

Leitfaden Klassenzimmer SMART sanieren

Eine Orientierungshilfe für die modulare, integrale
Sanierung für bessere Innenraumqualität an Schulen

Schriftenreihe der Heinz Trox-Stiftung | Band 1



Impressum

Herausgeber

Heinz Trox-Stiftung
Heinrich-Trox-Platz
47504 Neukirchen-Vluyn
Telefon: (+49) 2845 202-642
E-Mail: info@heinz-trox-stiftung.de
Internet: <https://www.heinz-trox-stiftung.de>

Ausgabe

1. Auflage (Februar 2025)

Layout

TR advertising
Grafikdesign Katharina Rewitz

Satz

Tim Bögel, Tobias Burgholz
(Heinz Trox Wissenschafts gGmbH)
telegrafik berlin

Lektorat

Nadine Lux, Gabriele Schönherr
(science³ Wissenschaftskommunikation GbR)

Druck

MD-Digital GmbH
Circle Offset Premium White
– 100 % Altpapier, FSC

Bildnachweise

FOTO HAUS Fotografie
(S. 5/54/68/78/85/89/89/90/93/94/95/103)
iStock/gamespirit (S. 4/5/21/64)
iStock/monkeybusinessimages (S. 1/4)
iStock/Sakorn Sukkasemsakorn (S. 109)
iStock/PeopleImages (S. 5/104)
iStock/urbancow (S. 4/34)

Autoren (alphabetisch)

Tobias Burgholz
Dennis Derwein
Apl. Prof. Dr. Jérôme Frisch
Martin Kremer
Dr. Clara-Larissa Lorenz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller
Philipp Ostmann
Dr.-Ing. Kai Rewitz
Univ.-Prof. Dr. Marcel Schweiker
Dr. phil. Marc Syndicus
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck

DOI

[10.61058/HTS.2025.0211](https://doi.org/10.61058/HTS.2025.0211)

Vorwort

Die rund 33.000 allgemeinbildenden und beruflichen Schulen in Deutschland wollen ein lern- und lehrfreundliches Umfeld bieten. Doch jede zweite Schule ist stark sanierungsbedürftig. Bundesweit belief sich der der Investitionsstau im Jahr 2021 auf rund 45,6 Milliarden Euro. Besonders Klassenräume müssen verbessert werden.

Steigende Anforderungen an die Luftqualität, Wärmeschutz, bessere Akustik und energieeffiziente Beleuchtung erfordern zeitgemäße Sanierungslösungen. Diese sind für die meisten Schulen jedoch nur bei überschaubarem Aufwand und Kosten realisierbar.

Dieser Leitfaden stellt praktische Ansätze und Beispiele für Sanierungen vor, die gleichzeitig die Luftqualität, das Raumklima, die Akustik und die Beleuchtung verbessern. Die Lösungen sind nach dem Baukastenprinzip skalierbar und können in fast jedem Klassenraum umgesetzt werden.

Basierend auf wissenschaftlichen Studien und Praxisprojekten bietet der Leitfaden Tipps und Hintergrundwissen zu den Themen lehr- und lernförderliche Innenraumbedingungen und Klassenraumsanierung für Schulen, Lehrkräfte, Planende aus Bau und Architektur sowie Schulträger.

Inhalt

Teil 1 – Einflussfaktoren auf die Lernumgebung	6
1.1 Luftqualität	9
1.2 Raumklima	17
1.3 Akustik	22
1.4 Beleuchtung	27
Teil 2 – Allgemeine Lösungsansätze	34
2.1 Luftqualität und Raumklima	36
2.2 Akustik	54
2.3 Beleuchtung	58
Teil 3 – SMART sanieren: Modularer Sanierungsansatz für Klassenräume	64
3.1 Wie und warum SMART sanieren?	66
3.2 Eine gute Kombination: Deckenlüftungsgerät & Systemdecke	69
Teil 4 – Exemplarische Sanierungsmaßnahmen	80
4.1 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen	82
4.2 Vorher-Nachher-Vergleich am Beispiel eines Grundschulklassenraums	94
4.3 Was kostet eine SMARTe Sanierung?	100
Exkurs – Empfehlungen für Neubauvorhaben . . .	104
Quellenverzeichnis	110
Abbildungsverzeichnis	120
Tabellenverzeichnis	126

Inhaltliche Gliederung

TEIL 1



Einflussfaktoren auf die Lernumgebung

Luft, Licht, Akustik und das Raumklima bestimmen, ob wir uns in einem Raum wohlfühlen. Es werden verschiedene wahrnehmungsorientierte Faktoren beleuchtet, die das Arbeitsklima in Klassenräumen beeinflussen und sich auf das körperliche und seelische Wohl der Anwesenden auswirken können. Neben Richtwerten, Studienergebnissen und Empfehlungen wird der Status quo in Klassenräumen vorgestellt.

TEIL 2



Allgemeine Lösungsansätze

Wie sehen gute Raumlösungen aus? Neben modernen Lüftungskonzepten gehören dazu akustische Maßnahmen zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit sowie zeitgemäße Konzepte für die Beleuchtung von Klassenräumen. Diese werden im Hinblick auf ihre praktische Umsetzbarkeit verglichen.





TEIL 3

Schnelleinstieg für Eilige **SMART sanieren – Modularer Sanierungsansatz für Klassenräume**

Wie lassen sich Klassenräume im Bestand klug sanieren?
Mit einem vereinfachten modularen Sanierungsansatz können alle Einflussfaktoren auf den Innenraum kombiniert angegangen werden. Der hier vorgestellte Ansatz setzt bewusst auf praktikable Lösungen, die subjektiv und objektiv zu einer deutlichen Verbesserung des Lehr- und Lernklimas führen und sich flächendeckend umsetzen lassen.

Exemplarische Sanierungsmaßnahmen

Auf der Grundlage des vorgestellten Sanierungsansatzes werden Beispiele für durchgeführte Sanierungsmaßnahmen in vier Klassenräumen vorgestellt. Die Kosten für diese Maßnahmen werden diskutiert und auf Person und Jahr heruntergebrochen.



TEIL 4

Empfehlungen für Neubauvorhaben

Ergänzend folgt ein Exkurs zu Gestaltungsmöglichkeiten bei Neubauvorhaben, um von Anfang an die Voraussetzungen für ein gutes und gesundes Lehr- und Lernklima zu schaffen.



EX- KURS



Teil 1 – Einflussfaktoren auf die Lernumgebung

1.1 Luftqualität

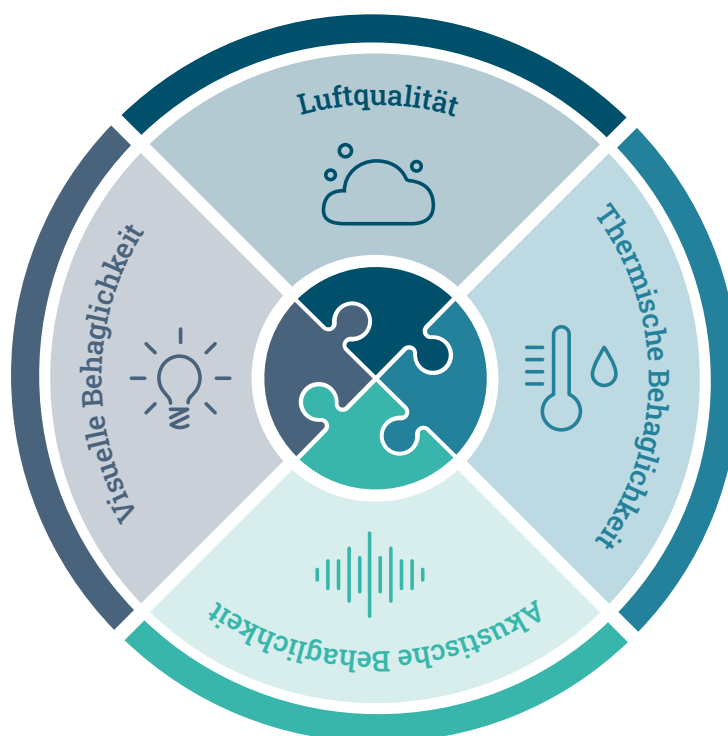
1.2 Raumklima

1.3 Akustik

1.4 Beleuchtung

Luft, Licht, Akustik und das Raumklima bestimmen, ob wir uns in einem Raum wohlfühlen. Dieses Kapitel beleuchtet verschiedene wahrnehmungsorientierte Faktoren, die das Arbeitsklima in Klassenräumen beeinflussen und sich auf das körperliche und seelische Wohl der Anwesenden auswirken können. Neben Richtwerten, Studienergebnissen und Empfehlungen wird der Status quo in Klassenräumen vorgestellt.

Behaglichkeit in Innenräumen



Luft, Licht, Akustik und das Raumklima bestimmen, ob wir uns in einem Raum wohlfühlen.

Abb. 1.1: Physikalische Einflussfaktoren auf das Lehr- und Lernklima in Klassenräumen.

Räume zum Lernen

Verschiedene wahrnehmungsorientierte Faktoren beeinflussen das Lehr- und Lernklima in Innenräumen. Dazu zählen maßgeblich die Raumluftqualität, das Raumklima bzw. die thermische Umgebung, die Raumakustik und die Beleuchtung (siehe Abb. 1.1). Neben den Klassenkameradinnen und Klassenkameraden und der Lehrkraft wirkt sich somit auch der Raum auf den Lernerfolg aus. Es geht also darum, Bedingungen zu vermeiden, die nach aktuellem Forschungsstand die Behaglichkeit, Zufriedenheit oder Leistungsfähigkeit einschränken können.

Immer in der Komfortzone bleiben?

Neueste Studien weisen auf positive Effekte nicht-monotoner Grenzwerte für Licht und thermische Umgebung hin. Es zeigen sich positive gesundheitliche Effekte von Aufenthalt sowohl in zu kalten [43][66][103] als auch in zu warmen Räumen [66][67][103]. Auch bei der Ausleuchtung wäre unreflektiertes

Einhalten von Richtwerten für die Beleuchtungsstärke durch elektrische Beleuchtung allein nicht zielführend. Stattdessen sollte immer das (schwankende) Tageslicht möglichst gut genutzt und erst im folgenden Schritt darauf aufbauend die elektrische Beleuchtung geplant werden, denn ein Mangel an Tageslicht wird als eine der Ursachen für die sogenannte Myopie-(Kurzsichtigkeits-) Pandemie angesehen [38]. Die Forschung in diese Richtung befindet sich jedoch noch in den Anfängen.

Es geht also beim Sanieren und Planen darum, nicht einfach strikt bauliche Richtwerte einzuhalten, sondern pragmatisch Klassenräume so zu gestalten, dass sie dem menschlichen Wohlbefinden möglichst gut entsprechen, um erfolgreich lernen zu können. Und das bedeutet auch, manchmal aus der Komfortzone rauszukommen.

1.1 Luftqualität

Luft ist ein Lebensmittel

Täglich nehmen wir etwa ein Kilogramm feste Nahrung und zwei bis drei Liter Flüssigkeit auf – und atmen rund 12.000 Liter Luft! Luft zählt also zu unseren wichtigsten Lebensmitteln und sollte jederzeit in guter Qualität zur Verfügung stehen. Da wir uns den Großteil unserer Zeit in Innenräumen aufhalten und moderne Gebäude zur Vermeidung von Wärmeverlusten immer luftdichter gebaut werden, gewinnen eine gute Luftqualität und ein hinreichender Luftaustausch in Gebäuden immer mehr an Bedeutung.

Was bedeutet Luftqualität?

Allgemein beschreibt die Luftqualität die aktuelle Zusammensetzung der Raumluft und ihre Belastung mit (Schad-)Stoffen. Neben gasförmigen Inhaltsstoffen (der Wasserdampfgehalt eingeschlossen, der die Luftfeuchte ausmacht) zählen dazu Partikel, Fasern, Pilzsporen, Viren, Bakterien und Allergene. Ist die Luftqualität in einem Raum ungenügend, kann dies bei längerem oder wiederholtem Aufenthalt Symptome wie Kopfschmerzen, Ermüdungs- und Reizerscheinungen an Augen, Nasen und Rachen begünstigen. Man spricht auch vom Sick-Building-Syndrom.

Wenn Räume krank machen

Das **Sick-Building-Syndrom (SBS)** bezeichnet das Auftreten verschiedener gesundheitlicher Beschwerden oder Komforteinschränkungen beim Aufenthalt in Gebäuden, die sich meist nach Verlassen des Gebäudes wieder legen.

Zu den häufig unspezifischen Beschwerden zählen zum Beispiel Müdigkeit oder Konzentrationseinbußen, Kopfschmerzen, trockene Schleimhäute und Augenreizungen.

Auch wenn schlechte Luftqualität, schlechtes Raumklima und schlechte Beleuchtung sowie die mangelnde Kontrolle bzw. Möglichkeit zur Einflussnahme bekannte Risikofaktoren sind, sind die genauen Ursachen von SBS nicht eindeutig geklärt. Es kann also trotz vieler Beschwerden kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Messwerten und deren Wirkung festgestellt werden.

Kann das Auftreten von gebäudebezogenen Symptomen bzw. die Entwicklung einer Krankheit von Anwesenden auf konkrete gebäudebezogene Ursachen wie etwa allergene, mikrobielle, chemische oder physikalische Belastungen zurückgeführt werden, spricht man von **Building-Related Symptoms (BRS) oder Building-Related Illness (BRI)**. Anders als beim SBS sind die Quellen bei BRS/BRI also bekannt und können eindeutig zugeordnet werden.



Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Bei CO₂ handelt es sich um ein geruch- und farbloses Gas. Als Stoffwechselprodukt wird es mit der menschlichen Atmung an die Umgebung abgegeben. Dadurch steigt die Konzentration-CO₂ in der Raumluft über die Zeit an: Je höher die Personenanzahl im Raum und je geringer der Luftwechsel, desto höher die CO₂-Konzentrationen im Innenraum.

Gerade in Klassenräumen ist der CO₂-Gehalt ein wichtiger Indikator für die Luftqualität.

CO₂ als Indikator für die Luftqualität

Als Indikator für die Luftqualität in Innenräumen kann der Gehalt an CO₂ dann herangezogen werden, wenn die anwesenden Personen die Hauptquellen für Luftverunreinigungen und Schadstofflasten darstellen. In Klassenräumen ist dies wegen hoher Belegungsdichten und langer Aufenthaltszeiten in besonderem Maße gegeben.

Die durchschnittliche Wohnfläche in Deutschland entspricht dagegen etwa 55,4 m² pro Person [79].

Leitwerte für Klassenräume

Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten, genauer die ASR A3.6 „Lüftung“ [93], geben Leitwerte zur Beurteilung der CO₂-Konzentration mitsamt Handlungsempfehlungen an, um erhöhte Konzentrationen wieder zu reduzieren. Der „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umweltbundesamtes [102] liefert ergänzend eine entsprechende hygienische Beurteilung. Tabelle 1.1 fasst diese dreistufige Unterteilung in einer Ampel-Farbgebung zusammen.

Beispiele für Belegungsdichten ^{1 2 3}

In einem **Klassenraum** mit einer typischen Grundfläche von 65 m² und 30 Anwesenden stehen knapp 2,2 m² pro Kopf zur Verfügung.

Zum Vergleich:

In einem **Arbeitsraum** sind laut ASR A1.2 „Raumabmessungen und Bewegungsflächen“ mindestens 8 m² für einen Arbeitsplatz und 6 m² für jeden weiteren Arbeitsplatz vorzusehen, in Großraumbüros sogar mindestens 12 m² pro Person [90].

Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) und Arbeitsstättenverordnung

Basierend auf der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) beschreiben die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR), wie bei Planung, Einrichtung und Betrieb von Arbeitsstätten die Anforderungen und Schutzziele im Kontext von Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten sichergestellt werden können.

Zwar besteht keine rechtliche Verbindlichkeit, aber bei Berücksichtigung der ASR kann davon ausgegangen werden, dass auch die ArbStättV eingehalten wird.



Konzentrationsangaben von Gasen

Konzentrationen einzelner Gase in einem Gasgemisch werden häufig als Stoffmengenverhältnis, also dem Verhältnis der Anzahl an Molekülen, in der Einheit ppm (parts per million) angegeben.

Das Stoffmengenverhältnis entspricht unter Standardatmosphärenbedingungen (15 °C und ein Luftdruck von 1.013,25 hPa) genau der Volumenkonzentration der Gase.

Versteht man nun vereinfacht unter „Luft“ das gesamte Gasgemisch, das wir atmen, so würde eine Konzentration von 1.500 ppm CO₂ bedeuten, dass sich in 1 Million Luftmolekülen 1.500 CO₂-Moleküle befinden – oder 1.500 ml CO₂ in 1 m³ Luft.

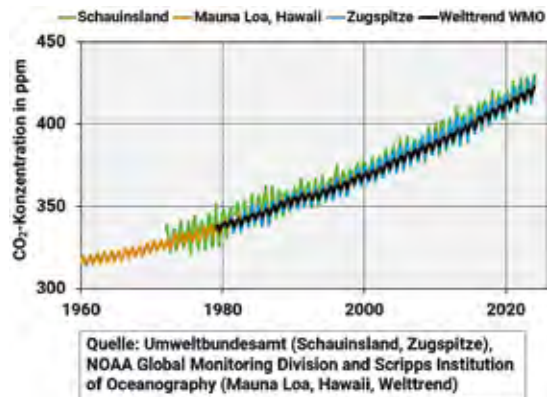


Abb. 1.2: Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit 1960 (eigene Darstellung in Anlehnung an [101]).

CO ₂ (ppm)	Hygienische Bewertung	Empfohlene Maßnahmen
über 2.000	inakzeptabel	<ul style="list-style-type: none"> • Belüftbarkeit des Raums prüfen • weitergehende Maßnahmen erforderlich (z. B. verstärkte Lüftung, Reduzierung der Personenzahl im Raum, ...)
1.000 bis 2.000	auffällig	<ul style="list-style-type: none"> • Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern • Lüftungsmaßnahmen ergreifen/intensivieren (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) • Lüftungsplan aufstellen (z. B. Verantwortlichkeiten festlegen)
unter 1.000	unbedenklich	<ul style="list-style-type: none"> • keine Maßnahmen erforderlich (sofern durch die Raumnutzung kein Konzentrationsanstieg über 1.000 ppm zu erwarten ist)

Tabelle 1.1: Leitwerte und hygienische Bewertung der CO₂-Konzentration [93][102].

CO₂-Konzentration in der Außenluft

Kohlenstoffdioxid ist ein klimaaktives Spurengas und kommt in der Atmosphäre der Erde vor. Während das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für das Jahr 1750 als vorindustrielle CO₂-Konzentration noch 278 ppm angibt [47], liegt diese heute bei über 420 ppm [101]. Abb. 1.2 zeigt die zeitliche Entwicklung von 1960 bis heute.

Beim (Fenster-)Lüften wird Luft zwischen Innenraum und Umgebung ausgetauscht. Die CO₂-Konzentration in der Außenluft stellt somit eine untere Grenze für die Konzentration im Innenraum dar, die sich bei einem Austausch der gesamten Raumluft einstellen kann.

Die Luftqualität beeinflusst das Lernen

Verschiedene Studien haben den Einfluss von schlechter Luftqualität auf die Lernfähigkeit von Schülerinnen und Schülern untersucht. Dabei wurde eine um 5 % geringere Konzentration und Aufmerksamkeit bei Zunahme des CO₂-Gehaltes von 690 auf 2.909 ppm festgestellt [17]. Tests mit mehr als 200 Schülerinnen und Schülern zeigten zudem eine Steigerung der Worterkennungsrate um 15 % bei Anhebung des Außenluftvolumenstroms von 1 auf 8 l/s pro Person [6]. Weitere Studienergebnisse weisen auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit hin: So konnten Aufgaben bei Verdopplung des Außenluftvolumenstroms (von 3 auf 6,6 l/s, von 4 auf 8,5 l/s, von 5 auf 9,5 l/s; siehe Abb. 1.3) um 8 bis 14 % schneller bearbeitet werden [107].

Eine gute Luftqualität kann Fehlzeiten reduzieren.

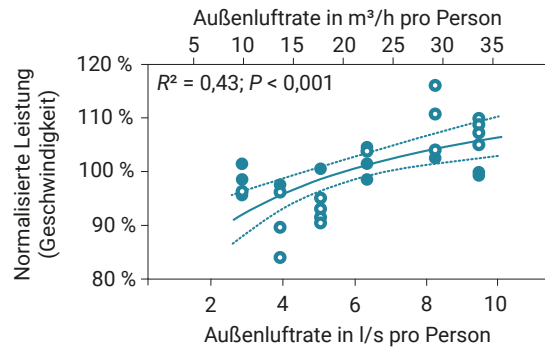


Abb. 1.3: Geschwindigkeit der Bearbeitung von Aufgaben durch Schülerinnen und Schüler bei verschiedenen personenbezogenen Außenluftvolumenströmen (eigene Darstellung in Anlehnung an [107]).

Höhere Fehlzeiten bei „dicker Luft“

Neben einer Zunahme der Leistungsfähigkeit können geringere CO₂-Konzentrationen auch Fehlzeiten reduzieren: In einer amerikanischen Studie an 22 Schulen mit 434 untersuchten Klassenzimmern wurde ein Anstieg der CO₂-Konzentration um 1.000 ppm mit einer Abnahme der Annual Average Daily Attendance (ADA) von 0,5–0,9 % in Verbindung gebracht. Das entspricht einem relativen Anstieg von Fehlzeiten der Schülerinnen und Schüler um 10 bis 20 %. Der Grund hierfür könnte im verringerten Luftwechsel liegen, der die Übertragung von Atemwegserkrankungen durch beim Husten oder Niesen abgegebene infektiöse Partikel begünstigt [73].

In einer weiteren Studie mit 60 natürlich belüfteten Grundschulklassenräumen in Schottland wurde ein Anstieg der zeitlich gemittelten CO₂-Konzentration um 100 ppm mit einer Abnahme der jährlichen Anwesenheit um etwa 0,2 % in Verbindung gebracht, das heißt, mit fast einem halben Fehltag mehr pro Jahr [42].



Average Daily Attendance (ADA)

Die jährliche mittlere tägliche Anwesenheit (annual ADA) wird häufig als Quotient aus im Unterricht anwesenden Schülerinnen und Schüler und der Gesamtzahl der Schülerinnen und Schüler berechnet (siehe auch [73]).

Eine andere Berechnungsvorschrift setzt die Summe der Anwesenheitstage ins Verhältnis zur jährlichen Anzahl an Unterrichtstagen. Wäre genau eine Schülerin an jedem Schultag anwesend, entspräche das einer ADA von 1. Wegen Krankheitstagen, Umzügen während des Schuljahres und Schulabbrüchen etc. ist die ADA im Allgemeinen niedriger als die Anzahl an Schülerinnen und Schülern.

Zum Beispiel in Kalifornien ist die ADA eine wichtige Kenngröße bei der Zuweisung finanzieller Mittel für Schulbezirke [36][37][96].

Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Neben Kohlenstoffdioxid zählen flüchtige organische Verbindungen (VOC, volatile organic compounds) zu den typischen Innenraumverunreinigungen. Dabei handelt es sich um kohlenstoffhaltige Stoffe wie Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde und organische Säuren, die bereits bei Temperaturen ab Raumtemperatur gasförmig werden. Anders als geruchlose Gase wie CO₂ können VOC die Ursache für Gerüche sein.

Quellen für VOC in Klassenräumen

VOC können aus verschiedenen Quellen stammen. Die Verwendung von Kosmetika oder von Reinigungs- und Pflegemitteln sowie Tabakrauch können die VOC-Konzentration in der Raumluft vorübergehend erhöhen. Zu den gebäudebezogenen Quellen, die eher dauerhaft vorhanden sind, zählen neben Einrichtungsgegenständen wie Möbeln, Pflanzen und Dekorationsmaterialien auch Baumaterialien wie Bodenbeläge, Farben, Lacke und Klebstoffe. Teilweise tragen auch externe Quellen wie der Straßenverkehr oder nahe gelegene Industriebetriebe zur VOC-Konzentration im Raum bei. Schließlich geben auch die anwesenden Personen beim Atmen und durch Ausdünstungen bzw. über die Haut eine Vielzahl von VOC an ihre Umgebung ab (siehe auch [19] und [99]).

Vor allem nach Sanierungsmaßnahmen können erhöhte VOC-Konzentrationen auftreten. Daher wird der Einsatz emissionsarmer Produkte und Materialien empfohlen, die mit Umweltzeichen wie dem Blauen Engel [9] gekennzeichnet sind. Bei umfangreicheren Sanierungsmaßnahmen empfiehlt das Umweltbundesamt die Verwendung von Materialien und Bauprodukten, deren VOC-Emissionen nach dem AgBB-Bewertungsschema [98] (AgBB: Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten) gesundheitlich bewertet wurden [99].

Gesundheitliche Auswirkungen von VOC

Die Luft enthält typischerweise eine Vielzahl, manchmal Hunderte verschiedene Einzelverbindungen, deren genaue Zusammensetzung in der Regel nicht bekannt ist.

CO₂, eCO₂ und TVOC

Zur Beurteilung der Innenraumluftqualität wird häufig der Kohlenstoffdioxidgehalt als Indikator herangezogen. Empfehlungen und Grenzwerte wie in Tabelle 1.1 beziehen sich dabei meist auf die tatsächlich in der Raumluft vorliegende CO₂-Konzentration.

In der Praxis und bei der Regelung von Lüftungsgeräten werden anstelle von „echten“ CO₂-Sensoren teilweise preisgünstigere Multigassensoren eingesetzt, die auf eine Vielzahl von VOC reagieren und eine grobe Abschätzung der TVOC-Konzentration (total volatile organic compounds) liefern.

Unter der Annahme, dass die vom Menschen über die Zeit abgegebene Konzentration an VOC proportional zur ausgeatmeten CO₂-Konzentration ist, kann dann eine (estimated) eCO₂-Konzentration geschätzt werden. Diese sollte jedoch höchstens dann zur Beurteilung der Innenraumluft herangezogen werden, wenn die anwesenden Personen die Hauptquelle von Luftverunreinigungen sind.

Schadstoffe können aus Materialien im Raum und mit der Außenluft in die Raumluft gelangen.

Die in der Literatur angegebenen Richtwerte für VOC beziehen sich meist auf Einzelstoffe und deren toxische Eigenschaften bei hohen Konzentrationen. In nicht industriell genutzten Räumen, insbesondere in Klassenräumen, treten solche Konzentrationen in der Regel nicht auf. Die komplexen Wirkzusammenhänge verschiedener organischer Verbindungen innerhalb eines Gemischs

und ihre Auswirkung auf das menschliche Wohlbefinden sind jedoch noch nicht ausreichend erforscht. Daher ist es nicht möglich, konkrete Zusammenhänge zu den meist unspezifischen Beschwerden der Anwesenden eindeutig herzustellen – etwa nach Sanierungsmaßnahmen, wenn über Irritationen der Augen und Schleimhäute, Atemwegsreizungen, Kopfschmerzen, Müdigkeit, Konzentrationsschwäche sowie olfaktorische (geruchliche) Beeinträchtigungen geklagt wird (siehe Infobox „Wenn Räume krank machen“ auf Seite 9).

Um dennoch eine Quantifizierung der Belastung durch VOC zu ermöglichen, kann die Summe der Konzentrationen aller Einzelverbindungen zum TVOC-Wert zusammengefasst werden. Diese Indikatorgröße ist dabei ausdrücklich nicht toxikologisch begründet, sondern dient vielmehr der orientierenden Gesamtbewertung der hygienischen Beeinträchtigung durch VOC in der Raumluft. So wird z. B. mit steigender TVOC-Konzentration eine zunehmende Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der o. g. unspezifischen Beschwerden beobachtet [71][102].

Es bleibt also ratsam, übermäßige VOC-Quellen aus dem Raum zu entfernen, geprüfte Baumaterialien zu verwenden und stets für einen hinreichenden Luftaustausch zu sorgen. Abschließend sei zur hygienischen Beurteilung der TVOC-Konzentration und den daraus resultierenden Handlungsempfehlungen auf das fünfstufige Konzept von Seifert aus dem Jahr 1999 verwiesen [71].

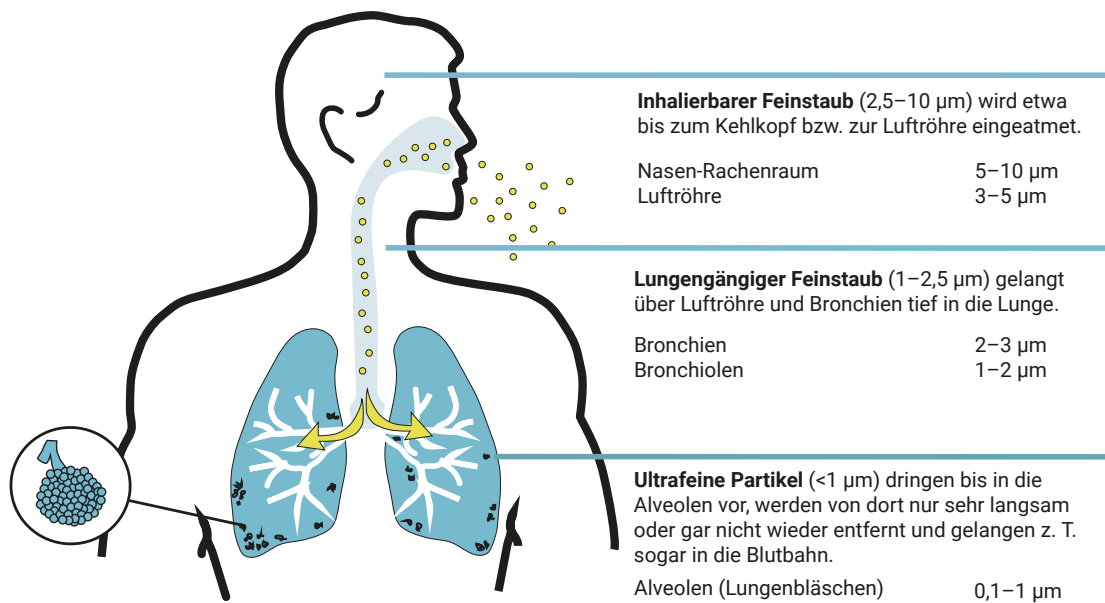


Abb. 1.4: Wirkung von Feinstaub auf den menschlichen Körper (eigene Darstellung in Anlehnung an [78]).

Feinstaub und Aerosole

Partikelbelastungen der Raumluft stellen eine weitere gesundheitsrelevante Innenraumverunreinigung dar. Ein Gemisch aus einem Trägergas und festen bzw. flüssigen Partikeln wird allgemein als Aerosol bezeichnet. Feinstaub bezeichnet luftgetragene (schwebende) Teilchen unterschiedlicher Größe, die aufgrund ihrer geringen Masse nicht unmittelbar auf den Boden absinken, sondern für einige Zeit in der Luft verbleiben (Schwebstaub).

Je kleiner, desto gesundheitsschädlicher

Feinstaub wird nach Partikelgrößen unterschieden: Partikel unterhalb eines aerodynamischen Durchmessers von 10 µm werden vereinfacht als PM_{10} (PM: particulate matter) bezeichnet. Die kleinere Partikelgrößenfraktion $PM_{2,5}$ umfasst vereinfacht Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 2,5 µm

und gilt als lungengängig (alveolengängig).

Noch kleiner und gesundheitsschädlicher ist Ultrafeinstaub (UFP) mit Teilchen unterhalb von 0,1 µm (siehe Abb. 1.4). Einen Vergleich verschiedener Partikelgrößen mit einem menschlichen Haar zeigt Abb. 1.5.

In Klassenräumen ergibt sich die Feinstaubbelastung sowohl durch die Belastung der Außenluft als auch durch Quellen und Aufwirbelungen im Innenraum. Die während der (Fenster-)Lüftung in den Raum eingebrachte Außenluft beeinflusst wesentlich die Konzentration der kleineren Partikelfraktion $PM_{2,5}$, während der größere Feinstaubanteil der Fraktion PM_{10} (bzw. $PM_{2,5-10}$) hauptsächlich aus Innenraumquellen stammt.

In Schulinnenräumen treten regelmäßig deutlich höhere Konzentrationen (gröberen) Feinstaubes auf als in der Außenluft. Dies ist nicht zuletzt auf eine wesentlich schnellere



Abb. 1.5: Feinstaub im Größenvergleich (eigene Darstellung in Anlehnung an [41]).

Verdünnung der Partikelkonzentration in der Außenluft im Vergleich zu räumlich begrenzten Innenräumen zurückzuführen [19][102].

Der negative Einfluss auf die Gesundheit ist besonders stark bei PM_{2,5} und kleineren Partikeln, da diese tiefer in den menschlichen Körper eindringen.

Aerosole können Infektionen übertragen

Partikelbelastungen in Innenräumen können auch durch menschliche Quellen hervorgerufen werden. Bei respiratorischen Aktivitäten (Sprechen, Atmen, Husten, Niesen) werden Tröpfchen aus Speichel in die Raumluft abgegeben. Verdunsten diese Tröpfchen, können Partikel im Größenbereich von Feinstaub entstehen, welche ebenfalls für einige Zeit in der Luft verbleiben und diese belasten. Solche Partikel können Krankheitserreger wie Viren mit sich führen. Werden sie eingeatmet, kann dies zu einer Infektion und Atemwegserkrankungen führen.

Partikelangaben im Arbeits- und Umweltschutz

Die Definition der Partikelgrößenfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} geht auf den National Ambient Air Quality Standard for Particulate Matter (kurz PM NAAQS) der US EPA (US-amerikanische Umweltschutzbehörde) zurück. Dieser Standard ist jedoch sehr komplex und berücksichtigt über eine zusätzliche Trennfunktion die Unschärfen bei der Messung von Partikeln. So würde PM₁₀ den Feinstaub hinter einem Abscheider bezeichnen, der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm zu 50 % abscheidet, einen größeren Anteil kleinerer Partikel und einen kleineren Anteil größerer Partikel durchlässt.

Zunehmend gehen Behörden und Normung (so etwa auch die Normenreihe ISO 16890 zur Luftfilterung für die allgemeine Raumluftechnik [30]) zu einer vereinfachten Definition über: PM_x bezeichnet die Gesamtheit der Schwebepartikel mit aerodynamischem Durchmesser kleiner als oder gleich x µm. PM_{2,5} würde also alle Partikel unterhalb einer Größe von 2,5 µm einbeziehen. Somit ist PM_{2,5} bereits in PM₁₀ enthalten.

Auch im Rahmen dieses Leitfadens werden die vereinfachten Bezeichnungen genutzt.

Weiterhin sei auf unterschiedliche Einteilungen von Staub anhand der Partikelgröße im Arbeitsschutz [95] und im Umweltschutz [56] hingewiesen.

1.2 Raumklima

Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit

Ob wir uns thermisch wohlfühlen, hängt hauptsächlich von der Wärmeabgabe unseres Körpers an die Umgebung ab. Diese Wärmeabgabe wird durch verschiedene raumklimatische Faktoren beeinflusst. Dazu zählen die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit, die Art der Luftströmung bzw. die Luftgeschwindigkeit sowie Einflüsse von Wärmestrahlung, beispielsweise durch warme umgebende Oberflächen oder durch Sonneneinstrahlung.

Das Wohlbefinden und die bevorzugte Raumtemperatur unterscheiden sich von Person zu Person und hängen außerdem stark von individuellen Faktoren wie der Bekleidung und körperlicher Aktivität ab. Auch der Grad der saisonalen Anpassung, die Aufenthaltsdauer im Raum, unser Kontrollempfinden und die allgemeine persönliche Verfassung spielen eine Rolle.

Körperliche Aktivität

Die körperliche Aktivität beeinflusst unser thermisches Wohlbefinden und unsere bevorzugte Raumtemperatur. Zur Beschreibung dient die Metabolische Rate, die mit der Einheit „met“ angegeben wird. 1 met entspricht dabei einer Wärmeabgabe von 58 W pro Quadratmeter Körperoberfläche bei sitzender, entspannter Tätigkeit [32].

Temperatur

Gemäß ASR A3.5 „Raumtemperatur“ bezeichnet die **Raumtemperatur** die vom Menschen empfundene Temperatur, die von

Thermischer Widerstand von Bekleidung

Die Art der Bekleidung bzw. ihr Wärmeleitwiderstand wird in der Einheit „clo“ (von englisch clothing) ausgedrückt. Dabei entspricht 1 clo einem Wärmedurchlasswiderstand von $0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Typische sommerliche Bekleidung mit kurzärmeligem Hemd und Hose entsprechen etwa 0,5 clo, während eine typische Winterbekleidung in Innenräumen aus Hose, Hemd und Pullover etwa 1 clo entspricht.

der Lufttemperatur sowie den Oberflächentemperaturen der umgebenden Flächen bestimmt wird. Die **Lufttemperatur** dagegen ist ohne Einwirkung von Wärmestrahlung die Temperatur der Luft, die den Menschen umgibt. Für Klassenräume mit überwiegend sitzenden Personen wird je nach Arbeitsschwere ein Temperaturbereich von etwa 19 bzw. 20 bis 26 °C empfohlen [92]. Bei hohen Außentemperaturen sind auch noch höhere Lufttemperaturen im Innenraum zulässig.

Die **operative Raumtemperatur** ergibt sich gemäß DIN EN ISO 7726 näherungsweise aus dem Mittelwert zwischen Lufttemperatur und (mittlerer) Strahlungstemperatur [34].

Auch **vertikale Temperaturunterschiede** können sich auf das Wohlbefinden auswirken. Entsprechend sollte zwischen Kopf- und Fußgelenken die Temperaturdifferenz nicht größer als 3 °C sein [32].

Die **mittlere Strahlungstemperatur** ergibt sich aus der mittleren Oberflächentempera-

Für Klassenräume empfiehlt sich meist ein Temperaturbereich von etwa 20 bis 26 °C.



Beispielrechnung

129

Die Rolle der Bekleidung auf das Temperaturempfinden kann nach dem Berechnungsmodell von Fanger gemäß DIN EN ISO 7730 [32] (auch als „Behaglichkeitsnorm“ bezeichnet) bzw. dem ASHRAE-Standard 55-2023 [4] anhand eines Beispiels verdeutlicht werden:

Bei sitzender Tätigkeit mit einer Aktivität von 1,1 met, einer angenommenen Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s und bei 50 % Luftfeuchtigkeit ergibt sich für Winterbekleidung (1 clo) ein neutrales Wärmeempfinden bei einer operativen Raumtemperatur von 22,7 °C, bei sommerlicher Bekleidung (0,5 clo) bei 25,7 °C.

Für entsprechende Berechnungen kann das CBE Thermal Comfort Tool der Universität Berkeley helfen (Abb. 1.6) [88].

tur der Umschließungsflächen. Dazu zählen Fenster, Wände, Decke und Boden. Zwar reicht „für die meisten Arbeitsplätze [...] die Lufttemperatur zur Beurteilung, ob eine gesundheitlich zuträgliche Raumtemperatur vorhanden ist, aus“ [92]; trotzdem kann die Wärmestrahlung die Behaglichkeit stark beeinflussen und im Falle von unterschiedlichen Temperaturen bzw. Strahlungsasymmetrien von Umschließungsflächen zu Unbehagen führen.

Bei übermäßiger Sonneneinstrahlung durch Glasflächen können die Raumtemperatur und die beschienene Oberflächentemperatur

ansteigen. Daher ist für einen sommerlichen Wärmeschutz nach den anerkannten Regeln der Technik (nach geltendem Baurecht) zu sorgen [32]. Beispielsweise sollte die direkte Sonneneinstrahlung auf Arbeitsplätze vermieden werden. Für Beispiele eines wirksamen Blendschutzes an Fenstern, Oberlichtern und Glaswänden sowie Sonnenschutzsysteme sei auf ASR A3.4 „Beleuchtung und Sichtverbindung“ [91] und ASR A3.5 „Raumtemperatur“ [92] verwiesen.

Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit gibt den Gehalt an Wasserdampf in der Luft an. Wie viel Wasserdampf die Luft aufnehmen kann, hängt von Temperatur und Druck ab: Mit steigender Lufttemperatur kann mehr Wasserdampf, mit sinkender Lufttemperatur weniger Wasserdampf aufgenommen werden. Die relative Luftfeuchte in Prozent gibt somit für eine bestimmte Lufttemperatur das Verhältnis zwischen dem Wasserdampfgehalt der Luft zum maximal möglichen Wasserdampfgehalt an.

Die größte Feuchtelast in Schulräumen entsteht in der Regel durch die Ausatmung (etwa 15 %) und durch Transpiration, also das Schwitzen von Personen. Wird die Luft stark heruntergekühlt, kann dies unter Umständen dazu führen, dass mehr Wasserdampf entsteht, als von der Luft aufgenommen werden kann. Dann kann Wasser an kalten Oberflächen auskondensieren. Aufgrund der Gefahr von Schimmelbildung sollte das vermieden werden – insbesondere im Winter bzw. dann, wenn mehr Feuchte entsteht, als verdunsten kann. Man spricht dann davon, dass die Taupunkttemperatur der Raumluft unterschritten wird, wobei die



Taupunkttemperatur vom Wasserdampfgehalt der Luft und dem Druck abhängt. Dieser Effekt kann vor allem in Räumen mit lokal stark verringerten Temperaturen auftreten, etwa an schlecht gedämmten Fenstern. Zur Vorbeugung von Schimmelbildung und für das menschliche Wohlbefinden hilft regelmäßiges und korrektes Lüften.

Im Allgemeinen wird für die Raumluft ein mittlerer Bereich von etwa 40–60 % relativer Feuchte empfohlen. Dieser Bereich stellt aufgrund verschiedener Einflüsse der Luftfeuchtigkeit auf Wohlbefinden und der Gesundheit des Menschen einen Kompromiss dar. Die

verschiedenen Einflüsse der Luftfeuchtigkeit wurden in einer Literaturstudie zusammengefasst [62]. Tabelle 1.2 stellt die empfohlenen Werte für die maximale relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen entsprechend der ASR A3.6 „Lüftung“ [93] dar.

Lufttemperatur	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C
max. relative Feuchtigkeit	80 %	70 %	62 %	55 %

Tabelle 1.2: Empfehlung für die maximale relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Lufttemperatur [93][102].

Tatsächliche Lufttemperatur und empfundene (operative) Temperatur

Die empfundene Lufttemperatur kann von der tatsächlichen und messbaren Lufttemperatur abweichen: Höhere Temperaturen können in einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit als unangenehm empfunden werden als in einer Umgebung mit geringer Luftfeuchtigkeit.

Auch die Luftgeschwindigkeit spielt eine Rolle. So kann etwa die Anströmung einzelner Körperteile mit kühler Luft mit zunehmender Geschwindigkeit als Zugluft empfunden werden. Auch ein direktes Anströmen mit warmer Luft kann in neutralen Umgebungsbedingungen als unangenehm empfunden werden, während sich bei sehr warmen Umgebungsbedingungen auch das reine Erhöhen der Luftgeschwindigkeit (etwa durch einen Ventilator) positiv auf das thermische Empfinden auswirken kann.

Eine höhere relative Luftfeuchte kann dazu führen, dass sich sehr kleine Partikel schneller ablagern, wodurch potentiell virenbeladene Partikel schneller aus der Raumluft entfernt werden. Bei zu hoher Feuchtigkeit besteht allerdings die Gefahr von Schimmelbildung und mikrobiellem Wachstum. Eine zu geringe Feuchtigkeit insbesondere während der Heizperiode kann allerdings zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Augen, Haut und Atemwege führen. Dahingegen werden bei einer niedrigen Luftfeuchtigkeit beispielsweise Geruchsbelastungen als weniger intensiv empfunden und die Vermehrung von Staubmilben reduziert. Weiterhin kann die Luftfeuchtigkeit Einfluss auf die Aktivität von Krankheitserregern haben, wobei dies je nach Typ des Krankheitserregers bei einer hohen oder niedrigen Luftfeuchtigkeit der Fall sein kann. Es gibt somit keinen einheitlichen positiven oder negativen Effekt.

Bei niedrigen Temperaturen tolerieren wir eine höhere Luftfeuchtigkeit.

Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit im Raum wirkt sich auf den Wärmeaustausch des Menschen mit der Umgebungsluft aus. Bei höheren Geschwindigkeiten kann mehr Wärme vom menschlichen Körper an die Umgebungsluft abgegeben werden. Welche Luftgeschwindigkeit als angenehm empfunden wird, hängt vor allem von der Temperatur, aber auch vom Turbulenzgrad ab. So können etwa hohe Luftgeschwindigkeiten insbesondere bei kühlen Temperaturen an einzelnen Körperteilen zu Zuglufterscheinungen führen.

Turbulenzgrad

Der Turbulenzgrad ist ein Maß für zeitliche Schwankungen in der Luftgeschwindigkeit.

Bei einer operativen Raumtemperatur von 22 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und einer Aktivität von 1,1 met werden Luftgeschwindigkeiten etwa unter 0,2 m/s als behaglich empfunden. Unter warmen Bedingungen, z. B. über 26 °C, hilft eine höhere Luftgeschwindigkeit, auch erhöhte Temperaturen noch als behaglich zu empfinden.

