom Temperatures. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13.

**BPIE. (2011).** Europe's building under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings. Report by Buildings Performance Institute Europe.

**Breesch H., Merema B., Versele A. (2019).**

Ventilative cooling in a school building: evaluation of the measured performances. *REHVA Journal* 2.

**Brink H.W., Loomans M.G.L.C, Mobach**

**M.P., Kort H.S.M. (2020).** Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review. *Indoor Air* 31.

**Building better schools.** Velux. Accessed 1/2021. Retrieved from [https://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product\\_file/file/55118/Building\\_Better\\_Schools.pdf](https://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/55118/Building_Better_Schools.pdf)

**Carreiro-Martins P., Viegas J., Papoila A.L.,**

**Aelenei D., Caires I., Araújo-Martins J., Rosado-Pinto J. (2014).** CO<sub>2</sub> concentration in daycare centres is related to wheezing in attending children. *European journal of paediatrics* 173.

**Centres for Disease Control and**

**Prevention. (2013).** National Centre for Health Statistics. National Health Interview Survey, 2013. Analysis by the American Lung Association Epidemiology and Statistics Unit using SPSS software.

**Centres for Disease Control and**

**Prevention. (2015).** Asthma Stats: Asthma-related missed school days among children age 5-17 years. Retrieved from <https://www.cdc.gov>

Chatzidiakou L., Mumovic D., Summerfield A.J. (2012). What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International* 4.

**Chatzidiakou L., Mumovic D., Summerfield**

**A.J., Hong S.M., Altamirano-Medina H. (2014).** A Victorian school and a low carbon designed school: comparison of indoor air quality, energy performance, and student health. *Indoor and Built Environment* 23.

**Chatzidiakou L., Mumovic D., Summerfield A. (2015).** Is CO<sub>2</sub> a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO<sub>2</sub> levels, ventilation rates and selected indoor pollutants. *Building Services Engineering Research and Technology*.

**Deoux S. (2010).** Bâtir pour la santé des enfants, Medieco Editions.

**Dorizas P. V., Assimakopoulos M. N., Santamouris M. (2015).** A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools. *Environmental Monitoring and Assessment* 187.

**Duarte R., Gomes M.G. (2017).** Classroom ventilation with manual opening of windows: Findings from a two-year-long experimental study of a Portuguese secondary school. *Building Environment* 124.

**EIA. (2018).** Commercial building energy consumption survey. U.S. Energy Information Administration's. Retrieved from <https://www.eia.gov/consumption/commercial/>

**EN 16798:1-2019.** Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN European Standard.

**Engineering Toolbox. (2003).** Recommended minimum area per person - common values for calculating indoor climate loads. Retrieved from [https://www.engineeringtoolbox.com/number-persons-buildings-d\\_118.html](https://www.engineeringtoolbox.com/number-persons-buildings-d_118.html)

**Environmental Protection Agency (EPA, 2016).** Volatile organic compounds' impact on indoor air quality. Health effects. Retrieved from [https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality#Health\\_Effects](https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality#Health_Effects)

**Eurostat. Students and teachers in E.U. (2020).** Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200604-1>

**Fisk W.J. (2017).** The Ventilation Problem in Schools: Literature Review. Berkley Lab.

**Gaihre S., Semple S., Miller J., Fielding S. and Turner S. (2014).** Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. *Journal of School Health* 84.

**Hanover Research. (2011).** School structures that support 21st century learning. Retrieved from [https://www.apsva.us/wp-content/uploads/legacy\\_assets/www/bda59d16b8-School\\_Structures.pdf](https://www.apsva.us/wp-content/uploads/legacy_assets/www/bda59d16b8-School_Structures.pdf)

**Haverinen-Shaughnessy U., Moschandreas D.J., Shaughnessy R.J. (2011).** Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air* 21.

**Haverinen-Shaughnessy U., Shaughnessy R.. (2015).** Effects of classroom ventilation rate and temperature on students' test scores. *PLoS ONE* 10.

**Jaramillo A.M. (2013).** The link between HVAC type and student achievement. Doctoral dissertation. Virginia Polytechnic University.

**Johansson D. (2010).** Närvaro i byggnader mätningar och uppskattningar. Swegon.

**Lewis D.E., Manninen C.M., Valente D.L., Smith N.A. (2014).** Children's understanding of instructions presented in noise and reverberation. *American Journal of Audiology* 23.

**Klatte M., Bergstrom K., Lachmann T. (2013).** Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children. *Frontiers in Psychology* 4.

**Kocak E.D., Sherwin, J.C. (2015).** Time spent outdoors and myopia: establishing an evidence base. *Eye Science* 30.

**Li D., Sullivan C.W. (2016).** Impact of views to school landscapes on recovery from stress and mental fatigue. *Landscape Urban Planning* 148.