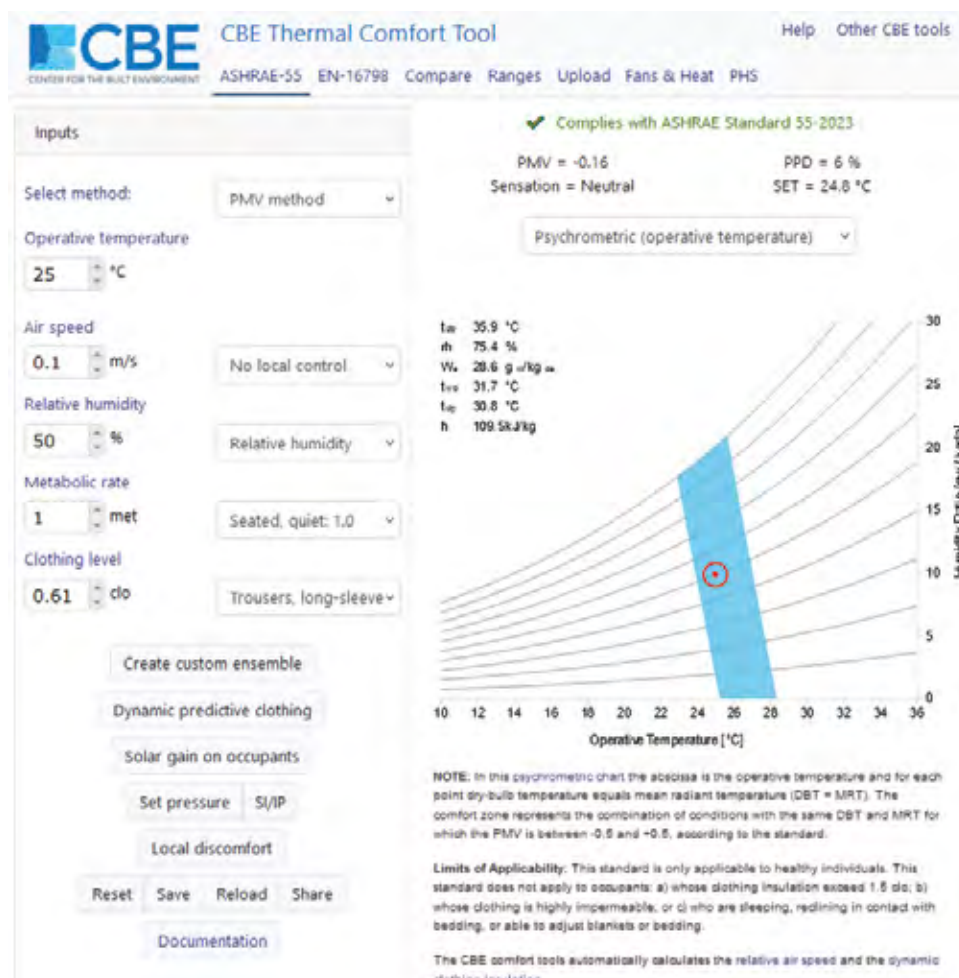


Abb. 1.6: Das Thermal Comfort Tool des Center for the Built Environment (CBE) [88] ist ein kostenloses Online-Tool für Berechnungen und Visualisierungen rund um thermischen Komfort.



1.3 Akustik

Eine gute Raumakustik, die die Sprachverständigung fördert, ist enorm wichtig für Gesundheit und Lernerfolg. Denn etwa 45 bis 70 % des Unterrichts finden mündlich statt [74]. Bei unzureichender akustischer Qualität kommt es aber – häufig begünstigt durch hallige Räume mit zu geringer Schallabsorption – immer wieder zu hohen Lärmpegeln (siehe Abb. 1.7). Diese erschweren nicht nur das Lernen und Lehren, sondern können die Beteiligten auch schneller ermüden, ihre Gedächtnisleistung beeinträchtigen [50] und ihre Stimmbelastung erhöhen. Insgesamt entsteht eine größere gesundheitliche Belastung, die sich z. B. in einer erhöhten Herzschlagfrequenz äußert [63].

Für eine gute Verständigung sollte der Dauerschalldruckpegel unter 35 dB(A) liegen, die Nachhallzeit bei etwa einer halben Sekunde.

Anforderungen an die Raumakustik steigen

Die Anforderungen an die Klassenraumakustik und die Sprachverständlichkeit sind in den letzten Jahrzehnten gestiegen:

- Statt einer einzelnen Person im klassischen Frontalunterricht kommunizieren bei modernen pädagogischen Konzepten wie Gruppen- oder Projektunterricht oft mehrere im Raum verteilte Sprechende gleichzeitig.
- Der Unterricht findet zunehmend inklusiv und mit einer wachsenden Zahl von Schülerinnen und Schülern statt, deren Muttersprache nicht Deutsch ist. Laut Statistischem Bundesamt ist die Zahl der Schülerinnen und Schüler mit ausländischer Staatsangehörigkeit im Schuljahr 2023/24 im Vergleich zum Vorjahr um 7 % gestiegen. Somit haben 15 % der Schülerinnen und Schüler (Berufsschulen eingeschlossen) einen ausländischen Pass [81].

- Fremdsprachen werden schon in den unteren Klassenstufen unterrichtet (teilweise bereits in der Grundschule).

Inklusive Bedingungen schaffen

Findet der Unterricht nicht in der eigenen Muttersprache statt und ist der Wortschatz der Teilnehmenden dementsprechend begrenzt, kann es bei ungünstiger Akustik im Klassenraum erst recht zu Verständnis- und Verständigungsproblemen kommen. Dies gilt für jede Art des Fremdsprachenunterrichts.

Im Rahmen dieses Leitfadens wird unabhängig von Schulform und Unterrichtsfach empfohlen, die strengeren Anforderungen an die Raumakustik für inklusiven Unterricht anzustreben und immer von einem erhöhten Bedarf an Sprachverständlichkeit auszugehen.

In diesem Zusammenhang bilden die DIN 18041 zur „Hörsamkeit in Räumen“ [22] bzw. die Technischen Regeln ASR A3.7 „Lärm“ [94] die wesentliche Grundlage für die im Folgenden dargestellten raumakustischen Anforderungen.

Geräuschpegel und Signal-Rausch-Abstand

Schall beschreibt allgemein mechanische Schwingungen von Luftmolekülen im für den Menschen hörbaren Frequenzbereich. Dieser liegt im Mittel etwa zwischen 16 Hz und 20.000 Hz. Schwingungen in diesem Bereich bringen das Trommelfell zum Vibrieren und der Luftschall wird über die Gehörknöchelchen im Mittelohr zum Innenohr weitergegeben. Höreindruck und subjektives Empfinden hängen dabei von Art, Anzahl und Überlage-

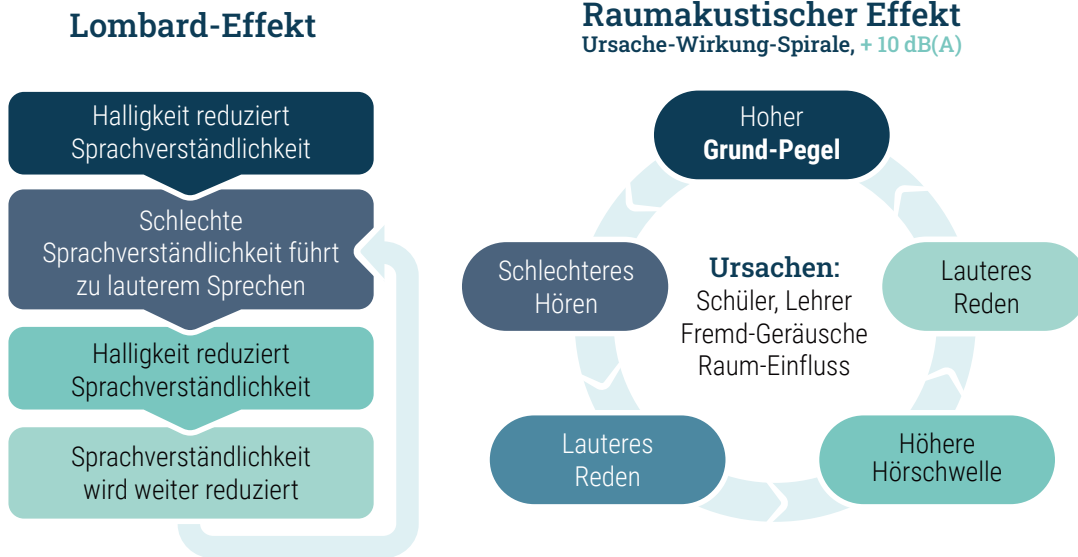


Abb. 1.7: Lombard-Effekt (eigene Darstellung in Anlehnung an Metzzen [3]) und Raumakustischer Effekt (eigene Darstellung in Anlehnung an Fraunhofer IBP [61]).

Schalldruck oder Schalleistung?

Der **Schalleistungspegel** gibt an, welche Quellstärke (Schallemission) eine Schallquelle aussendet und ist somit nur von den Eigenschaften der Quelle abhängig.

Der **Schalldruckpegel** dagegen beschreibt die Wirkung des Schalls (Schallimmission) an einem bestimmten Ort. Er ist abhängig von der (Absorption der) Umgebung und von der Richtwirkung und Entfernung der Quelle. Für die Bewertung der Raumakustik ist diese Größe entscheidend.

Beide Größen werden meist als Pegel und in dB angegeben, haben jedoch verschiedene Bezugsgrößen.

Die Bewertung der Schallquellen sowie von der Umgebung und unserem persönlichen (Gemüts-) Zustand ab. Überlagern sich Schallquellen

(z. B. Schülerinnen und Schüler, Beamer-Lüfter, Surren von Leuchtstoffröhren oder Außenlärm bei geöffneten Fenstern), können die einzelnen Schalldruckpegel nicht einfach addiert werden. Entscheidend sind die lautesten Geräusche. Für überschlägige Rechnungen können Quellen, die mindestens 8 bis 10 dB unterhalb der lautesten Geräuschquelle liegen, vernachlässigt werden [39]. Einer Änderung des Schalldruckpegels um 10 dB entspricht einer Halbierung bzw. Verdoppelung des Lärmpegels.

Anschaulich zusammengefasste Informationen zur Schallausbreitung und Richtwirkung enthält der frei zugängliche Status-Report 61 „Akustik in Klassenräumen“ des Fachverbands Gebäude-Klima e.V. (12/2023) [39].

Bau- und betriebsbedingte Stör- und Hintergrundgeräusche sollten in der Regel einen A-bewerteten Dauerschalldruckpegel von 35 dB(A) nicht überschreiten.

Was ist ein Pegel, wofür steht dB und was heißt eigentlich das A in dB(A)?

Allgemein beschreibt ein **Pegel** das logarithmische Verhältnis einer Größe zu einer Bezugsgröße. Beim Schalldruckpegel ist dies die Hörschwelle bei 1 kHz. Pegel werden meist in dB (Dezibel) angegeben.

Das menschliche Gehör empfindet verschiedene Frequenzen als unterschiedlich laut. Im Gegensatz zu den mittleren Frequenzen, bei denen typischerweise die Sprachverständigung stattfindet, sind daher insbesondere bei hohen und tiefen Frequenzen höhere Schalldrücke erforderlich, um das gleiche Lautstärkeempfinden zu erzielen. Durch die **A-Beurteilung**, die mit einem „A“ in dB(A), dBA oder dB_A kenntlich gemacht wird, erfolgt eine Filterung bzw. „Korrektur“ des Schallsignals angelehnt an die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs.

Für die Sprachverständigung sollte möglichst eine Differenz von ca. 10 bis 15 dB(A), besser sogar 20 dB(A) zwischen Stör- und Sprachpegel eingehalten werden (**Signal-Rausch-Abstand**). Daraus ergibt sich, dass

Sprechweise	Sprachpegel in dB(A)
entspannt	54
normal	60
angehoben	66
laut	72

Tabelle 1.3: Schalldruckpegel typischer Sprechweisen in 1 m Entfernung vom Sprechsignal [22].

umso lauter gesprochen werden muss, je lauter der Geräuschpegel ist.

Anhaltswerte für typische Schalldruckpegel verschiedener Sprechweisen in 1 m Abstand vom Sprecher sind in Tabelle 1.3 angegeben. Daraus ergibt sich auch, dass umso lauter gesprochen werden muss, je lauter der Geräuschpegel ist.

Nachhallzeit

Für eine gute Sprachverständlichkeit spielt auch die Nachhallzeit eine wichtige Rolle. Sie bezeichnet die Zeitspanne, in der der Schalldruckpegel in einem Raum nach Ende oder Abschalten einer Anregung um 60 dB abfällt [94]. Die Anregung kann z. B. ein über einen Lautsprecher wiedergegebenes Rauschsignal, aber auch ein plötzlicher lauter Knall sein.

Die Nachhallzeit hängt von zahlreichen Faktoren ab. Dazu gehören das Raumvolumen und die Raumform, aber auch die Beschaffenheit der schallabsorbierenden und schallreflektierenden Oberflächen. Neben Boden, Wänden und Decke sind auch anwesende Personen und (Einrichtungs-)Gegenstände zu berücksichtigen.

Allgemein lässt sich sagen, dass die Akustik bei kurzem Nachhall eher trocken wirkt und der Schall schnell abklingt. Bei längerem Nachhall hingegen werden die Signale stärker verwaschen und der Raum klingt insgesamt halliger. Dadurch dauert es länger, bis ein Schallergebnis wieder abklingt. Die Nachhallzeit sollte bei der Planung und Auslegung von Räumen und deren Ausgestaltung daher



immer mitberücksichtigt und auf den jeweiligen Raum und die individuelle Nutzung abgestimmt werden. Entsprechende Maßnahmen werden in Abschnitt 2.2 diskutiert.

Nachhallzeiten können **messtechnisch bestimmt** oder bei Kenntnis des Raums und der umgebenden Flächen mithilfe von Tabellenwerken **rechnerisch abgeschätzt** werden. In beiden Fällen werden meist Frequenzen zwischen 125 und 4.000 Hz (vereinzelt auch 250 bis 2.000 Hz oder Erweiterung um 8.000 Hz) betrachtet, da dieser Bereich für die Sprache besonders wichtig ist. Günstig für die Sprachverständlichkeit kann es auch sein, wenn die Nachhallzeit für alle betrachteten Frequenzen in diesem Bereich relativ ähnlich ist, wobei bei 125 Hz und tieferen Frequenzen ein moderater Anstieg der Nachhallzeit toleriert wird (siehe auch Toleranzbereich nach DIN 18041 in Abb. 4.28 auf Seite 97).

Die Anforderungen an die mittlere Nachhallzeit hängen nicht nur von der Raumgröße, sondern auch von der Nutzungsart (normale Anforderung an die Sprachverständlichkeit oder inklusive Nutzung) und dem Raumtyp ab. So wird für Musikräume ein längerer Nachhall empfohlen als für Klassenräume. In Klassenräumen gelten bei inklusiver Nutzung strengere Anforderungen, für die kürzere Nachhallzeiten gefordert werden.

Für ein übliches Raumvolumen von 200 m³ ergibt sich gerundet ein **Orientierungswert für die Nachhallzeit von ca. 0,5 s**. Diese Vorgaben beziehen sich auf einen Besetzungsgrad des Raums von 80 % der Regelbesetzung, wobei die zusätzliche absorbierende Wirkung von Personen in der Regel rechnerisch berücksichtigt wird (siehe

Stör-Schalldruck-pegel	Sprach-Störpegel-Abstand	mittlere Nachhallzeit
≤ 35 dB(A)	10 bis 15 dB(A)	ca. 0,5 s

Tabelle 1.4: Empfehlungen für weitgehend störungsfreie Sprachkommunikation.

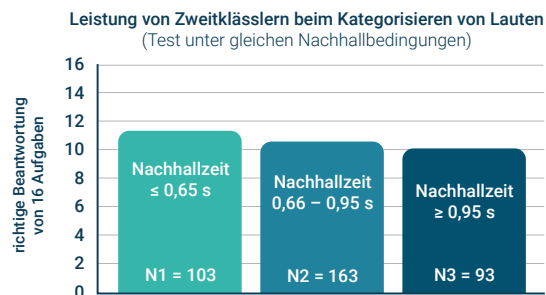


Abb. 1.8: Leistung von Zweitklässlern beim Kategorisieren von Lauten [40].

auch Tabelle A.1 in DIN 18041 [22]). Dabei ist nicht genau vorgegeben, ob mit der Regelbesetzung eine zum Zeitpunkt der Planung bzw. Auslegung angenommene maximale Besetzung gemeint ist oder ob es sich in der Praxis eher um die tatsächlich anzutreffende (aber möglicherweise zu dichte) Bestuhlung im Betrieb handelt. Tabelle 1.4 fasst die dargelegten Anforderungen zusammen.

Untersuchungen des Fraunhofer IBP [40] in mehr als 450 Klassenräumen mit teilweise zu langen Nachhallzeiten deuten gemäß Abb. 1.8 auf eine bessere Kategorisierung von Geräuschen mit sinkender Nachhallzeit hin. Akustische Maßnahmen zur Reduktion von zu hohen Nachhallzeiten sollte sich also positiv auf die Spracherfassung von Schülerinnen und Schülern auswirken.

Je nach Nutzungsart gelten unterschiedliche Anforderungen an die Nachhallzeit.

Lombard-Effekt

Wenn sich mehrere Personen gleichzeitig im Raum verständigen wollen, z. B. bei Gruppen- oder Partnerarbeit, müssen sie sich ausreichend von anderen Schallquellen bzw. vom Grundgeräuschpegel abheben. Dadurch erhöht sich der Grundgeräuschpegel. Bei ungünstiger Raumakustik und ungünstigem Nachhall wird dieser Effekt verstärkt, was wiederum dazu führt, dass schlechter verstanden und lauter gesprochen wird. Dieses Phänomen wird **Lombard-Effekt** genannt. Durch diese Ursache-Wirkung-Spirale kann der Geräuschpegel bis zur Größenordnung von 10 dB(A) ansteigen [61]. Die Stimmbelastung nimmt zu.

Status Quo

In einer 2019 von der Heinz Trox Wissenschafts gGmbH durchgeführten Feldstudie mit vereinfachten raumakustischen Messungen in Aachen und Neukirchen-Vluyn erfüllte nur knapp jeder fünfte der 55 untersuchten Klassenräume die Anforderungen für inklusiven bzw. Fremdsprachenunterricht [13]. Selbst im auf einen Besetzungsgrad von 80 % der Regelbesetzung umgerechneten Raumzustand überschritten die Nachhallzeiten die Sollwerte teilweise um mehr als das Doppelte. Während viele Räume über die betrachteten Frequenzen recht gleichmäßige Nachhallzeiten aufwiesen und die inklusiven Anforderungen im Mittel nur knapp verfehlten, lagen die Probleme bei den schallhärteren Räumen häufig eher bei tieferen Frequenzen.

Viele Klassenräume haben große Defizite in der Raumakustik.

Im Rahmen von Messungen am Nachmittag und im unbesetzten Raum wurde zudem festgestellt, dass die bauseitigen und betriebsbedingten Hintergrundgeräuschpegel in einigen Räumen so weit erhöht waren, dass für das Einhalten eines hinreichend großen Signal-Rausch-Abstands von 15 oder besser 20 dB bereits eine angehobene Sprechweise nötig wäre (vgl. Tabelle 1.3 auf Seite 24). Akustische Maßnahmen sollten daher nicht nur die Nachhallzeit, sondern auch Hintergrundgeräusche berücksichtigen und angemessene Signal-Rausch-Abstände ermöglichen.

Zahlreiche Ergebnisse weiterer Studien fasst z. B. der Forschungsbericht „Lärm in der schulischen Umwelt und kognitive Leistungen bei Grundschulkindern“ [53] zusammen.

1.4 Beleuchtung

Bedeutung von (Tages-)Licht für die Lern- und Leistungsfähigkeit

Tageslicht hat einen wesentlichen Einfluss auf unser zentrales Nervensystem. Besonders wichtig für unseren Biorhythmus ist die Zeitgeberfunktion des Lichts. Der so genannte zirkadiane Rhythmus regelt beispielsweise unser Wachheits- und Müdigkeitsempfinden im 24-Stunden-Zyklus [59]. Licht beeinflusst dabei nicht nur Wachsamkeit, Aufmerksamkeitsvermögen und den Nachtschlaf, sondern wirkt auch stimmungsaufhellend, da es die Ausschüttung des Hormons Serotonin fördert [16].

Serotonin

Serotonin ist ein Botenstoff (Neurotransmitter), der häufig auch als „Glückshormon“ bezeichnet wird. Er spielt eine entscheidende Rolle in unserem Nervensystem und beeinflusst Stimmung, Schlaf, Appetit und Wohlbefinden.

Studien weisen auf die positiven Auswirkungen von Tageslicht auf die Leistungen von Schülerinnen und Schülern hin. So konnten Baloch et al. (2021) in Studien mit 2.670 Schülerinnen und Schülern an 53 Schulen in über 12 europäischen Ländern einen Zusammenhang zwischen der Verfügbarkeit von Tageslicht und besseren Ergebnissen in Mathematik- und Logiktests nachweisen [7].

Ähnlich dokumentierten Heschong et al. (2013) in Untersuchungen in drei Schulbezirken mit jeweils ca. 6.000 bis 8.000 Schülerinnen und Schülern bessere Schulleistungen bei erhöhter Tageslichtverfügbarkeit [45].

Zirkadianer Rhythmus

Der zirkadiane Rhythmus ist ein etwa 24-stündiger Biorhythmus, dem unser Schlaf-Wach-Zyklus und weitere Körperfunktionen unterliegen. Er wird durch unsere innere biologische Uhr bestimmt: Das Tageslicht ist ihr natürlicher Taktgeber. Tageslichtmangel und zeitliche Verschiebungen der Lichtexposition können die innere Uhr aus dem Takt bringen und z. B. Schlafstörungen verursachen.

Slegers et al. (2013) wiesen in einer Studie mit 181 Grundschulkindern einen positiven Effekt von Tageslicht auf das Konzentrationsvermögen nach [75].

Licht ist also nicht nur für das Sehen wichtig, sondern auch für Stimmung, Konzentration und Leistungsfähigkeit.

Tageslicht ist wichtig für unseren Biorhythmus und für das Lernen und Arbeiten.

Anforderungen an Tageslichtverfügbarkeit und künstliche Beleuchtung

Um ein Mindestmaß an Tageslichtversorgung in Innenräumen zu gewährleisten, sollte in der Hälfte eines Raums auf einer Arbeitsflächenhöhe von 0,85 m in der Hälfte der Tageslichtstunden eines Jahres eine horizontale Beleuchtungsstärke von mindestens 300 lx erreicht werden. Gleichzeitig sollte in mindestens 95 % des Raums eine Beleuchtungsstärke von 100 lx eingehalten werden [28]. Diese Anforderung vermeidet unzureichend mit Tageslicht versorgte Raumbereiche, z. B. bei zu großen Raumbereichen.



Mindestens in der Hälfte der Tageslichtstunden sollte wenigstens die Hälfte des Raums mit Tageslicht von mindestens 300 lx ausgeleuchtet sein. Besser sind höhere Werte.

Empfehlungsstufen für vertikale und geneigte Tageslichtöffnungen	gering	mittel	hoch
Ziel-Beleuchtungsstärke für 50 % der Tageslichtstunden und einem Raumanteil von 50 %	300 lx	500 lx	750 lx
Mindestziel-Beleuchtungsstärke für 50 % der Tageslichtstunden und einem Raumanteil von 95 %	100 lx	300 lx	500 lx
Ziel-Tageslichtquotient bei einem Median äußerer diffuser Beleuchtungsstärke von 13.900 lx (17.100 lx bei lichtstreuenden Verglasungen) für Berlin für einen Raumanteil von 50 %	2,2 %	3,6 %	5,4 %
Mindestziel-Tageslichtquotient bei einem Median äußerer diffuser Beleuchtungsstärke von 13.900 lx (17.100 lx bei lichtstreuenden Verglasungen) für Berlin für einen Raumanteil von 95 %	0,7 %	2,2 %	3,6 %

Tabelle 1.5: Empfehlungsstufen für die Tageslichtverfügbarkeit durch vertikale und geneigte Tageslichtöffnungen nach Beleuchtungsstärke und Tageslichtquotient (zusammengefasst aus DIN EN 17037, Anhang A, Tabelle A.1, A.3, A.4 [28]).

fen. Die genannten Anforderungen sind der Empfehlungsstufe „gering“ zugeordnet, die in Anlehnung an die Studien von Heschong et al. (2012) entwickelt wurden und die Schwellenwerte zur Sicherung des menschlichen Wohlbefindens festlegen. In der höchsten Stufe wären es zwischen 750 und 500 lx [44].

Lichtstreuende Verglasung

Eine lichtstreuende Verglasung verteilt das transmittierte Licht nahezu ungeachtet der Winkelverteilung des einfallenden Lichts gleichmäßig. Das Verhältnis zwischen der inneren und äußeren Beleuchtungsstärke bleibt ungeachtet der Sonnen- und Himmelsbedingungen relativ konstant (DIN EN 17037:2022-05, Anh. A, S.18 – zu Tabelle 1.5)

Tabelle 1.5 zeigt die Beleuchtungsstärken für geringe, mittlere und hohe Empfehlungsstufen. Deren Berechnung kann auf zwei Arten erfolgen: Eine Möglichkeit sind umfassende Ganzjahressimulationen zur Berechnung der Beleuchtungsstärken im Innenraum unter Verwendung stündlicher oder feiner aufgelöster Klimadaten. Die andere, einfachere Möglichkeit ist die Berechnung des Tageslichtquotienten anhand des Medians der diffusen Beleuchtungsstärke des Himmels über die Hälfte der jährlichen Tageslichtstunden. Dieser Median und die Ziel-Tageslichtquotienten variieren je nach Standort und sind in der Norm für verschiedene Standorte vorgegeben [28].

Die europäische Norm DIN EN 12464-1 für die Beleuchtung von Arbeitsstätten [24] legt Mindestwerte für die Erfüllung von Sehaufl-

Maßeinheit für die Beleuchtungsstärke

Ein Lux (lx) ist die Maßeinheit für die Beleuchtungsstärke bzw. Helligkeit von Licht. Sie entspricht einem Lumen pro Quadratmeter (lm/m^2). Je höher der Wert, desto heller ist die Beleuchtung.

gaben fest. So sind in Klassenräumen 500 lx in Schreibtischhöhe durch künstliche Beleuchtung zu gewährleisten [24]. In Klassenräumen mit Kleinkindern sind auch 300 lx durch Dimmen zulässig. Die Norm unterscheidet sich in ihrer Vorgabe von dem Mindestwert in der ASR A 3.4 „Beleuchtung und Sichtverbindung“ [91], welcher 300 lx vorgibt. Wir empfehlen den Mindestwert aus der Norm. Die Bereitstellung einer ausreichenden Beleuchtungsstärke allein genügt jedoch nicht, um gute Sehbedingungen zu schaffen.

Neben der Beleuchtungsstärke enthält die genannte Norm auch Grenzwerte für die empfohlene Gleichmäßigkeit, Schattigkeit (Modelling), Farbwiedergabe, spektrale Verteilung und Lichtfarbe der Beleuchtung.

Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient gibt an, wie viel Prozent des im Freien verfügbaren Tageslichts in einem Punkt im Innenraum ankommt. Genauer gesagt beschreibt er das Verhältnis zwischen Beleuchtungsstärke an einem Punkt im Innenraum und der horizontalen Beleuchtungsstärke im Freien, die für einen bedeckten Himmel berechnet wird.

Schattigkeit

Die Schattigkeit (Modelling) ist als Verhältnis der zylindrischen Beleuchtungsstärke zur horizontalen Beleuchtungsstärke an einem Punkt definiert. Die zylindrische Beleuchtungsstärke errechnet sich dabei als Mittelwert der vertikalen Beleuchtungsstärke auf einer Zylinderoberfläche. Bei gleichmäßiger Anordnung von Leuchten wird allgemein eine Schattigkeit zwischen 0,3 und 0,6 empfohlen. Die Schattigkeit beschreibt die plastische Wahrnehmung. Ein zu geringer Wert deutet auf stark ausgeprägte Schatten hin, während ein hoher Wert auf eine Überbelichtung hinweist.

Die Gleichmäßigkeit beschreibt den Quotienten aus minimaler und mittlerer Beleuchtungsstärke und gibt damit an, wie gleichmäßig sich Licht in einem bestimmten Raum oder Bereich verteilt. In Klassenräumen sollte eine Gleichmäßigkeit von 0,6 nicht unterschritten werden.

Die Farbwiedergabe gibt an, wie „natürlich“ die Farbe eines Objektes bei einer gegebenen Lichtquelle wiedergegeben werden kann. In Klassenräumen sollte ein Mindestwert für den Farbwiedergabeindex von $R_a \geq 80$ gewährleistet sein [24], wobei $R_a \geq 80$ eine „gute“ und $R_a \geq 90$ eine „sehr gute“ Farbwiedergabe kennzeichnet [29].

Der R_a -Wert beschreibt auch die Farbwiedergabe von Verglasung. Ein R_a von 100 bedeutet, dass alle Farbfrequenzen durch die Verglasung durchgelassen werden und somit die Lichtfarbe vor und hinter dem Glas gleich bleibt.

Nicht nur die Menge des Lichts ist wichtig, sondern auch sein Farbspektrum und die Lichtverteilung im Raum.



Farbwiedergabeindex Ra

Der CRI (Color Rendering Index) oder „Ra“ einer Lichtquelle ist ein Maß dafür, wie gut Farben im Vergleich zu Tageslichtverhältnissen wiedergegeben werden. Der CRI wird auf einer Skala von 0 bis 100 angegeben, wobei höhere Werte eine bessere Farbwiedergabe bedeuten. Ein Ra von 100 entspricht der „natürlichen“ Farbwiedergabe bei Tageslicht.

ben“) im Licht an. Die spektrale Zusammensetzung wird durch die Lichtquelle und die Reflexion (an farbigen Oberflächen) im Raum beeinflusst. Sie hat Auswirkungen auf den zirkadianen Rhythmus [24] und wird üblicherweise als Kurve dargestellt (siehe Abb. 1.9). Diese Kurve kann sich gleichmäßig über viele Wellenlängen erstrecken (wie bei Tageslicht), oder sich auf einzelne Wellenlängen konzentrieren. Lichtquellen mit demselben visuellen Eindruck kann eine unterschiedliche Spektralverteilung zugrunde liegen.

Spektralverteilung

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Spektralverteilung des Lichts. Sie gibt den Anteil unterschiedlicher Wellenlängen („Spektralfar-

Studien weisen darauf hin, dass das Photopigment Melanopsin, das die Unterdrückung von Melatonin vermittelt und Wachsamkeit stimuliert, am empfindlichsten bei kurzen Wellenlängen zwischen 460 nm und 500 nm

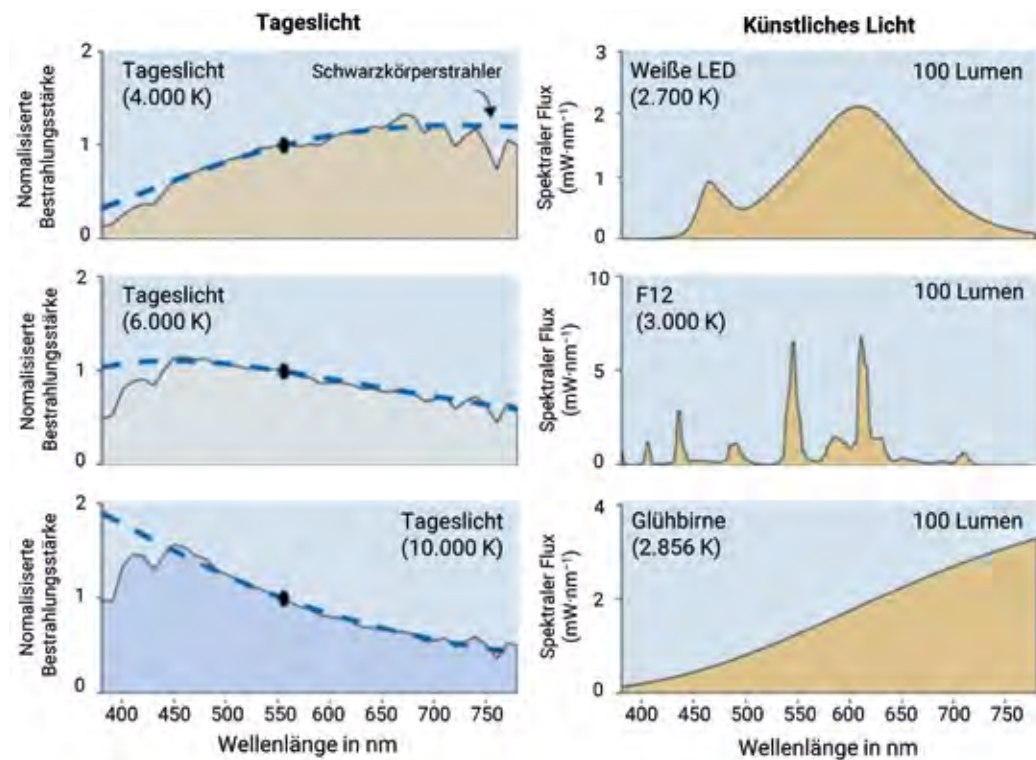


Abb. 1.9: Die Abbildung zeigt die spektrale Zusammensetzung von a) Tageslicht bei unterschiedlichen Farbtemperaturen, und b) einer LED (oben), einer fluoreszierenden Lichtquelle (Mitte) und einer Glühlampe (unten), normalisiert auf 100 Lumen, alle mit einer ähnlichen Farbtemperatur und visuellem Eindruck trotz unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung (eigene übersetzte Darstellung in Anlehnung an [10]).

ist. Das entspricht dem blauen bis blaugrünen Farbbereich [10].

Melatonin und Melanopsin

Das Hormon Melatonin wird von der Zirbeldrüse im Gehirn produziert. Es spielt eine zentrale Rolle für den zirkadianen Rhythmus und fördert die Schläfrigkeit. Insbesondere kurzwelliges (blaues) Licht unterdrückt seine Ausschüttung. Das Photopigment Melanopsin in der Retina spielt dabei eine Schlüsselrolle bei der Signalübertragung zur Zirbeldrüse im Gehirn und um die Melatoninproduktion zu regulieren.

Frühere Studien haben allerdings auch auf mögliche Schäden bei intensiver Exposition hingewiesen: z. B. trockene Augen, grauer Star und eine Beeinträchtigung der Schlafqualität [108]. Für „blaulastige“ LEDs wird deshalb mitunter empfohlen, dass die Spitze der spektralen Verteilung möglichst oberhalb von 450 nm liegen sollte [97]. Inzwischen hat sich allerdings gezeigt, dass dies bei der alltäglichen Verwendung marktüblicher Leuchten keine bedeutende Rolle spielt.

Die Spektralverteilung einer Lichtquelle beeinflusst auch deren visuellen Eindruck: Diese Lichtfarbe wird über die Farbtemperatur in Kelvin (K) quantifiziert. Niedrige Farbtemperaturen (z. B. um 2.700 K) beschreiben eine warme, rötliche Lichtfarbe, während hohe Farbtemperaturen (z. B. über 4.000 K) kühle, bläuliche Lichtfarben bedeuten. Diese Lichtfarben bestimmen die Lichtstimmung und können von Personen unterschiedlich

empfunden werden. So wird warmweißes Licht (bis 3.300 K) häufig als behaglich, und neutralweißes Licht (3.300 bis 5.300 K) als sachlich empfunden [55]. Die Empfindung entspricht der Bewertung in Mitteleuropa. Dagegen wird in südeuropäischen Ländern mit mehr Sonne häufig tageslichtweißes Licht bevorzugt (über 5.300 K).

Die DIN EN 12464-1 gibt keine Empfehlung für die Farbtemperatur. Im Anhang der Norm wird auf die spektrale Zusammensetzung des Lichts und den Zusammenhang mit der zirkadianen Wirkung eingegangen. Die DIN/TS 67600 (Anh. A) empfiehlt dagegen Farbtemperaturen ≥ 5.000 K für konzentriertes, kognitives Arbeiten und Farbtemperaturen ≤ 3000 K für entspannte Lernatmosphären, z. B. bei Gruppenunterricht oder Gruppenarbeit.

Abschnitt „2.3 Beleuchtung“ auf Seite 58 unter „Human Centric Lighting“ erläutert, wie die Spektralverteilung und Lichtfarbe in einem Beleuchtungskonzept eingesetzt werden können, um den zirkadianen Rhythmus zu fördern und zu unterstützen.

Visueller Komfort und Blendungsgefahr

Um Sehkomfort zu gewährleisten und Risiken durch Blendung zu minimieren, spielen die Lichtmenge und der Strahlungswinkel eine entscheidende Rolle. Blendung kann durch einen ungünstigen Strahlungswinkel direkt ins Auge (Direktblendung) oder indirekt durch starke Reflexionen (Reflexblendung, z. B. weißes Papier bei Tageslicht) verursacht werden.



Für künstliche Beleuchtung legt die DIN EN 12464-1 spezifische Anforderungen für Leuchten fest, um Direktblendung am Schreibtisch oder Arbeitsplatz zu vermindern. Danach dürfen Leuchten in Klassenräumen einen vorgeschriebenen R_{UG} -Grenzwert (R_{UGL} , Wert der vereinheitlichten Blendungsbegrenzung) von 19 nicht überschreiten. Ein R_{UGL} von 19 sagt aus, dass sich etwa 65 % der Beobachter durch eine Blendung „gerade nicht gestört“ fühlen [24]. Leuchtenhersteller geben den Wert der vereinheitlichten Blendungsbewertung R_{UGR} an. Decken- und Pendelleuchten, die von Herstellern speziell für Schreibtisch- und Büroarbeit ausgeschrieben werden, erfüllen diese Anforderung in der Regel. Ansonsten sind sie mit Entblendung und einem $R_{UGR} < 16$ ausgeschrieben.

R_{UGR} und R_{UGL}

R_{UGR} (Unified Glare Rating) ist ein Maß zur Bewertung von Blendung durch Leuchten. Der R_{UG} -Grenzwert, kurz R_{UGL} (Unified Glare Rating Limit), legt die zulässigen Werte fest, die eingehalten werden müssen. Die Skala der Grenzwerte umfasst 16, 19, 22, 25, und 28. Ein niedriger Wert steht für eine „geringe Wahrscheinlichkeit von psychologischer Blendung“, ein hoher Wert für eine „hohe Wahrscheinlichkeit von psychologischer Blendung“ (wie zitiert in [24]).

Im Tageslichtbereich kann eine Bewertung der Blendung (für Direkt- und Reflexblendung) in Räumen mit vertikalen oder geneigten Tageslichtöffnungen mit Hilfe der Daylight Glare Probability (DGP) erfolgen, die in der DIN EN 14501 [26] und in Anhang E der EN 17037 [28] beschrieben ist. Die Daylight Glare Probability (DGP) gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der eine Blendung als wahrnehmbar, störend oder unerträglich empfunden wird. Ein DGP größer als 0,45 zeigt an, dass die Blendung wahrnehmbar und überwiegend unerträglich ist. Für den Blendschutz wird empfohlen, dass ein DGP von 0,45 nicht mehr als 5 % der Nutzungszeit überschritten wird.

In Abschnitt „2.3 Beleuchtung“ werden praktische Empfehlungen zur Auswahl des Sonnenschutzes gegeben.



TEIL 1

Einflussfaktoren auf die Lernumgebung

ESSENZ
für Eilige

- ✓ Für eine gesunde und förderliche Lern- und Arbeitsumgebung müssen alle Raumfaktoren – **Luft, Licht, Akustik und das Raumklima** – stimmen.
- ✓ Beim **Klassenraum-Check** geben verschiedene **Messwerte** Orientierung:
 - Raumklima: Liegen die Temperaturen im meist zwischen 20–26 °C?
 - Akustik: Ist der Dauerschalldruckpegel unter 35 dB(A) und die Nachhallzeit etwa eine halbe Sekunde lang?
 - Luft: Bleibt der CO₂-Gehalt im Mittel über eine Unterrichtsstunde unter 1.000 ppm?
 - Licht: Ist wenigstens die Hälfte des Raums durch Tageslicht von mindestens 300 lx ausgeleuchtet?
- ✓ Weitere **individuelle Faktoren** beeinflussen das Innenraumklima: Dazu gehören z. B. Lärm und Luftverschmutzung von außen, die individuelle Einrichtung und verwendete Materialien, die Gebäudearchitektur und vorhandene Technik.





Teil 2 – Allgemeine Lösungsansätze

2.1 Luftqualität und Raumklima

2.2 Akustik

2.3 Beleuchtung

Wie sehen gute Raumlösungen aus? Neben modernen Lüftungskonzepten gehören dazu akustische Maßnahmen zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit sowie zeitgemäße Konzepte zur Beleuchtung von Klassenräumen. Diese werden im Hinblick auf ihre praktische Umsetzbarkeit verglichen.

2.1 Luftqualität und Raumklima

Gängige Lüftungskonzepte in Schulen

Bei natürlicher oder freier Lüftung findet der Luftaustausch ohne die Unterstützung von Ventilatoren statt. Maschinelle Systeme können zusätzlich unterstützen.

Ein Großteil der Klassenräume in Deutschland wird durch **manuelles Öffnen der Fenster** belüftet. Doch auch **maschinelle Lüftungsgeräte** halten sukzessive Einzug in Schulgebäude. Im Bestand handelt es sich meist um nachgerüstete dezentrale Lüftungsgeräte, während bei Neubauten häufiger auch zentrale Lösungen zum Einsatz kommen.

Bei der **Hybridlüftung** werden unterstützende Grundlüftungssysteme eingesetzt, die je nach System kontinuierlich, sensorgeführt oder zeitgesteuert automatisch die Fenster öffnen, einen unterstützenden (Außen-) Luftvolumenstrom bereitstellen oder einen Abluftvolumenstrom absaugen. Eine tabellarische Übersicht verschiedener Systeme gibt der Status-Report 22 des FGK (Fachverband Gebäude-Klima e. V.) zur „Lüftung von Schulen“.



Abb. 2.1: Bei geöffneten Fenstern haben die Temperaturdifferenz zwischen außen und innen, vorherrschende Windgeschwindigkeiten sowie die Windrichtung Einfluss auf den Lüftungseffekt. Auf eine steuerbare maschinelle Ventilation wird vollkommen verzichtet (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]).

Natürliche Lüftung als „No-Tech“-Lösung

Bei der natürlichen oder freien Lüftung erfolgt der Luftaustausch ohne Unterstützung durch Ventilatoren (siehe Abb. 2.1). Angetrieben durch Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenluft und durch windbedingte Druckunterschiede wird die Luft im Raum über Fenster, Luftdurchlässe und Undichtigkeiten ausgetauscht. Dazu gehören die Fensterlüftung, die Schachtlüftung und die Querlüftung [25].

Arten der Fensterlüftung

Bei der **Fensterlüftung** erfolgt die freie Lüftung durch das Öffnen oder Kippen eines oder mehrerer Fenster.

Unter **Querlüftung** versteht man die freie Lüftung infolge der Druckdifferenz, die durch den Winddruck auf die Gebäudeaußenflächen entsteht.

Fensterlüftung und Lüftungsempfehlungen

In natürlich belüfteten Klassenräumen kann regelmäßiges Stoß- und Querlüften Außenluft zuführen und die CO₂-Konzentration und Schadstoffbelastung im Klassenraum verringern. Die Effektivität des Luftaustauschs und damit die erforderliche Lüftungsdauer hängt u. a. von der Anzahl der geöffneten Fenster, der Windgeschwindigkeit- und -richtung sowie der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft ab.

Es ist zu beachten, dass bei reiner Fensterlüftung keine definierten thermischen Raumkonditionen eingestellt werden können und bei geöffneten Fenstern Lärm von außen

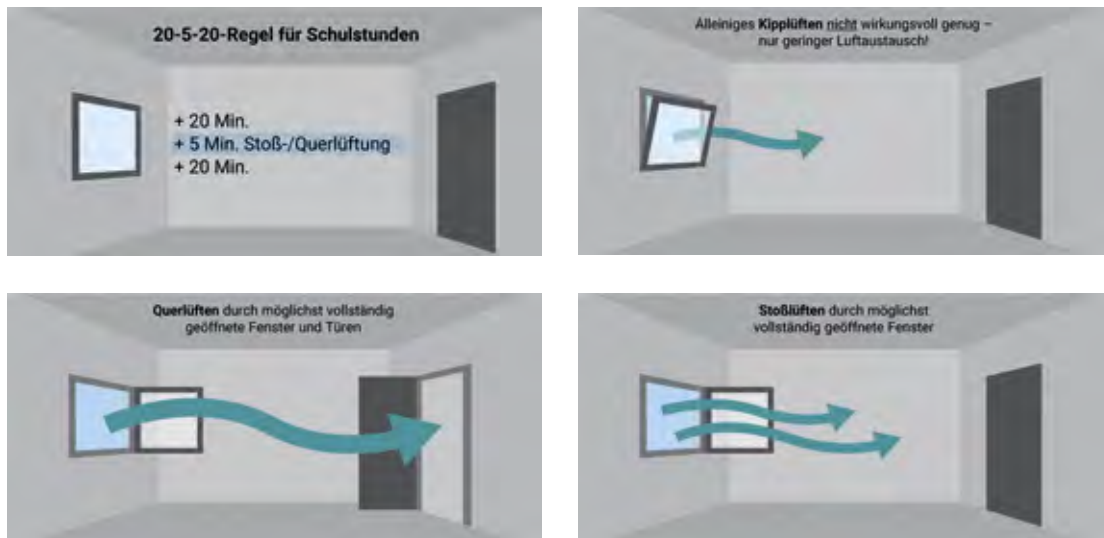


Abb. 2.2: Lüftungsempfehlungen des Umweltbundesamtes [100] sowie unterschiedliche Arten der manuellen Fensterlüftung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bildungsportal Niedersachsen [8]).

eindringen kann. Auch ist keine Wärmerückgewinnung möglich, so dass vor allem im Winter mit Energieverlusten und erhöhtem Heizbedarf zu rechnen ist, da die erwärmte Raumluft durch kalte Zuluft ersetzt wird. Häufig öffnen Fenster auch in den Aufenthalts- oder Sitzbereich, was zu einer Beeinträchtigung der Anwesenden und zu einer Verletzungsgefahr führen kann.