**Luongo J.C., Fennelly K.P., Keen J.A., Zhai Z.J., Jones B.W., Miller S.L. (2015).** Role of mechanical ventilation in the airborne transmission of infectious agents in buildings. *Indoor Air*.

# Referenzen

- MacNaughton P., Eitland E., Kloog I., Schwartz J. and Allen J. (2017).** Impact of Particulate Matter Exposure and Surrounding "Greenness" on Chronic Absenteeism in Massachusetts Public Schools. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14.
- Maesano C., Annesi-Maesano I. (2016).** Impact of Lighting on School Performance in European Classrooms. 12th REHVA World Congress CLIMA.
- Mendell M.J., Eliseeva E.A., Davies M.M., Spears M., Lobscheid A., Fisk W.J. and Apte M.G. (2013).** Association of classroom ventilation with reduced illness absence: A prospective study in California elementary schools. *Indoor Air* 23.
- Montez J.K., Hayward M.D. (2014).** Cumulative childhood adversity education, and active life expectancy among U.S. Adults. Springer.
- Mott M.S., Robinson D.H., Williams-Black T., McClelland S.S. (2014).** The supporting effects of high luminous conditions on grade 3 oral reading fluency scores. *Springer Plus* 3.
- NCEE. (2018).** How much time do students spend in schools? Retrieved from <http://ncee.org/wp-content/uploads/2018/02/SchoolYearStatv5.pdf>
- O'Hagan J.B., Khazova M., Price L.L A. (2016).** Low-energy light bulbs, computers, tablets and the blue light hazard. *Eye*.
- OECD. (2018).** Average class size. Retrieved from [https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EDU\\_CLASS](https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EDU_CLASS)
- Online Etymology Dictionary. (2021).** Accessed 01/2021. Retrieved from <https://www.etymonline.com/word/school>
- Passipedia. (2020).** Passive house schools – Requirements. Retrieved from [https://passipedia.org/planning/non-residential\\_passive\\_house\\_buildings/passive\\_house\\_schools/passive\\_house\\_schools\\_requirements](https://passipedia.org/planning/non-residential_passive_house_buildings/passive_house_schools/passive_house_schools_requirements)
- Rigolon A. (2010).** European design types for 21st century schools: An overview. Centre for Effective Learning Environments.
- Roser M., Ortiz-Ospina E. (2016).** Global education. Retrieved from <https://ourworldindata.org/global-education>
- Satish U., Mendell M.J., Shekhar K., Hotchi T., Sullivan D., Streufert S., Fisk W.B.. (2012).** Is CO2 an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO2 Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives* 120.
- Seabi J., Cockcroft K., Goldschagg P., Greyling M. (2015).** A prospective follow-up study of the effects of chronic aircraft noise exposure on learners' reading comprehension in South Africa. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 25.
- Shendell D., Prill R., Fisk J.W., Apte M., Blake D., Faulkner D. (2004).** Associations between classroom CO2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air* 145.
- Stansfeld S., Clark C. (2015).** Health effects of noise exposure in children. *Current Environmental Health Reports* 2.
- Sullivan J.R., Osman H., Schafer E.C. (2015).** The Effect of Noise on the Relationship Between Auditory Working Memory and Comprehension in School-Age Children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 58.
- Uzelac A., Gligoric N., Krco S. (2015).** A comprehensive study of parameters in physical environment that impact students' focus during lecture using Internet of Things. *Computers in Human Behavior* 53.
- Toyinbo O., Matilainen M., Turunen M., Putus T., Shaughnessy R., Haverinen-Shaughnessy U. (2016).** Modelling Associations between Principals' Reported Indoor Environmental Quality and Students' Self-Reported Respiratory Health Outcomes Using GLMM and ZIP Models. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13.
- Trachte S., De Herde A. (2015).** Sustainable refurbishment of school buildings. International Energy Agency.
- Turunen M., Toyinbo O., Putus T., Nevalainen A., Shaughnessy R., Haverinen-Shaughnessy U. (2014).** Indoor environmental quality in school buildings, and the health and well-being of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 217.

**Wargocki P., Wyon D.P. (2013).** Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment* 59.

**Wargocki P., Wyon D.P. (2016).** Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment* 112.

**Wargocki P. (2021).** What we know and should know about ventilation. *REHVA Journal* 2.

**Worldometer. (2021).** World demographics. Accessed 01/2021. Retrieved from <https://www.worldometers.info/demographics/world-demographics/>

**Younes Ch., Shdid C.A., Bitsuamlak G. (2011).** Air infiltration through building envelope: A review. *Journal of Building Physics* 35.

**Zhang F., Dear R. (2016).** University students' cognitive performance under temperature cycles induced by direct load control events. *Indoor Air*.

Feel good **inside**