Unter **Stoßlüftung** versteht man gemäß ASR A3.6 „Lüftung“ [93] den „kurzzeitigen (ca. 3 bis 10 Minuten), intensiven Luftaustausch zur Beseitigung von Lasten aus Arbeitsräumen“. Dabei sollte die empfohlene Mindestdauer aufgrund der oben genannten Einflussfaktoren abhängig von der Jahreszeit gemäß Tabelle 2.1 gewählt werden.

Bei der **Querlüftung** werden gegenüberliegende Fenster oder Türen weit geöffnet. Je nach räumlichen Gegebenheiten sollten auch die Klassenraumtüren sowie Fenster und Türen im Flur oder in gegenüberliegenden Räumen geöffnet werden. Wie bei der reinen

Fensterlüftung sind möglichst große Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Raumluft erforderlich, um einen hohen Luftaustausch zu gewährleisten. Durch Querlüftung wird in der Regel ein höherer Luftwechsel erreicht als bei einseitiger Fensterlüftung. Bei ausreichend großem Verhältnis von Fenster zu Fassadenfläche und günstigen Außenbedingungen (z. B. Winddruck) kann sich bei Querlüftung eine Verdrängungsströmung im Raum ausbilden (siehe Abb. 2.8).

Nach einer Handreichung des Umweltbundesamts (UBA) sollte die Frischluftzufuhr

Die „20-5-20“-Regel“ trainiert das richtige Lüftungsverhalten bei Fensterlüftung. Im Winter funktioniert sie allerdings nur als Kompromiss.

Jahreszeit	Empfohlene Dauer der Stoßlüftung
Sommer	bis zu 10 min (unter Berücksichtigung der Außenlufttemperatur)
Frühling/Herbst	5 min
Winter	3 min

Tabelle 2.1: Empfohlene Lüftungsdauer bei Stoßlüftung nach Jahreszeit [93].

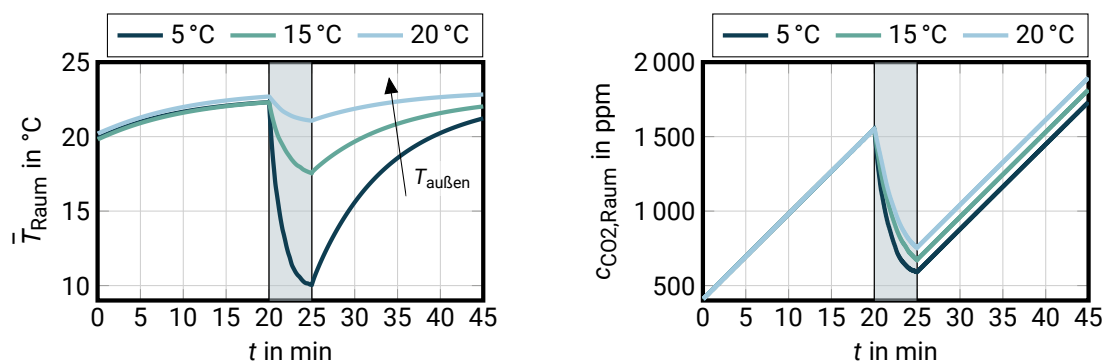


Abb. 2.3: Zeitlicher Verlauf der mittleren Raumtemperatur (links) und der mittleren CO₂-Konzentration (rechts) während einer Schulstunde für drei Außenlufttemperaturen [65].

durch Fensterlüftung erfolgen, sofern keine anderen technischen Maßnahmen umsetzbar sind. Dann sieht die „20-5-20“-Regel [100] vor, dass in einer 45-minütigen Schulstunde alle Fenster nach 20 Minuten für die Dauer von 5 Minuten vollständig geöffnet werden. Nach der Lüftungsphase können die Fenster für die folgenden 20 Minuten geschlossen bleiben (siehe Abb. 2.2).

Ergebnisse einer Simulationsstudie

Die Ergebnisse einer Strömungssimulationsstudie [65] der RWTH Aachen zur „20-5-20“-Regel [100] mit 28 Schülerinnen und Schülern und einer Lehrkraft bestätigen, dass bei Fensterlüftung bei niedrigeren Außenlufttemperaturen deutlich mehr Außenluft in den Raum gelangt und die CO₂-Konzentration stärker abnimmt als bei wärmeren Umgebungsbedingungen. Dabei sinkt die mittlere Raumtemperatur schnell. Auch wenn sie nach dem Schließen der Fenster schnell wieder ansteigt, kann eine Mindesttemperatur von 19 bzw. 20 °C (siehe Abschnitt „Temperatur“ auf Seite 17) bei niedrigen Außenlufttemperaturen nicht zu jeder Zeit eingehalten werden und wäre daher eigentlich nicht zulässig.

Dennoch sollte auf striktes Einhalten dieser Untergrenze auf Kosten der Luftqualität nicht beharrt werden – insbesondere dann nicht, wenn keine andere Möglichkeit für einen kurzfristigen und effizienten Luftaustausch besteht. Vielmehr sollte ein Kompromiss zwischen kurzzeitiger Unterschreitung des Temperaturrichtwertes und besserer Luftqualität gefunden werden (siehe Abb. 2.3). Zudem zeigen einige Studien positive gesundheitliche Effekte bei zeitweisem Aufenthalt in zu kalten Räumen [43][66][103].

Hybride Lüftung als „Low-Tech“-Lösung

Bei hybrider Lüftung wird die natürliche bzw. manuelle Fensterlüftung maschinell unterstützt. Dies kann durch ein automatisiertes Fensterlüftungskonzept mit elektrischen Stellantrieben oder durch den Einsatz von ventilatorgestützten Zu- und Abluftsystemen wie in Abb. 2.4 erfolgen. Für letzteres kann es im Rahmen einer Sanierung erforderlich sein, eine Kernbohrung durch die Fassade durchzuführen oder ein Fenster bzw. Oberlicht durch eine Blende (Isopaneel) auszutauschen, um die Anbindung an die Außenluft zu ermöglichen.

Entsprechende hybride Lüftungssysteme beseitigen zwar nicht alle potenziellen Probleme der Fensterlüftung, wie den Eintrag von Lärm und Pollen aus der Umgebung, sind aber in der Regel kleiner, preiswerter und weniger aufwändig zu installieren als (de-)zentrale Lüftungsgeräte. Hybridlüftung kann daher im Einzelfall eine sinnvolle Lösung sein und unter bestimmten Randbedingungen zur Verbesserung der Luftqualität beitragen. Es bleibt jedoch zu beachten, dass entsprechende Systeme zwar die Luftwechselrate erhöhen und die notwendigen Intervalle einer konsequenten Stoßlüftung verlängern, aber die Fensterlüftung nicht vollständig ersetzen können, so dass eine Abhängigkeit von günstigen Außenbedingungen bestehen bleibt.

Erfahrungen einer Feldstudie

Im Rahmen einer Feldstudie [87] des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen der RWTH Aachen mit Messreihen im Winter und Frühjahr wurde in einem Klassenraum exemplarisch ein Abluftventilator mit einem maximalen Volumenstrom von etwa $350 \text{ m}^3/\text{h}$ installiert. Die Raumluft wurde über einen Lüftungskanal im Deckenbereich der Klassenmitte abgesaugt und durch ein ausgebautes Oberlicht nach außen geleitet (siehe [87]). Dabei sollte bewusst eine vergleichsweise günstige und schnelle Lüftungslösung untersucht werden.

Die Auswertung der CO_2 -Konzentrationen zeigte eine Abnahme der mittleren sowie der maximal auftretenden Konzentration. Aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit des Geräts musste jedoch weiterhin zusätzlich über Fenster gelüftet werden. Der Einsatz entsprechender Geräte ist daher als unterstützende Maßnahme einzustufen.



Abb. 2.4: Ein Abluftventilator kann die Nachströmung der Außenluft durch gekippte Fenster unterstützen. Ist die eintretende Luft kühler als die Raumluft, entsteht eine aufsteigende Verdrängung der Raumluft, die der Ventilator im oberen Raumbereich absaugt (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]).

Ein Vorteil dieser Lösung ist, dass sie kostengünstig ist. Sie kann daher die Auswahl an unterstützenden Maßnahmen erweitern und Lehrkräfte und die Klasse zumindest teilweise entlasten, da der Luftaustausch nicht allein durch manuelle Fensteröffnung bewerkstelligt werden muss. Sie funktioniert allerdings nur, wenn die Luft auf kurzem Wege abgeführt werden kann. Bei Räumen ohne Außenwände im Gebäudeinneren ist der Bau von Lüftungskanälen meist zu aufwändig. Außerdem wurde in der durchgeführten Studie keine Wärmerückgewinnung umgesetzt.

Eine weitere Bedingung: Der Flur, aus dem die Luft angesogen wird, muss über eine Überströmöffnung oder einen zusätzlichen Durchlass Luft bereitstellen. Bei geschlossenen Fenstern kann ein Unterdruck entstehen, der das Öffnen von Türen erschwert. Im konkreten Fall wurde dieses Problem aufgrund der geringen Leistung des Geräts und der durchlässigen Türen im Gebäude nicht gemeldet.



Maschinelle Lüftungssysteme können je nach Ausstattung Temperatur und Volumenströme regeln, Wärme rückgewinnen oder oder sogar aktiv kühlen.

Maschinelle Lüftung als eine weitere „Low-Tech“-Lösung

Neben der natürlichen Lüftung über Fenster oder der hybriden Lüftung ist ein kontrollierter Luftwechsel über eine maschinelle Lüftung möglich. Diese Form der Belüftung ist unabhängig von äußeren Randbedingungen und erlaubt die Regelung des zugeführten Volumenstroms.

Häufig wird der Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration geregelt (manchmal auch abhängig von der VOC-Konzentration, siehe Infobox zu „CO₂, eCO₂ und TVOC“ auf Seite 14). Diese wird in der Abluft oder mit einem zusätzlichen Raumsensor gemessen. Auch das Ziel, eine bestimmte Raumtemperatur zu erreichen oder aufrechtzuerhalten, kann in die Regelung mit einfließen.

Viele Geräte bieten die Möglichkeit, Betriebszeiten voreinzustellen. Je nach Gerät und Ausstattung kann die automatische Regelung auch (zeitweise) manuell durch Bediengeräte überschrieben werden. Häufig sind verschiedene Betriebsarten wählbar, z. B.:

- **Klassenarbeits- oder Flüstermodus** mit zeitweise konstantem Volumenstrom, entweder um während der Stillarbeit für besonders viel Luftaustausch zu sorgen oder um ein häufiges Umschalten zwischen verschiedenen Volumenströmen bzw. Lüfterstufen zu vermeiden
- **Pausenlüftungs- bzw. Spülmodus**, der kurzzeitig mit einem sehr hohen Volumenstrom die Luft in möglichst kurzer Zeit erneuert und dessen Geräuschentwicklung bei laufendem Unterricht stören würde.

Zuluft, Umluft, Abluft, Fortluft ...

Bei maschineller Lüftung wird der Luftaustausch über elektrisch angetriebene Ventilatoren sichergestellt (Abb. 2.5). Dabei wird in der Regel **Außenluft** angesaugt, gefiltert, aufbereitet und als **Zuluft** in den Raum eingebracht. Gleichzeitig wird **Abluft** aus dem Raum abgesaugt, so dass sich kein nennenswerter Über- oder Unterdruck im Raum einstellt. Je nach Gerät kann dabei unter bestimmten Bedingungen eine Wärmerückgewinnung stattfinden (siehe Abschnitt zur „Wärmerückgewinnung (WRG) bei maschineller Lüftung“ auf Seite 49).

Wird ein Teil der Abluft statt an die Umgebung abzugeben umgelenkt, aufbereitet und zurück in den Raum geleitet, spricht man von **Umluft**. Der Umluftanteil ist abhängig von der Regelungsstrategie und dem Gerät und kann zwischen 0 und 100 % liegen. Während der Corona-Pandemie wurden Geräte teilweise mit dem größtmöglichen Außenluftanteil betrieben, um ein potenzielles Infektionsrisiko so weit wie möglich zu reduzieren. Allein aus energetischen Gesichtspunkten ist jedoch in vielen Fällen ein Umluftanteil sinnvoll. Der zurück an die Umgebung abgeführte Anteil der Abluft wird als **Fortluft** bezeichnet.

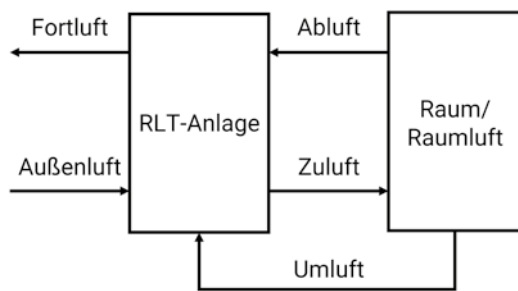


Abb. 2.5: Bezeichnungen der verschiedenen Luftarten nach DIN EN 16798-3 [27].

Zentrale und dezentrale Lüftungsgeräte

Bei der maschinellen Lüftung unterscheidet man zwischen zentralen und dezentralen Lüftungsgeräten.

Bei der **zentralen** Lüftung werden große Lüftungsanlagen eingesetzt, die über ein Kanalnetz mehrere Räume mit Frischluft versorgen. In zentralen Lüftungsgeräten können neben der Wärmerückgewinnung auch Heiz- und Kühlregister zur Temperierung der Luft verbaut werden. Da zentrale Lüftungsgeräte meist mehrere Räume versorgen, haben sie in der Regel einen größeren Platzbedarf und werden z. B. in Technikräumen oder auf dem Dach installiert. Für die Luftverteilung im Gebäude sind Luftkanäle nötig, die z. B. in abgehängten Decken oder auch frei sichtbar wie in Abb. 2.6 verlegt werden können. Zur bedarfsgerechten Belüftung der einzelnen Räume werden zusätzlich Regelklappen eingebaut, die den zugeführten Luftstrom raumweise einstellen.

Auch wenn Lüftungskanäle in Bestandsgebäuden manchmal nachgerüstet werden können, ist dies mit hohen Investitionen und Aufwand verbunden. Zentrale Lüftungen eignen sich daher vor allem für Neubauten (siehe auch Teil 5).

Für den nachträglichen Einbau und damit für die Sanierung im Bestand sind **dezentrale** Lüftungsgeräte in der Regel besser geeignet. Je nach Modell und Ausführung bieten sie die Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung, zum Heizen und teilweise sogar zum Kühlen der Luft. Dezentrale Lüftungsgeräte ermöglichen (ebenso wie zentrale Lüftungsgeräte mit Volumenstromreglern für die einzelnen Räume) eine anwesenheits- und bedarfsgerechte Regelung des Volumenstroms. Diese kann z. B. abhängig von der CO₂-Konzentration im Raum erfolgen. Weiterhin ist zu beachten, dass von den Ventilatoren Geräuschemissionen ausgehen, die im Betrieb den Unterricht nicht stören sollten. Daher ist bei der Produktauswahl besonders auf die Schallemission bei dem geforderten Volumenstrom zu achten.

Für eine dezentrale Lüftung gibt es eine Vielzahl verschiedener Gerätetypen in Bezug auf Installationsweise und Luftführung. Dazu gehören:

- Deckenlüftungsgeräte
- Stand- und Wandlüftungsgeräte (nach Misch- oder Quelllüftungsprinzip)
- Brüstungs- und Fassadenlüftungsgeräte
- Unterflurgeräte

Im Rahmen dieses Leitfadens wird in erster Linie auf Decken- und Standgeräte eingegangen, die bei typischen Randbedingungen bereits als Einzelgerät einen ausreichenden Volumenstrom bereitstellen können. Geräte zur **Deckeninstallation** haben den Vorteil, dass sie die Grund- bzw. Standfläche im Aufenthaltsbereich in häufig ohnehin sehr beengten Räumen nicht verringern. Meist handelt es

Dezentrale Lüftungsgeräte sind für den nachträglichen Einbau und die Sanierung oft besser geeignet als zentrale Lüftungsgeräte.



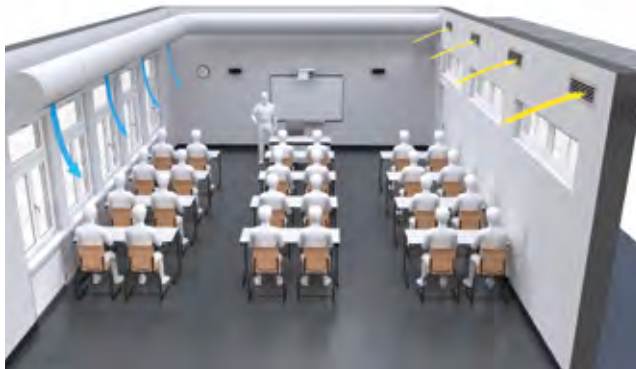


Abb. 2.6: Ein zentrales Lüftungsgesetz, in der Regel auf dem Gebäudedach oder im Untergeschoss, kann über ein Luftkanalnetz für den Luftaustausch (Zuluft und Abluft) mehrerer Räume sorgen. Aufgrund des hohen Installationsaufwands kommt diese Art eher in Neubauten zum Einsatz (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]).



Abb. 2.7: Dezentrale Lüftungsgesetze sind im Raum installiert. Sie versorgen den Raum mit Frischluft und führen die Abluft nach außen ab. In den Gesetzen sorgen Systeme zur Wärme-, Kälte- und Feuchtigkeitsrückgewinnung für einen nachhaltigen Betrieb (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]).

sich um Mischluftsysteme (siehe Abschnitt „Mischlüftung“ auf Seite 43), die die Zuluft unter Ausnutzung des sog. „Coandă-Effekt“ entlang der Gesetzeunterkante, einem Abströmblech oder einer (abgehängten System-)Decke ausblasen. Der Luftstrom bleibt an der Oberfläche haften und sinkt je nach eingebrachtem Impuls früher oder später in den Aufenthaltsbereich ab, von wo er als Walze zurück bis zur Abluftöffnung strömt.

Coandă-Effekt

Der Coandă-Effekt bezeichnet die 1910 von Henri Coandă entdeckte Eigenschaften von Fluiden, sich an konvexen oder ebenen Oberflächen anzulegen, statt von ihnen abzulösen. Im Kontext von Raumlüftströmungen und insbesondere beim Einbringen von Zuluft in den Raum ist dieses Phänomen von zentraler Bedeutung. Wird der Zuluftstrahl etwa parallel und mit geringem Abstand ($< 30 \text{ cm}$) zur Decke eingebracht, entsteht ein Unterdruck zwischen Begrenzungsfläche (z. B. Decke) und Zuluftstrahl. Dieser bewirkt eine Ablenkung des Strahls nach oben. Er bleibt an der Deckenunterseite „haften“ und seine Wurfweite erhöht sich. Folglich kann sich die Zuluft besser verteilen und fällt nur langsam und entsprechend zugfrei in den Raum ab. Ohne diesen Effekt würde der Luftstrahl je nach Lufttemperatur relativ schnell nach unten fallen und sich ungleichmäßig im Raum verteilen.

Standgeräte wie in Abb. 2.7 werden häufig in Wandnähe aufgestellt und arbeiten je nach Ausführung nach dem Mischluft- oder Quellluftprinzip (siehe nächster Abschnitt). Der Installationsaufwand ist ggf. geringer als bei einem Deckengerät, allerdings reduzieren Standgeräte die meist ohnehin sehr geringe Nutzfläche im Klassenraum. Dafür kann mit Gesetzen nach dem Quelllüftungsprinzip teilweise eine höhere Lüftungswirksamkeit erreicht werden.



Bei Mischlüftung mit dezentralen Geräten kann vor allem die Geräuschentwicklung der Ventilatoren ein begrenzender Faktor sein. Bei Stand- und Deckengeräten sind die zulässigen Flächenlasten von Boden bzw. Decke zu berücksichtigen. Luftkanäle für Außen- und Fortluft müssen geschaffen werden, etwa durch Kernbohrungen oder durch Austausch eines Fensters bzw. Oberlichts durch eine Blende (Isopaneel). Von außen sind entsprechende Wetterschutzgitter zu montieren und gegen das Mauerwerk bzw. die Fassade abzudichten.

Eine ergänzende Diskussion der Vor- und Nachteile der genannten Systeme sind in der Stellungnahme „Lüftung unter Pandemiebedingungen – Stellungnahme vom Arbeitskreis Klimatechnik, insbesondere zu Schulen und vergleichbaren Räumen“ aus Januar 2022 zu finden [5].

Raumluftströmungen und Arten der Luftführung

Luft kann auf unterschiedliche Weise in den Raum eingebracht und im Raum geführt werden. Die Luftführung hat entscheidenden Einfluss auf den Luftaustausch, den Abtransport bzw. die Verdünnung von Schadstoffen, den Energiebedarf und den thermischen Komfort. Besonders bei maschineller Lüftung sind die Geschwindigkeit und der Turbulenzgrad der Zuluft sowie die Form, Ausrichtung und Position der Zu- und Abluftdurchlässe entscheidende Faktoren (siehe auch Seite 40).

Die Wirksamkeit der Belüftung hinsichtlich Luftaustausch und des Schadstoffabtransport kann anhand verschiedener Bewertungsgrößen beurteilt werden. In der Raumlufttechnik haben sich insbesondere der „Luftaustauschwirkungsgrad“ und das „Alter der Luft“ zur Bewertung des Luftaustauschs und die Lüftungswirksamkeit zur Bewertung des Schadstoffabtransportes etabliert. Weitere Informationen zu Bewertungsgrößen für die Effektivität des Luftaustauschs und des Schadstoffabtransportes finden sich im REHVA Guidebook zur Ventilation Effectiveness (Mundt et al. [60]).

In der Raumlufttechnik werden hauptsächlich die Luftführungsarten Mischlüftung, Verdrängungslüftung und Quelllüftung eingesetzt. Abb. 2.8 illustriert diese Luftführungsarten.

Mischlüftung

Die Mischlüftung ist durch eine impulsstarke Vermischung der Zuluft mit der Raumluft gekennzeichnet. Hohe Zuluftgeschwindigkeiten und Turbulenzen sind typisch. Im theoretischen Grenzfall einer **idealen Mischlüftung** wären die lokalen Temperaturen und Konzentrationen im gesamten Raum gleich. Da die Raumluft mit der Zuluft durchmischt wird, kann im Heiz- oder Kühlfall die Zuluft mit einer hohen Temperaturdifferenz in den Raum eingebracht werden, ohne dass im Aufenthaltsbereich ausgeprägte Temperaturgradienten auftreten. Dadurch können in der Regel hohe Kühl- bzw. Heizleistungen ohne wesentliche Komforteinbußen erreicht werden. Je nach Heiz- bzw. Kühlfall und Anordnung der Zu- und Abluftdurchlässe können jedoch starke vertikale Strömungen oder Kurzschlussströmungen auftreten.

Wie sich Schadstoffe im Raum verteilen hängt auch von der eingesetzten Lüftungslösung ab.

Gängige Luftführungsarten sind hauptsächlich Mischlüftung, Verdrängungslüftung und Quelllüftung.

Auch findet kein gezielter Abtransport von Schadstoffen statt, sondern diese verteilen sich vielmehr im gesamten Raum und werden stark verdünnt. Daher gilt: je raumfüllender die Strömung, desto gleichmäßiger die Verdünnung und desto geringer die lokale Schadstoffkonzentration.

Mischlüftung eignet sich sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen. Sie wird häufig in Räumen mit hoher Personendichte eingesetzt. Dazu gehören Büro- und Versammlungsräume sowie Fahrzeug-, Bahn- und Flugzeugkabinen.

Verdrängungslüftung

Bei der Verdrängungslüftung wird Zuluft impulsarm, also mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit und niedrigem Turbulenzgrad, über eine größere (Luftauslass-)Fläche in den Raum eingebracht. Die Absaugung der Abluft erfolgt dann meist an der gegenüberliegenden Seite, um der Luft eine definierte Richtung aufzuprägen. So kommt es zu einer laminaren Durchströmung des Raums und die Raumluft wird von der Zuluft verdrängt. Schadstoffemissionen werden bei gleichem Volumenstrom wesentlich schneller und effektiver abgeführt, da die Zuluft im Gegensatz zur Mischlüftung nicht erst mit der Raumluft vermischt wird.

Ein skizziertes Beispiel zeigt Abb. 2.8 (Mitte). Hier wird die Raumluft von links nach rechts durch die Zuluft verdrängt wird, so dass die Luft auf der linken Seite des Raums schadstofffrei und auf der rechten, der Abluftseite, schadstoffbelastet ist. Dieser Effekt ist vor allem für Reinräume, Lackierbetriebe, Labore und OP-Säle mit besonderen (hygienischen) Anforderungen von Bedeutung. Verdrängungslüftung bedeutet aber auch, dass im Heiz- oder Kühlfall starke Temperaturgradienten innerhalb des Raums auftreten.

Quelllüftung als Spezialfall der Verdrängungslüftung

Bei der Quelllüftung wird die Zuluft mit geringer Untertemperatur und geringer Strömungsgeschwindigkeit meist bodennah in den Raum eingebracht. Aufgrund des Dichteunterschiedes zur Raumluft breitet sich die Zuluft am Boden aus und steigt lokal konvektiv von unten nach oben an Wärmequellen (z. B. an Personen) auf. Die Zuluft strömt also gezielt in die Umgebung von Personen. Dadurch werden insbesondere von Menschen emittierte Schadstoffe nach oben abtransportiert, wo die Abluft deckennah abgesaugt werden kann.

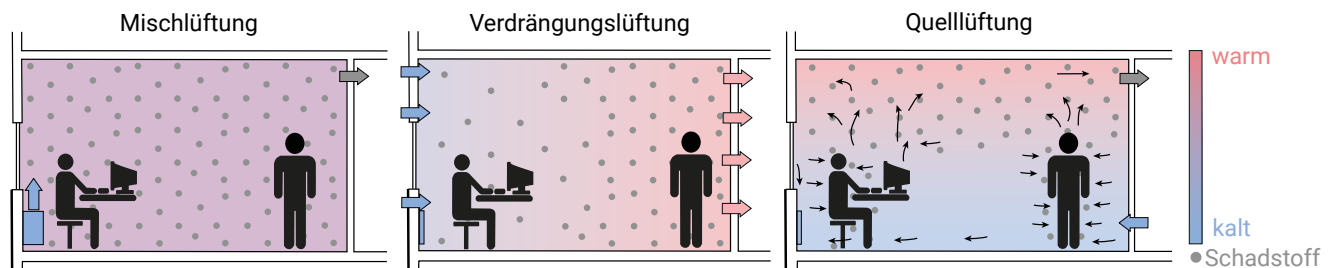


Abb. 2.8: Verschiedene Arten der Luftführung in Innenräumen (eigene Darstellung in Anlehnung an [60]).



Quelllüftung hat mehrere Vorteile: Die niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten werden in den Aufenthaltsbereichen meist als behaglicher empfunden, Schadstoffe können effektiv abgeführt werden und es wird weniger Energie benötigt, da nur der Aufenthaltsbereich gekühlt werden muss. Quelllüftung kann jedoch nur im Kühlfall und bis zu einer gewissen Kühllast sinnvoll eingesetzt werden. Außerdem erzeugt sie vertikale Temperaturgradienten, die bei zu starker Ausprägung als unbehaglich empfunden werden können (siehe Abschnitt „Temperatur“ auf Seite 17).

Der Arbeitskreis Klimatechnik weist in seiner Stellungnahme „Lüftung unter Pandemiebedingungen“ [5] darauf hin, dass bei Quelllüftung und hohen Belegungsdichten (z. B. in Klassenräumen) starke Auftriebsvolumenströme in der Größenordnung von 72 m³/h pro Person auftreten können. Ist dann der Zuluftvolumenstrom nicht groß genug (Stand- oder Deckenlüftungsgeräte können heute durchaus ca. 800 m³/h pro Gerät liefern, ohne zu laut zu werden), wird die Verdrängungsströmung gestört. Die Folge wären eine höhere Durchmischung mit der Raumluft und eine verringerte Lüftungswirksamkeit. Es ist daher im Einzelfall zu prüfen, ob die Quelllüftung und der vom Gerät bereitgestellte Zuluftvolumenstrom für den Raum und die geplante Belegungsdichte ausreichen können [5].

Kleines Temperatur- und Strömungs-ABC

Ein **Temperaturgradient** beschreibt die Änderung einer Temperatur entlang einer Strecke bzw. einer Raumrichtung, z. B. zwischen Boden und Decke oder zwischen Fuß und Kopf.

Ein hoher vertikaler Temperaturgradient führt zu thermischem Unbehagen. So beschreibt die DIN EN ISO 7730, dass mit steigendem vertikalen Temperaturgradient ein größerer prozentualer Teil von Personen das Umgebungsklima als unbehaglich empfindet.

Bei einem vertikalen Temperaturgradienten von 2 Kelvin pro Meter Raumhöhe empfinden etwa 3 % der Anwesenden das Raumklima als unbehaglich, bei 6 Kelvin pro Meter sind es bereits ca. 40 % der Anwesenden [32].

Bei einer **laminaren Strömung** fließt eine Flüssigkeit oder ein Gas annähernd in (parallelen) Schichten ohne erkennbare Verwirbelungen bzw. Durchmischung.

Bei **höheren Fließgeschwindigkeiten** entsteht eine turbulente Strömung mit Verwirbelungen in mehreren Raumrichtungen.

Der **Turbulenzgrad** ist ein Maß für Schwankungen der Luftgeschwindigkeit.

Empfehlungen zur Planung von maschinellen Schullüftungssystemen

Der vorliegende Leitfaden legt den Schwerpunkt auf Konzepte für die ganzheitliche Klassenraumsanierung und weniger auf die Planung und Auswahl konkreter Produkte. Dennoch sei auf das Grundsatzpapier zu den „mindestens zu erfüllende[n] Rahmenbedingungen bei der Planung von maschinellen Schullüftungssystemen“ hingewiesen. Das im Mai 2022 von führenden Branchenverbänden wie dem Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung (BTGA), dem Fachverband Gebäude-Klima (FGK), dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) sowie der TGA-Repräsentanz Berlin herausgegebene Dokument listet folgende Anforderungen für Klassenräume mit einer Grundfläche von 50 bis 90 m² bei 30 anwesenden Schülerinnen und Schülern auf:

- personenbezogener Außenluftvolumenstrom im Raum: > 25 m³/h
- Schalleistungspegel der Lüftungsgeräte während der Unterrichtszeit: < 43 dB(A)
- verpflichtender Einsatz von Wärmerückgewinnung
- Außenluftfilter: mindestens ePM1 50% (gemäß ISO 16890)
- verpflichtende bedarfsorientierte Einzelraumregelung
- behagliche und vollständige Raumströmung

Diese Rahmenbedingungen sollten bei der Planung von maschinellen Lüftungssystemen in Schulen sowie bei der Ausgestaltung von Förderprogrammen oder Richtlinien be-

Filterbezeichnungen nach ISO

Seit Juli 2018 werden „Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik“ gemäß ISO 16890 klassifiziert. Diese ISO-Norm ersetzt die Norm EN 779 und legt mehr Gewicht auf feineren Staub, der als potentiell gesundheitsgefährdender angesehen wird.

Abhängig von der Abscheideleistung werden gemäß Tabelle 2.2 die vier Kategorien ISO COARSE, ISO ePM10, ISO ePM2,5 und ISO ePM1 unterschieden.

Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Filter 50 % der Partikel mit entsprechendem Durchmesser entfernt. Der empfohlene Außenluftfilter zur ISO ePM1 50 % scheidet entsprechend mehr als 50 % des Feinstaubes mit 1 µm Durchmesser ab.

rücksichtigt werden. Für weitere Informationen und mehr Hintergründe zu den geforderten technischen Rahmenbedingungen wird auf das Grundsatzpapier [12] verwiesen.

Einsatz von Luftqualitätsampeln

Die CO₂-Konzentration kann als Indikator der Raumlufqualität genutzt werden und mit CO₂- bzw. Luftqualitätsampeln visualisiert werden (siehe Abschnitt „Kohlenstoffdioxid (CO₂)“ auf Seite 10). Einige CO₂-Ampeln sind bereits für 100 bis 150 € im Handel erhältlich [85]. Je nach Ausführung verfügen sie über Displays oder eine farbige LED-An-



zeige. Die Abstufung erfolgt häufig in Anlehnung an die Pettenkoferzahl, so dass ein hygienisch unbedenklicher Bereich von unter 1.000 ppm grün angezeigt wird (siehe Tabelle 1.1). Je nach Hersteller und Fabrikat werden dann die weiteren Stufen gelb/orange und rot angezeigt, wobei letztere dringenden Lüftungsbedarf signalisiert. Wichtig ist, die Herstellerangaben hinsichtlich der hinterlegten Werte für einen Farbwechsel zu überprüfen. Auch wenn die Anschaffung vieler der aktuell genutzten Messampeln konkret auf die Corona-Pandemie zurückzuführen ist, kann ein Beibehalten dieser Art von Luftqualitätsmessung auch weiterhin für das Raumklima und die Lernatmosphäre förderlich sein.

CO₂-Ampeln richtig positionieren

Die Position der CO₂-Ampel entscheidet in hohem Maße darüber, wie repräsentativ die lokal gemessene Konzentration für die Raumluft ist. Ideal wäre die Positionierung des Geräts in 1,5 m Höhe und mit 1 bis 2 m Abstand zu den Wänden [33], was aber in einem Klassenraum kaum realisierbar ist. Zumindest sollte man darauf achten, das Gerät nicht durch Möbel oder Gegenstände

Angaben von Messgenauigkeit von CO₂-Sensoren

Viele Hersteller geben für die CO₂-Ampel eine Messgenauigkeit in einem Format $\pm (30 \text{ ppm} + 5 \% \text{ v. Mw.})$ an. Der gemessene bzw. angezeigte Wert darf somit gegenüber dem tatsächlichen Wert zunächst absolut um bis zu 30 ppm abweichen. Die relative Abweichung gibt an, dass ein zusätzlicher Messfehler abhängig von der Höhe des Messwertes (v. Mw.: vom Messwert) zu erwarten ist. Zeigt eine Ampel mit oben genannter Spezifikation 1.000 ppm an, darf der tatsächliche Wert um bis zu 80 ppm ($\pm 30 \text{ ppm} + 1.000 \cdot 0,05 \text{ ppm}$) abweichen und sollte entsprechend zwischen 920 und 1.080 ppm liegen.

zu verdecken. Auch die unmittelbare Nähe zu Fenstern und Türen sollte vermieden werden, damit die CO₂-Konzentration nicht unterschätzt wird. Da einige Sensoren laut Herstellerangaben außerdem vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt anzubringen sind, kann die Wand gegenüber der Fensterfront gut geeignet sein. Aufgrund der hohen

Der Standort der CO₂-Ampel entscheidet, wie verlässlich die gemessenen Werte sind.

Klasse	ISO Coarse	ISO ePM10	ISO ePM2,5	ISO ePM1
Partikelgröße	50 µm = 0,05 mm	10 µm = 0,01 mm	2,5 µm = 0,0025 mm	1 µm = 0,001 mm
Einsatzgebiet	Feiner Strandsand, Menschenhaar	Pollen, Staub, Schimmel	Organische Verbindungen, Bakterien, Schimmelpilzsporen	Viren, Bakterien

Tabelle 2.2: Partikelgrößen nach ISO 16890 (siehe auch [68]).

(Selbst-)Kalibrierung von CO₂-Sensoren

Viele CO₂-Sensoren und -Ampeln verfügen über eine Selbstkalibrierung. Diese setzt voraus, dass der Sensor innerhalb eines Zeitraums von mehreren Tagen (je nach Fabrikat und Einstellung z. B. sieben Tage) für eine bestimmte Mindestdauer (z. B. eine Stunde) Außenluft bzw. Luft mit einer Umgebungskonzentration im Bereich von etwas über 400 bis etwa 450 ppm CO₂ ausgesetzt ist. Wurden Sensoren längere Zeit nicht benutzt oder wurde über längere Zeit nicht ordnungsgemäß gelüftet, kann es erforderlich sein, die gesamte Zykluszeit zur nächsten erneuten Selbstkalibrierung abzuwarten, bis der Sensor wieder realistische Werte anzeigt. Sensoren ohne Selbstkalibrierung müssen in den vom Hersteller angegebenen Zeitintervallen neu kalibriert werden.

Konzentration von CO₂ in der Atemluft (ca. 40.000 ppm bzw. 4 %) sollte eine Position in Kopfnähe der anwesenden Personen, etwa an der Wand in der Nähe einer Sitzposition, oder im Ausatmungsbereich auf dem Pult einer Lehrkraft, vermieden werden.

Erfahrungen einer Feldstudie

Um die Umsetzung und Wirkung der aktuellen Lüftungsregeln zu überprüfen wurde vom Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen der RWTH Aachen eine Feldstudie durchgeführt. Es zeigte sich, dass die an sechs Messpositionen erhobenen CO₂-Werte nur leicht voneinander abwichen und dass die Platzierung eines einzelnen Sensors die Gesamtkonzen-

tration ausreichend gut wiedergibt – sofern die oben genannten Hinweise zur Platzierung und möglichen Verdeckung berücksichtigt werden.

Von Zeit zu Zeit sollten die installierten Geräte auf ihre Funktionstüchtigkeit und auf Beschädigung überprüft werden. Die Erfahrung aus der Feldstudie mit CO₂-Ampeln im Klassenraum sind durchweg positiv. Die Schülerinnen und Schüler setzten sich intensiv mit den Lüftungsregeln auseinander und dekorierten in einem Fall sogar die Sensorboxen mit selbstgemalten Figuren (siehe Abb. 2.9), ohne dass die Funktion beeinträchtigt wurde.

Zeigt ein Messgerät bei ansonsten gleich gebliebenen Bedingungen zu häufig orange oder rote Warnstufen an oder tritt selbst bei Dauerlüftung keine merkliche Besserung ein, kann eine Vergleichsmessung mit einem baugleichen Gerät prüfen, ob eine Fehlfunktion vorliegt.



Abb. 2.9: Von den Schülerinnen und Schülern dekorierte Sensorbox in einer Feldstudie.



Nicht immer ist dann sofort ein neues Gerät erforderlich. Oft kann eine Kontaktaufnahme mit dem Hersteller und eine Neukalibrierung des Geräts Abhilfe schaffen und eine Weiterverwendung ermöglichen.

Interpretation der Anzeige

Bei der Interpretation der Ampelstufe bzw. der Konzentrationswerte bei Varianten mit Display ist auch bei sorgfältiger Aufstellung zu bedenken, dass bei voll besetzten Klassenräumen und insbesondere in den Wintermonaten, in denen eine Fensterlüftung temperaturbedingt oft nur in geringem Umfang erfolgt, mit hohen Konzentrationen zu rechnen ist. Nicht immer erlauben es die Umgebungs- und Rahmenbedingungen, dauerhaft im grünen Bereich (je nach Gerät etwa im Bereich um 800 bis 1.000 ppm) zu bleiben.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass ein Farbsprung der Anzeige letztlich nur durch einen Konzentrationsanstieg von wenigen ppm verursacht wird. Tatsächlich wird ein Anstieg von 995 zu 1.005 ppm in seiner Auswirkung kaum einen Unterschied machen. Auch ist es kaum praktikabel, bei jedem Anstieg sofort zu lüften. Kurzzeitige Spitzenwerte werden sich nicht vollständig vermeiden lassen. Ziel sollte vielmehr sein, dauerhaft hohe Werte zu reduzieren.

Ein großer Vorteil der CO₂-Ampeln bzw. Messgeräte ist, dass sie eine Rückmeldung über die erfolgte Lüftung geben und somit den Personen im Raum mit der Zeit ein Gefühl dafür vermitteln, welche Lüftungsdauern und -methoden funktionieren. Eine aktive Auseinandersetzung und das Beobachten des Zusammenspiels von Personenanzahl, Lüftungsverhalten und den sich einstellenden Konzentrationen ist sehr sinnvoll.

Wärmerückgewinnung (WRG) bei maschineller Lüftung

Ein zentraler Bestandteil von modernen Lüftungsgeräten sind Wärmerückgewinnungssysteme. Diese nutzen die Abwärme der Abluft, um die Zuluft vorzuwärmen und so den Heizenergiebedarf zu senken. Um zu hohe Raumtemperaturen in den Übergangszeiten und im Sommer zu vermeiden, sollte das Wärmerückgewinnungssystem über einen Bypass verfügen (siehe Abb. 2.10). Über diesen wird die Luft an der Wärmerückgewinnung vorbeigeführt, wenn die Außenluft warm genug ist, so dass Energie eingespart werden kann (siehe Infobox „Inwiefern kann ein Bypass Energie sparen?“).

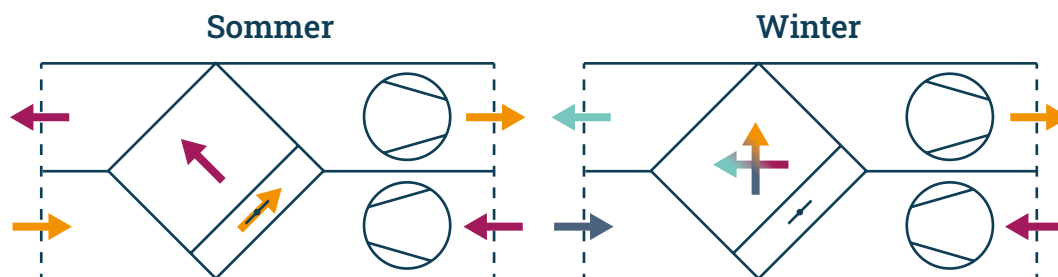


Abb. 2.10: Schematischer Aufbau eines Lüftungsgeräts mit Wärmerückgewinnung (WRG) und einem Bypass: Sommer (links), Winter (rechts).

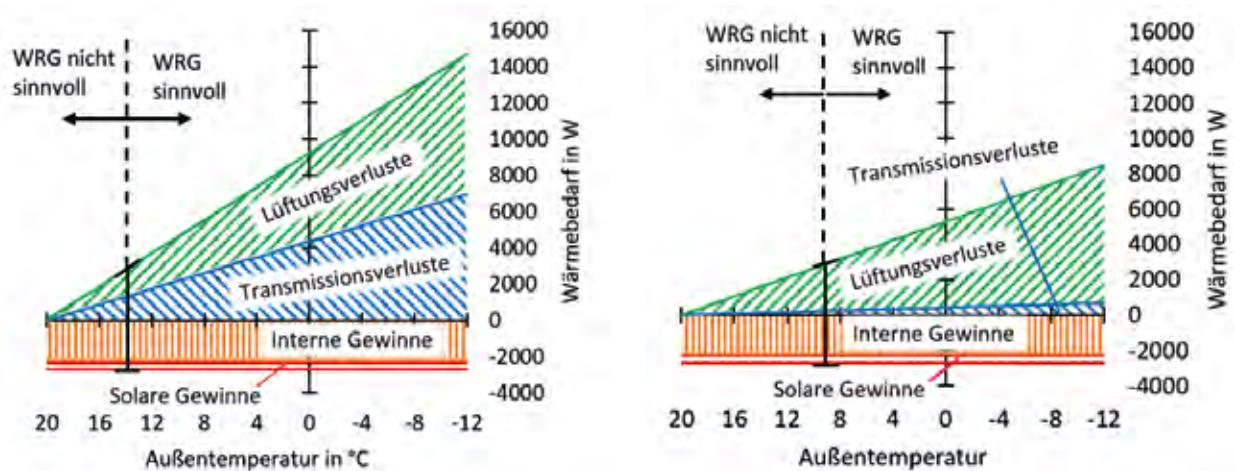


Abb. 2.11: Nutzen der Wärmerückgewinnung für Altbauten (links) und Neubauten (rechts).

Inwiefern kann ein Bypass Energie sparen?

Ein Wärmerückgewinnungssystem besteht aus vielen kleinen Kanälen, durch die Luft strömt und erwärmt bzw. abgekühlt wird. Durch die Luftströmung entsteht an den Kanalwänden Reibung, die der Strömung entgegenwirkt. Um dies zu kompensieren und die eigentliche Strömungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten, muss der Ventilator elektrische Energie aufwenden. Wenn das Wärmerückgewinnungssystem nicht genutzt werden soll, wird die Luft alternativ durch einen Bypass geführt, der aus einem größeren Kanal besteht. In diesem entsteht weniger Reibung, so dass der Ventilator weniger elektrische Energie aufwenden muss, um die Reibungsverluste auszugleichen.

Energetischer Nutzen einer Wärmerückgewinnung

Der energetische Nutzen einer Wärmerückgewinnung hängt von der Außentemperatur ab. Eine überschlägige Abschätzung ist in Abb. 2.11 dargestellt und zeigt den Verlauf von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten (ohne Wärmerückgewinnung), internen Gewinnen und solaren Gewinnen über die Außentemperatur für einen Klassenraum mit (links) Altbaustandard und (rechts) Neubaustandard. Wärmeverluste durch Infiltration sind nicht berücksichtigt, da sie stark von der Gebäudekonstruktion abhängen.

Bei Berücksichtigung der Infiltration wird die Wärmerückgewinnung tendenziell bei höheren Außentemperaturen sinnvoll, so dass die Darstellung eine konservative Abschätzung ist. Folgende Abhängigkeiten sind zu beachten:

- Die **solaren Gewinne** hängen nicht direkt von der Außentemperatur ab und sind vereinfacht als über das Jahr gemittelter Wert angegeben.



- **Interne Gewinne** sind ebenfalls unabhängig von der Außentemperatur und setzen sich aus der Abwärme von den anwesenden Personen, Geräten und Beleuchtung zusammen.
- Die **Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste** hängen linear von der Außentemperatur ab.

Ab der Außentemperatur, bei der sich Wärmegewinne und Wärmeverluste die Waage halten, bringt die Wärmerückgewinnung keinen energetischen Vorteil mehr, da keine Heizenergie mehr nötig ist, um eine Innentemperatur von 20 °C zu erhalten.

Auch wenn die Wärmerückgewinnung ab 9 bis 14 °C Außentemperatur keine energetischen Vorteile bietet (siehe Abb. 2.11), kann sie den Komfort im Klassenraum erhöhen und die Temperatur der dem Raum zugeführten Luft anheben. Dadurch wird das Risiko von Zuglufterscheinungen bis zur Aktivierung des Bypasses verringert und die Anwesenden werden weniger kalten Temperaturen ausgesetzt [52].

Bei welcher Außentemperatur ist Wärmerückgewinnung energetisch sinnvoll? 123

Bei **älteren Schulgebäuden** mit einem effektiven U-Wert der Außenfassade von 5 W/(m²•K) bringt die Wärmerückgewinnung bis ca. 14 °C Außentemperatur einen energetischen Vorteil.

Bei **neueren Schulgebäuden** mit einem effektiven U-Wert der Außenfassade von 0,5 W/(m²•K) ist die Wärmerückgewinnung bis ca. 9 °C Außentemperatur energetisch vorteilhaft. Für die Lüftungsverluste wurde eine Außenluftzufuhr von 25 m³/(h•Person) angenommen. Interne Wärmegewinne durch Personen, Beleuchtung und Geräte wurden mit 2.180 W und mittlere solare Wärmegewinne mit 520 W angenommen.




Jährliches Einsparpotential durch Wärmerückgewinnung bei maschineller Lüftung	 Energieeinsparung	 Treibhausgasreduktion	 Energiekosteneinsparung
Pro m ²	52 kWh/m ²	13 kg/m ²	7,20 €/m ²
Pro Klassenraum (mit durchschnittlich 62,5 m ²)	3250 kWh	812,5 kg	450 €

Tabelle 2.3: Exemplarische Berechnung des betriebsgebundenen Einsparpotenzials maschineller Lüftung mit Wärmerückgewinnung gegenüber manueller Fensterlüftung.

Was sind Transmissionsverluste, Lüftungswärmeverluste und Infiltration?

Transmissionsverluste beschreiben den Wärmeverlust durch die Wände vom Innenraum nach außen. Im Winter ist die Temperatur der Außenwand im Raum höher als die Temperatur auf der Außenseite der Wand hin. Dadurch entsteht ein Wärmefluss von innen nach außen. Je nach thermischen Eigenschaften der Wand sind die Wärmeverluste größer oder kleiner.

Lüftungswärmeverluste entstehen, wenn dem Innenraum kältere Luft zugeführt wird, die im Raum erst wieder erwärmt werden muss. Zu den Lüftungswärmeverlusten zählen auch Wärmeverluste durch Infiltration.

Infiltration entsteht durch Undichtigkeiten, z. B. kleine Spalte, in der Gebäudehülle. Durch diese dringt im Winter kältere Luft von außen in den Innenraum ein und muss dann erwärmt werden. Infiltration tritt bei allen Gebäuden auf, wobei moderne Gebäude deutlich luftdichter sind und daher eine geringere Infiltration aufweisen.

Wärmerückgewinnung spart Energiekosten und schont das Klima

Berechnungen der RWTH Aachen basierend auf [52] ergeben, dass Schulen pro Quadratmeter Klassenraumfläche etwa 52 kWh Energie pro Jahr einsparen könnten. Dazu wurde modellhaft ein dezentrales Lüftungsgerät mit 79 % Temperaturübertragungsgrad angenommen und Raumnutzungsdaten entspre-

chend SIA 2024 [76] zugrunde gelegt (siehe [52]). Für einen Klassenraum typischer Größe von 62,5 m² ergibt sich daraus ein jährliches Einsparpotenzial von rund 450 €, wenn vereinfachend ein durchschnittlicher Strompreis

Was sind solare und interne Gewinne?

Solare Wärmegewinne entstehen durch die Einstrahlung der Sonne auf die Außenhülle von Gebäuden. Besonders durch Fensterflächen strahlt das Sonnenlicht in den Innenraum und erwärmt dort die Wände und die Luft. Dieses Phänomen kennt man beispielsweise von Gewächshäusern. Hier dringt das Sonnenlicht durch die Glasflächen in das Gewächshaus ein und erwärmt dort die Luft. Da Gewächshäuser nur einen geringen Luftaustausch mit der Umgebung haben, ist es in ihnen auch im Winter deutlich wärmer als draußen, obwohl sie nicht beheizt werden.

Interne Wärmegewinne werden durch Menschen, Geräte und Beleuchtung verursacht. Wir Menschen geben ständig Wärme an unsere Umgebung ab, da unsere Körpertemperatur höher ist als die Raumtemperatur (20–26 °C). Auch Geräte wie Computer, Kaffeemaschinen usw., produzieren Wärme, wenn sie in Betrieb sind. Gleiches gilt für die Beleuchtung, die nicht nur Licht erzeugt, sondern immer auch Wärme an den Raum abgibt. Zusammengenommen bezeichnet man alle Wärmequellen in einem Raum, ausgenommen von den aktiven Heizflächen, als interne Wärmegewinne, da sie zur Erwärmung des Raums beitragen.

Was ist eigentlich ein U-Wert?

Der U-Wert beschreibt, wie viel Wärme über eine Wand, ein Fenster oder eine Fassade pro Quadratmeter Fläche und pro Kelvin Temperaturdifferenz (1 Kelvin entspricht 1 °C) übertragen wird. Der U-Wert fasst die Wärmewiderstände einer Fassade zusammen und ermöglicht so die direkte Berechnung der Transmissionsverluste/-gewinne, sofern die Fläche und die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenluft bekannt sind [31].

von 30 Cent pro kWh und ein Gaspreis von 15 Cent pro kWh angenommen wird. Durch die CO₂-Steuer dürfte sich der eingesparte Betrag in den kommenden Jahren noch erhöhen. Insgesamt können an einer Schule etwa 20 bis 43 Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart werden (Tabelle 2.3).

Ergänzender Einsatz von Luftreinigern

Mobile Luftreiniger sind Geräte, die mithilfe eines Ventilators die Raumluft umwälzen und durch einen Feinstaubfilter Partikel aus der Raumluft entfernen (siehe Abb. 2.12). Durch den Einsatz von Luftreinigern kann sich der Zustand einer Mischlüftung (siehe Abschnitt „Mischlüftung“ auf Seite 43) einstellen. Da jedoch keine Außenluft zugeführt und somit auch der CO₂-Gehalt der Luft nicht abgesenkt wird, können mobile Luftreiniger die Luftqualität nur im Hinblick auf Aerosolpartikel verbessern. Je nach technischer Ausstattung ist auch eine thermische Kon-

ditionierung der Luft möglich. In diesem Fall unterscheiden sich Luftreiniger von Umluftgeräten nur durch die bessere Filterwirkung.

Je nach Auslegung und Baugröße der Luftreiniger kommt es zu einer nicht unerheblichen zusätzlichen Geräuschbelastung, da die eingebauten Ventilatoren und auch die ausströmende Luft Schall emittieren. Für eine maximale Wirkung der Luftreiniger sind je nach Raumgröße entweder ein hoher Volumenstrom oder mehrere Luftreiniger erforderlich, was im Konflikt mit der Anforderung eines niedrigen Lärmpegels stehen kann.

Insgesamt ist abzuwägen, inwieweit Luftreiniger eine nachhaltig sinnvolle Lösung zur Verbesserung der Innenraumqualität in Klassenräumen darstellen. Denn auch beim Einsatz von Luftreinigern kann auf das manuelle oder maschinelle Lüften zur Senkung der CO₂-Konzentration nicht verzichtet werden. Luftreiniger können eine Möglichkeit bieten, Raumluft von kleinsten Partikeln zu befreien, sollten aber nicht als alleinige dauerhafte Lösung angesehen werden.



Abb. 2.12: Luftreiniger arbeiten im Umluftverfahren. Dabei werden Aerosolpartikel und anhängende Keime und Viren aus der Luft gefiltert oder Schadstoffe werden mittels Desinfektionsmaßnahmen wie z. B. UVC-Strahlern abgetötet (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]).



2.2 Akustik

Lange Nachhallzeiten verringern die Sprachverständlichkeit und den akustischen Komfort in einem Raum.

Lange Nachhallzeiten sind eine häufige Ursache für schlechte Akustik in Klassenräumen. Um Nachhallzeiten zu reduzieren und so die Sprachverständlichkeit zu verbessern, werden schallabsorbierende Materialien eingesetzt. Die dafür im Raum vorzusehende Absorptionsfläche hängt von den räumlichen Gegebenheiten und den Eigenschaften der Schallabsorber ab.

Erst den Ist-Zustand erfassen

Zunächst sollte der Ist-Zustand des Raums erfasst und die Nachhallzeit gemessen werden (siehe Seite 24). So kann überprüft werden, bei welchen Frequenzen Handlungsbedarf besteht. Die Nachhallzeit hängt von der Beschaffenheit der Umschließungsflächen, Bodenbeläge und Einrichtungsgegenstände ab. Anhand der Messungen können für Sanierungsmaßnahmen gezielt Materialien gewählt werden, die den Schall frequenzabhängig passend absorbieren.

Für Sprache wichtige Frequenzen beachten

Material, Art und Fläche der Schallabsorber sollten so aufeinander abgestimmt werden, dass vor allem bei den für die Sprache wichtigen Frequenzen eine geeignete (kurze) Nachhallzeit erreicht wird.

Bedürfen in einem Raum tiefere Frequenzen bei 125 oder 250 Hz hoher Dämpfung, so wäre es nicht zielführend, Produkte mit den besten schallabsorbierenden Eigenschaften im mittleren Frequenzbereich zu wählen und dann deren Fläche so lange zu vergrößern, bis auch bei tiefen Frequenzen eine ausreichende Wirkung eintritt. Denn erstens ist die Fläche im Klassenraum begrenzt und zweitens könnte ein solches Vorgehen zu einer starken Überdämpfung bei mittleren Frequenzen führen, die ebenfalls vermieden werden sollte. Stattdessen sollten Maßnahmen so kombiniert werden, dass sich eine möglichst gleichmäßige Nachhallzeit bei den relevanten Frequenzbändern ergibt.



Abb. 2.13: Flächige, akustisch wirksame Systemdecke mit Einlegeleuchten.

Die Raumdecke nutzen

Die Decke ist in der Regel die größte freie schallreflektierende Fläche im Raum und bietet sich daher für akustische Verbesserungen an. Eine gängige, praktikable und in der Regel einfach zu realisierende Lösung ist eine abgehängte Systemdecke. Dabei wird ein Tragschienensystem mit etwas Abstand zur Rohdecke mit festem Rastermaß abgehängt. In das Raster werden schallabsorbierende Platten, z. B. aus Glas- oder Steinwolle und mit einer Dicke von 15 oder 20 mm eingelegt. Häufig sind die Absorberplatten quadratisch und können sich so ein Schienensystem mit der Beleuchtung teilen (siehe Abb. 2.13). Entsprechende Systemdecken werden auch in vielen anderen Nichtwohngebäuden wie Büros, Verwaltungsgebäuden und Supermärkten eingesetzt.

Vor der Installation einer Systemdecke ist zu prüfen, welcher Anteil der vorhandenen Deckenfläche für raumakustische Maßnahmen zur Verfügung steht und ob die Decke vollflächig oder teilflächig genutzt werden soll. Würde eine vollflächige Abhängung die Raumhöhe zu sehr einschränken oder Fenster bzw. Oberlichter verdecken, ist ggf. entlang der Fenster ein Streifen (Abb. 2.13) auszusparen, um den Tageslichteinfall nicht zu reduzieren und Schattenwurf zu vermeiden.

Die Ausstattung der Decke kann passend zu den jeweiligen räumlichen Randbedingungen, den optischen Präferenzen und dem Kostenrahmen gewählt werden. Die Hersteller von Systemdecken bieten in der Regel ein breites Sortiment an Akustikplatten an. Die Platten unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Absorptionseigenschaften bei bestimmten Frequenzen, ihre Stärke bzw. Dicke und

ihre Oberflächenbeschaffenheit. Bei den Tragschienen gibt es sichtbare, halbverdeckte und verdeckte Systeme.

Alternativ zur Systemdecke können auch **Deckensegel** installiert werden (Abb. 2.14). Diese bieten sich ebenfalls an, wenn der Nachhall nur geringfügig reduziert werden muss. Darüber hinaus lassen sich einzelne Deckenabsorber gut mit maschinellen Lüftungsgeräten kombinieren, welche die Zuluft statt frei auszublasen über perforierte Rohre bzw. Textilschläuche in den Raum einbringen, da die Zuluft so zwischen einzelnen Segeln hindurch- oder über einzelne Segel hinwegströmen kann.

Deckensegel werden je nach Hersteller und Produktreihe entweder mit etwas Abstand zur Decke oder direkt an der Decke montiert. Während flächige Systemdecken meist durch eine Trocken- bzw. Akustikbaufirma installiert werden, ist die Montage einzelner Akustikdeckenpaneele je nach Produkt ggf. auch niederschwelliger möglich. Wird die Decke zum Heizen oder Kühlen genutzt (über wasser- oder luftführende Rohrleitungen), kommt auch der Einsatz von vertikal abgehängten Baffeln in Frage (Abb. 2.15), auch wenn diese Art der Schallabsorption in Klassenräumen eher selten anzutreffen ist.

Wandabsorber ergänzen Akustikdecken

Gezielt platzierte **Wandabsorber** können im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen leicht durchführbare Maßnahmen an der Decke ergänzen. In Kombination lassen sich in den meisten Räumen gute Ergebnisse erzielen. Häufig empfiehlt sich der Einsatz von Wandabsorbern zumindest im oberen Teil der Raumrückseite [39], besser noch an zwei an-

Oft die einfachste Verbesserungsmaßnahme: eine Akustikdecke.





Abb. 2.14: Lokal installierte Deckensegel (Primary School no 46 in Poznan) zur Reduktion der Nachhallzeit (ROCKWOOL Rockfon GmbH [69]).



Abb. 2.15: Vertikal von der Decke abgehängte Baffeln zur Reduktion der Nachhallzeit (ROCKWOOL Rockfon GmbH).

grenzenden Umschließungsflächen wie der Rückwand und einer Seitenwand (Abb. 2.17). Diese können vor allem in den vorderen Reihen eine ungünstige Mischung von Direktschall und von dem an Decke und Rückwand reflektierten Schall verhindern (Abb. 2.16 und Abb. 2.17). Unter besonderen Bedingungen kann auch der Einsatz von kompakten **Breitbandabsorbern** oder **Bassfallen** z. B. in Raumecken sinnvoll sein, wobei hier die Praktikabilität zu prüfen ist.

Alle Verbesserungsmaßnahmen einschließlich der Positionierung von Decken- und Wandabsorbern sollten individuell mit den Herstellern bzw. Fachplanern abgestimmt werden. Nur so ist es möglich, die Gegebenheiten im Raum frequenzabhängig zu berücksichtigen und zu verbessern.

Raumakustische Verbesserungsmaßnahmen können die Stellfläche und die verfügbare Wandfläche eines Raums reduzieren. Je nach Materialien und eingesetzten Absorbern sollte dann geprüft werden, ob die neuen Elemente in irgendeiner Form schulisch genutzt werden können, also zum Beispiel mit Postern behängt werden dürfen.

Zusätzliche Schallabsorption

Auch **Vorhänge**, **Teppiche**, **Polstermöbel** wie Sofas und **offene Bücherregale** können dazu beitragen, die Klassenraumakustik zu verbessern. Sie können Schall absorbieren und die Reflexion von Schallwellen an schallharten Oberflächen wie Fenstern und Böden reduzieren. Der Brandschutz ist dabei generell zu berücksichtigen.

Zu möglichen ergänzenden Maßnahmen zählen der Einsatz oder das Erneuern von **Gleitern unter Tischen und Stühlen**, eine durchdachte **Anordnung der Möbel und Sitzordnung** und eventuell sogar **mobile Trennwände** während Gruppenarbeitsphasen.

Auch die anwesenden Personen absorbieren Schall und tragen so zur Verkürzung der Nachhallzeit bei. Selbstverständlich ist es nicht zielführend, die Belegungsdichte zu diesem Zweck beliebig zu erhöhen. Vielmehr sollte darauf geachtet werden, dass die akustischen Bedingungen nicht nur bei

Vollbelegung günstig sind, sondern auch bei einer Teilbelegung eine möglichst störungsfreie Kommunikation möglich ist.

Alterung und Überstreichen von Absorbern

Da Empfehlungen für die Nachhallzeit in Klassenräumen bereits vor mehreren Jahrzehnten veröffentlicht wurden, dürften viele Räume bereits mit akustisch absorbierenden Flächen oder einer abgehängten Decke ausgestattet sein. Wurden solche Elemente vor längerer Zeit installiert, sollten sie auf ihre Wirkung hin überprüft werden. Die häufig verwendeten mineralischen Materialien büßen über die Jahrzehnte einen Teil ihres akus-

tischen Absorptionsvermögens ein; häufig werden sie im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen sogar überstrichen und verlieren dadurch weitestgehend ihre Wirkung.

Für weitere Informationen zur akustischen Gestaltung von Klassenräumen sei auf die DIN 18041 [22], VDI 2081 [105], das Kompendium „Branche Schule“ (DGUV Regel 102-601) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [21], den FGK-Status-Report 61 zur „Akustik in Klassenräumen“ [39] sowie die verschiedenen Handreichungen des Fraunhofer IBP verwiesen.

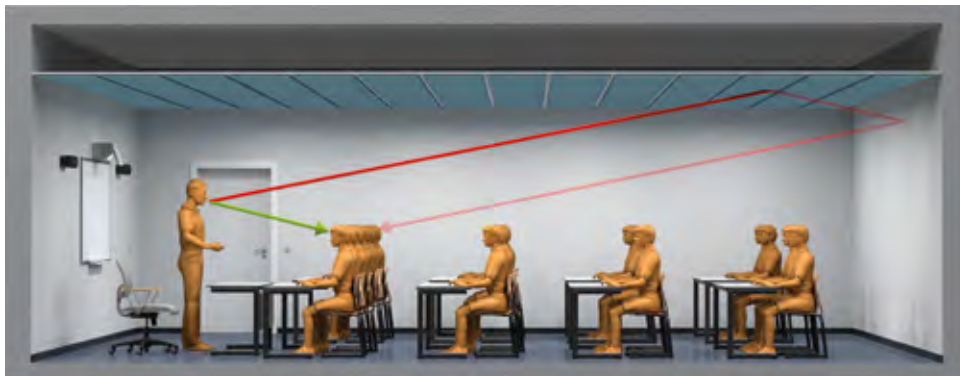


Abb. 2.16: Wege von Schallwellen in einem Klassenraum mit Deckenabsorbern (Abbildung aus [39]).

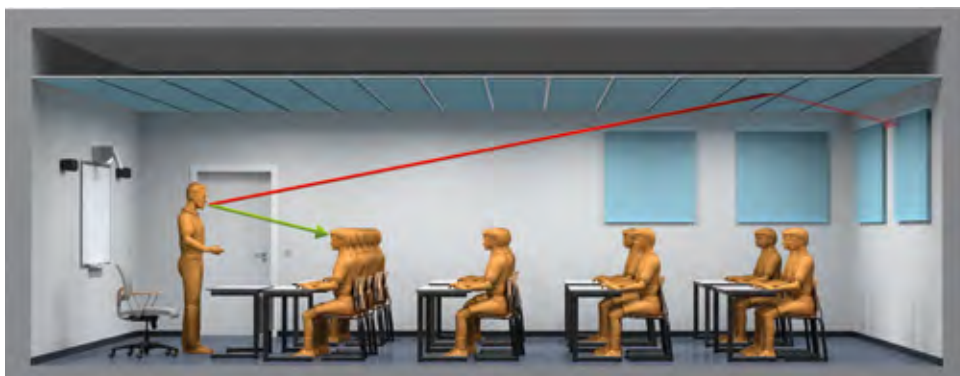


Abb. 2.17: Wege von Schallwellen in einem Klassenraum mit Decken- und Wandabsorbern (Abbildung aus [39]).

2.3 Beleuchtung

Direkte und indirekte Beleuchtung

Kleinere Anpassungen der Beleuchtung können helfen, dass wir uns in einem Raum wohl fühlen und uns besser konzentrieren können.

Die Lichtverhältnisse im Klassenraum haben einen großen Einfluss auf das Wohlbefinden und Lernen der Schülerinnen und Schüler. Sie ergeben sich im Wesentlichen aus dem von außen einfallenden Tageslicht und der zusätzlichen künstlichen Beleuchtung. Der Einfallswinkel des Lichts beeinflusst die Lichtverteilung im Raum, je nachdem, ob das Licht direkt oder indirekt auf Oberflächen trifft. Direkte Beleuchtung lenkt das Licht überwiegend direkt auf Arbeitsflächen. Dadurch wird eine hohe Lichtausbeute erzielt. Bei indirekter Beleuchtung streut das Licht hauptsächlich indirekt über Reflexionsflächen wie Decken oder Wände in den Raum und sorgt so für eine weiche Beleuchtung [23].



Abb. 2.18: Direktes und indirektes Licht: Drei Quader, von links nach rechts mit vorwiegend direktem Licht, vorwiegend indirektem Licht und einer Kombination aus beidem beleuchtet.

Für den Arbeitsalltag wird eine **Kombination aus direktem und indirektem Licht empfohlen**, da sie ausgewogenere Leuchtdichteverhältnisse und eine angenehmere Schattigkeit ermöglicht (siehe Abb. 2.18). Auch ist diese Kombination günstig für die Umsetzung von Human Centric Lighting, einem menschenfokussierten Beleuchtungskonzept, das die Wachsamkeit und Aufmerksamkeit unter-

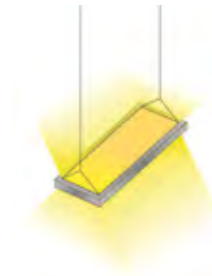


Abb. 2.19: Pendelleuchte mit einer Kombination aus direkter und indirekter Beleuchtung: Sie emittiert direktes Licht nach unten und erzeugt durch Deckenreflexion indirekte Beleuchtung.

stützt (siehe Abschnitt „Human Centric Lighting (HCL)“ auf Seite 61). Für die Umsetzung empfehlen sich abgehängte Pendelleuchten, die sowohl direkt nach unten als auch nach oben zur Decke strahlen (siehe Abb. 2.19). Die Deckenreflexion ermöglicht eine indirekte Beleuchtung, die den Raum aufhellt und optisch erhöht, und trägt zu einer verbesserten Raumwahrnehmung bei.

Im **Tafelbereich** sind ggf. abweichende Anforderungen gegenüber von horizontalen Tisch- bzw. Arbeitsflächen zu beachten. Der Tafelbereich sollte gut und schattenfrei ausgeleuchtet sein. Im Einzelfall ist die Beleuchtung auf die Art der Tafel abzustimmen. Bei herkömmlichen Tafeln können auf die Wand gerichtete Tafelbeleuchtungen (spezielle Wandfluter) eingesetzt werden, während einige moderne Smartboards so leuchtstark sind, dass im Gegenteil eine zusätzliche Ausleuchtung des Tafelbereichs nicht notwendig oder nicht erwünscht ist.

Lichtmanagement

Nach einer Tageslichtplanung, die eine gute Nutzung des Tageslichtangebotes sicher-

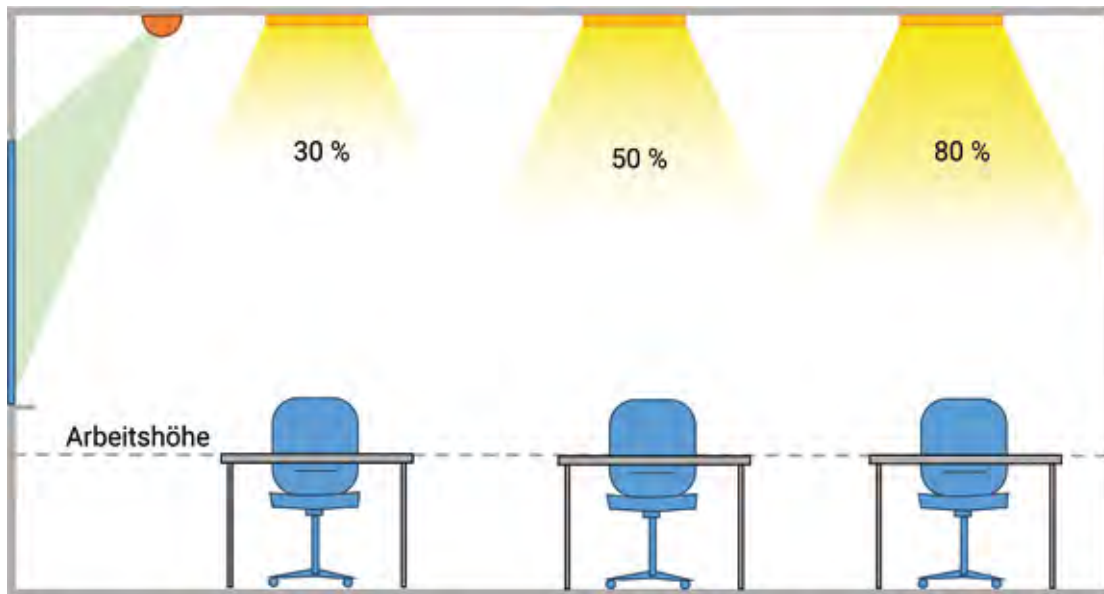


Abb. 2.20: Beispiel einer Tageslichtsteuerung: Ein Tageslichtsensor misst das verfügbare Tageslicht und passt die Intensität der künstlichen Beleuchtung automatisch an, so dass eine konstante Helligkeit im Raum gewährleistet und der elektrische Energieverbrauch der Beleuchtung reduziert wird.

stellt, ist künstliche Beleuchtung ergänzend notwendig, damit die Mindestanforderungen an die Verfügbarkeit von Licht (siehe Abschnitt „1.4 Beleuchtung“ auf Seite 27) auch bei zu geringem Tageslichtangebot eingehalten werden können. Bei der Planung der künstlichen Beleuchtung einschließlich Produktauswahl und Platzierung unterstützt in der Regel der Hersteller. Gleichzeitig sollten verschiedene Regelungssysteme für Beleuchtungskonzepte implementiert werden, um z. B. den elektrischen Energieverbrauch für die Beleuchtung zu reduzieren. Weiterführende Informationen bieten die von licht.de herausgegebene Schriftenreihe „licht.wissen 21“ zum Thema Beleuchtung sowie der Leitfaden zum Lichtmanagement [54].

Empfehlenswert ist die Installation von **dimmbaren** Leuchten, die das Beleuchtungsniveau an unterschiedliche Tages- bzw. Betriebszeiten oder Aktivitäten mit unterschiedlich visuellen Anforderungen anpassen

können. Das Dimmen erhöht oder verringert den Lichtstrom der Leuchte und damit die wahrgenommene Helligkeit und Beleuchtungsstärke. Teilweise kann durch Dimmen auch die Farbtemperatur und damit die Lichtstimmung verändert werden. Dimmbare Beleuchtung kann zu einer höheren Zufriedenheit führen, da sie an die Bedürfnisse der Anwesenden angepasst werden kann.

Tageslicht trägt in vielen Räumen dazu bei, die geforderte Beleuchtungsstärke einzuhalten. Daher ist die volle Leistung der elektrischen Beleuchtung nicht immer bzw. nicht zu allen Jahres- und Tageszeiten erforderlich. Ein auf ein Fenster gerichteter und in die Leuchtensteuerung integrierter **Tageslichtsensor** kann den Lichteintrag von außen erfassen und die Beleuchtungsstärke anpassen (siehe Abb. 2.20). Dadurch kann der Anteil der elektrischen Beleuchtung reduziert und ein Beitrag geleistet werden, den Energieverbrauch zu senken. Ein zusätzlicher

Anwesenheitssensor kann dafür sorgen, dass die Leuchten nach Verlassen des Klassenraums komplett ausgeschaltet werden.

Sonnen- und Blendschutz

Um sowohl die Blendung durch von außen einfallendes Licht als auch die **Überhitzung** durch Sonneneinstrahlung zu minimieren, sollten bei der Planung ausreichende Vorkehrungen für den Sonnenschutz getroffen werden. Dazu können Jalousien oder Vorhänge vorgesehen werden, die entweder sensorbasiert und automatisiert gesteuert oder von den anwesenden Personen manuell bedient werden können.

Für die Wahl des Sonnenschutzes gilt, dass ein **außenliegender Sonnenschutz** für Fassaden nach Süden, Osten und Westen geeignet ist. Ein außenliegender Sonnenschutz ist einem innenliegenden Sonnenschutz vorzuziehen, da er den Wärmeeintrag reduziert, bevor er in den Innenraum gelangt. Überhitzungserscheinungen kann so vorgebeugt werden.

Um Licht tief in den Raum hineinzulassen und gleichzeitig für Blendschutz in Augenhöhe zu sorgen, kann ein von unten nach oben verstellbarer Sonnenschutz sinnvoll sein (siehe Abb. 2.22). Dieser lässt natürliches Licht auch in tiefere Raumzonen vordringen, während der notwendige Fensterbereich beschattet bleibt, um Blendung zu minimieren. Alternativ und nach vergleichbarem Ansatz können Jalousien in horizontalen Abschnitten geplant werden, die unabhängig voneinander geöffnet oder geschlossen werden können. So kann beispielsweise der obere

Bereich offen bleiben, während der untere geschlossen wird – oder umgekehrt. Diese flexible Steuerung ermöglicht eine präzisere Anpassung an die Licht- und Blendungsanforderungen im Raum. Im Winter ist die Blendefahr bei südorientierten Räumen bei niedrigem Sonnenstand um die Mittagszeit oft am größten, während die Sonne im Sommer um die Mittagszeit meist so hoch steht, dass die Blendefahr geringer ist. Im Sommer sollte der Wärmeeintrag im unteren Fensterbereich, durch den ohnehin verhältnismäßig wenig Tageslicht einfällt, minimiert werden. Auch hier bietet sich ein von unten nach oben verstellbarer oder zonierter Sonnenschutz an.

Der Sonnenschutz lässt weniger Tageslicht ein. Dies kann dazu führen, dass die empfohlene Beleuchtungsstärke im Innenraum nicht erreicht wird und so der elektrische Energieverbrauch aufgrund eingeschalteter Beleuchtung steigt. Im Heizfall kann der reduzierte Wärmeeintrag durch Sonnenlicht den Heizenergiebedarf erhöhen. Mehrere Studien zeigen, dass einmal heruntergefahrte Sonnenschutzsysteme häufig in dieser Position verbleiben, auch wenn sie nicht mehr benötigt werden [64].

Es ist empfehlenswert, Sonnenschutz in die Gebäudeautomation einzubinden, um die negativen Auswirkungen auf die Tageslichtverfügbarkeit und den Heizenergieverbrauch zu minimieren. Mit einer automatisierten Regelung kann der Sonnenschutz hochgefahren werden, sobald sensorbasiert festgestellt wird, dass kein Bedarf mehr besteht. Auf diese Weise kann eine Tageslichtsteuerung wie oben beschrieben (siehe Abschnitt „Lichtmanagement“ auf Seite 58), das Potenzial der

natürlichen Beleuchtung voll ausschöpfen und die Energieeffizienz maximieren. Die zur Steuerung bzw. Automatisierung des Sonnenschutzes eingesetzten Motoren können mit Photovoltaiksystemen kombiniert werden, um eine Eigenstromversorgung zu gewährleisten und den Installationsaufwand zu vereinfachen oder Kabelverlegearbeiten zu reduzieren.

Human Centric Lighting (HCL)

Um eine Beleuchtungsumgebung zu etablieren, die zur Verbesserung von Stimmung und Leistungsfähigkeit beiträgt, werden Regelungssysteme benötigt, die den zirkadianen (tagesperiodischen) Rhythmus berücksichtigen. Je nachdem wie stark die Beleuchtungsstrategien auf die Anpassung der Lichtverhältnisse an die Bedürfnisse des Menschen abzielen, spricht man von Human Centric Lighting (HCL). Für eine grundlegende Einführung wird der auf licht.de veröffentlichte Leitfaden zum Thema Human Centric Lighting (HCL) empfohlen [54].

HCL ist ein ganzheitlicher Ansatz, der darauf abzielt, die **visuellen, emotionalen und biologischen Lichtbedürfnisse des Menschen** zu erfüllen. Im Vordergrund steht eine Beleuchtung, die den zirkadianen Rhythmus unterstützen und stabilisieren soll. Die Beleuchtung soll den **Verlauf des natürlichen Tageslichts nachahmen**, indem vor allem Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur angepasst werden. Die Lichtsteuerung ist so automatisiert, dass die Anwesenden morgens durch kaltweißes Licht aktiviert werden und während des Arbeitstages eine Beleuchtungsstärke von 800 bis 1.000 lx auf Arbeitshöhe gewährleistet ist. Bis zum frühen Nachmittag sollte die Lichtfarbe mindestens 5.500 K betragen. Beleuchtungen mit einer Lichtfarbe von 6.500 K kommen dem Farbeindruck der Normlichtart D65 nahe, die als standardisierte Repräsentation von Tageslicht gilt [35]. Die biologische Wirkung von Standard-LEDs mit 6.500 K liegt bei etwa 85 % der Wirkung von Tageslicht D65. Am Abend sorgt warmes Licht mit einer geringeren Intensität von 2.700 K für eine entspannte Atmosphäre. Die Regelungsmöglichkeiten



Abb. 2.21: Beispiel für einen künstlichen Lichtverlauf nach dem Prinzip des Human Centric Lighting (HCL): Die künstliche Beleuchtung wird dem Lichtbedarf unserer inneren Uhr angepasst.

sind **technisch einfach umzusetzen** und fördern das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit. Im Einzelfall sind die budgetären Möglichkeiten abzuwägen.

Trotz der einfachen technischen Umsetzung sind einige Punkte zu beachten: Als einzige künstliche Lichtquelle können hohe Farbtemperaturen als unangenehm und unnatürlich empfunden werden. Daher empfiehlt sich eine Mischung aus direkter und indirekter Beleuchtung. Beispielsweise können Pendelleuchten die Decke beleuchten, so dass durch die Deckenreflexion eine indirekte Beleuchtung entsteht. Dies hellt den Raum auf, vergrößert ihn optisch („künstlicher Himmel“) und unterstützt die zylindrische Beleuchtung. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass das Auge für biologisch wirksames Licht besonders empfänglich ist, wenn der Einstrahlungswinkel etwas oberhalb der horizontalen Blickrichtung liegt. Daher eignen sich besonders in Blickrichtung liegende Decken und Wände als Flächen als indirekt beleuchtete, sekundäre Lichtquellen, um die Beleuchtungsstärke am Auge zu erhöhen.

Abends sind wärmere Farbtemperaturen von 2.700 K und Beleuchtungsstärken von 300 lx oder weniger wichtig, um mögliche negative Auswirkungen des Lichts auf Schlaf und Erholung zu verringern. Für Bildschirme gibt es beispielsweise ebenfalls Software und Apps (wie „Night Shift“ für iOS und „Nachtmodus“ für Android), die auf wärmere Farben umschalten und den Blaulichtanteil reduzieren, um die Lichtwirkung auf das biologische System zu verringern.

Automatische Regelungssysteme sorgen für ausgewogene Lichtverhältnisse, sparen Energie und reduzieren CO₂-Emissionen.

Energie sparen durch intelligente Beleuchtung

Beide Ansätze, die Tageslichtsteuerung und die Automatisierung des Ein- und Ausschaltens der Beleuchtung je nach anwesenden Personen, bieten ein erhebliches Energieeinsparpotenzial. Wie viel Energie genau gespart werden kann, hängt von den örtlichen Gegebenheiten wie der Beschattung durch Nachbargebäude, der Ausrichtung des Raums und dem Einsatz von Sonnenschutzsystemen ab.

Kaminska (2020) berichtet von einem Energieeinsparpotential von über 30 % durch Tageslichtsteuerung für nach Südosten ausgerichtete Klassenräume und einer Amortisationszeit von etwa zwei Jahren [48].

Ein weiteres Beispiel für Einsparpotenziale liefert eine Feldstudie, in der drei Systeme der Tageslichtsteuerung in drei Klassenräumen eines Schulgebäudes über einen Zeitraum von einem Jahr verglichen wurden [18]. Die Ergebnisse zeigen Energieeinsparungen von 18 %, 34 % und 46 % in den jeweiligen Klassenräumen über den beobachteten Zeitraum.

Laborversuche von Shackelford et al. (2020) bestätigen das Energieeinsparpotenzial: Durch den Einsatz einer tageslichtabhängigen Regelung in Kombination mit einem automatisierten Sonnenschutz in Büroräumen konnten Energieeinsparungen von 19 % in Räumen mit Südausrichtung und 24 % in Räumen mit Westausrichtung erzielt werden. Der automatisierte Sonnenschutz wurde gewählt, da ein heruntergelassener Sonnenschutz eine effektive Nutzung des Tages-

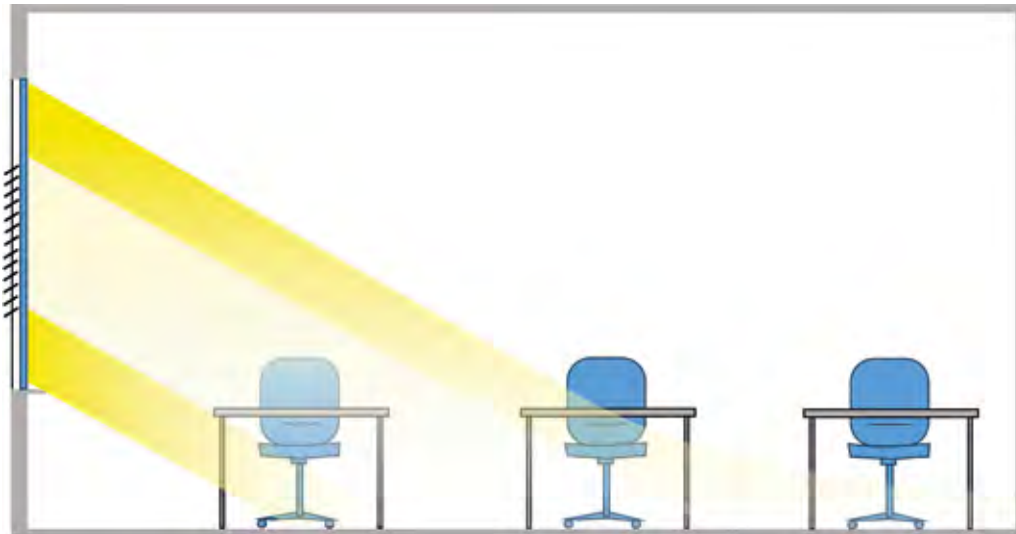


Abb. 2.22: Beispiel eines von unten nach oben verstellbaren Sonnenschutzes für eine verbesserte Tageslichtnutzung. Im Innenbereich sind solche Systeme häufig als verspannte Jalousien oder Plissees erhältlich. Diese lassen sich in beide Richtungen, von oben nach unten oder von unten nach oben bewegen. Im Außenbereich sind entsprechende Systeme wenig verbreitet. Eine Option sind Markisen mit **Gegenzugsystem** (z. B. von Solarmatic), die wahlweise schienen- oder seilgeführt und fest im unteren Fensterbereich installiert werden können.

lichts verhindert. Die erwarteten Amortisationszeiten liegen bei zwei bis fünf Jahren für Beleuchtungs- und Steuerungssysteme und bei etwa elf Jahren für Systeme mit zusätzlichem automatisiertem Sonnenschutz [72].

Neben der Energieeinsparung ist auch die Reduktion der CO₂-Emissionen ein wesentlicher Vorteil dieser Technologien, die mittlerweile als Stand der Technik gelten und technisch einfach umzusetzen sind.

**ESSENZ
für Eilige**

TEIL 2 Allgemeine Lösungsansätze

- ✓ Gute Luft setzt **richtiges Lüftungsverhalten** voraus. Dabei können z. B. die „20-5-20-Regel“ (alle 20 Minuten 5 Minuten Fenster öffnen) oder einfache Messgeräte wie CO₂-Ampeln helfen. **Raumlufttechnische Anlagen** sorgen für konstant gute Luft, wenn nicht ausreichend über die Fenster gelüftet werden kann. Sie erhalten das Raumklima auch bei kalten Außentemperaturen, filtern Schadstoffe aus der Luft und können je nach Ausstattung zur Wärmerückgewinnung oder sogar zur aktiven Kühlung eingesetzt werden.
- ✓ Bei akustischen Verbesserungen sollten die **für Sprache relevanten Frequenzen** berücksichtigt werden. Insbesondere lange Nachhallzeiten verschlechtern die Sprachverständlichkeit und den akustischen Komfort in einem Raum. Eine **Akustikdecke** ist eine einfach zu realisierende und wirksame Verbesserungsmaßnahme, die den Nachhall stark reduzieren kann.
- ✓ Beim **Lichtmanagement** spielen ausreichend Tageslicht, direkte und indirekte Beleuchtung, energiesparende Lösungen sowie Sonnen- und Blendschutz eine Rolle. Konzepte wie **Human Centric Lighting** berücksichtigen darüber hinaus den Biorhythmus des Menschen.





Teil 3 – SMART sanieren: Modularer Sanierungsansatz für Klassenräume

3.1 Wie und warum SMART sanieren?

3.2 Eine gute Kombination:
Deckenlüftungsgerät & Systemdecke

Wie lassen sich Klassenräume im Bestand klug sanieren? Mit einem vereinfachten modularen Sanierungsansatz können alle Einflussfaktoren auf den Innenraum kombiniert angegangen werden. Der hier vorgestellte Ansatz setzt bewusst auf praktikable Lösungen, die subjektiv und objektiv zu einer deutlichen Verbesserung des Lehr- und Lernklimas führen und sich flächendeckend umsetzen lassen.

3.1 Wie und warum SMART sanieren?

Häufig scheitern Sanierungspläne im Bestand, weil sie finanziell und/oder personell nicht gestemmt werden können oder sich schlicht nicht mit dem Schulalltag vereinbaren lassen. Ebenso kommt es vor, dass zwar saniert wird, aber wichtige Faktoren übersehen werden. Ein SMARTer Ansatz kann das ändern.

Erfolgreiche Sanierungslösungen müssen flächendeckend und einfach umsetzbar sein.

Für ein besseres Lehr- und Lernklima in Klassenräumen und um Defizite im Bestand in den Bereichen Luftqualität, Raumakustik und Beleuchtung zu beheben, sind umfassende, praxistaugliche Sanierungslösungen erforderlich. Diese sollten sich einerseits an den individuellen räumlichen Gegebenheiten orientieren, andererseits aber so universell sein, dass sie mit möglichst geringem (Vor-)Planungsaufwand auf eine Vielzahl unterschiedlicher Klassenräume anwendbar sind.

33.000 Schulen – 33.000 Leuchtturmprojekte?

Einzelne Vorzeige- und Leuchtturmprojekte zeigen, dass gesundheitsfördernde Klassenräume umsetzbar sind. Mit einer Bestandsaufnahme und messtechnischen Erfassung des Status quo, entsprechendem planerischem Vorlauf, ausreichenden finanziellen Mitteln und genügend Zeit für die bauliche Umsetzung der Maßnahmen lassen sich nicht nur die in Teil 2 vorgestellten Lösungsansätze für sehr gute Luftqualität, Sprachverständlichkeit und Beleuchtung kombinieren – das Ergebnis kann auch optisch sehr ansprechend sein und den Verantwortlichen weiteren Gestaltungsspielraum lassen. Die dafür notwendigen finanziellen Möglichkeiten und Mittel sind jedoch nur in Ausnahmefällen vorhanden.

Ein Blick auf die Gesamtsituation in Deutschland macht das tatsächliche Ausmaß der Herausforderung deutlich: Von den über 32.758 allgemeinbildenden Schulen [84] (Berufsschulen noch nicht eingeschlossen) ist nach Angaben der Kommunen jede zweite sanierungsbedürftig [11]. Selbst wenn es weder an personellen, noch an finanziellen Ressourcen fehlen würde, könnte eine flächendeckende Klassenraumsanierung viele Jahrzehnte dauern.

Mit Good Practice losgehen statt Best Practice aufschieben

Wenn neben den Leuchtturmprojekten und der Suche nach perfekten Lösungen nicht ein Großteil der sanierungsbedürftigen Schulen auf der Strecke bleiben soll, ist ein Schritt nach vorne notwendig. Insofern sollte gewerke- und herstellerübergreifend, mit Schulträgern und Politik offen die Umsetzung gemäß Pareto-Prinzip („80-20-Regel“) diskutiert werden, wie sie beispielhaft in Teil 4 vorgestellt wird.

Wenn sich mit einer guten und universellen Lösung die Innenraumbedingungen in Klassenräumen in Deutschland bereits um 80 % verbessern ließen, wäre es ein gangbarer Weg, jetzt damit anzufangen und die restlichen 20 % nur (oder erst, aber spätestens) dann nachzuholen, wenn es die Mittel erlauben? Also mit einem möglichst pragmatischen Sanierungsansatz loszugehen, der vielleicht nicht auf jeden einzelnen Klassenraum im Bestand anwendbar ist, aber bereits 80 % der Räume abdeckt und nur noch 20 % der Räume für eine aufwendigere individuelle Planung übrig lässt?

Anforderungen an die SMARTe Sanierung

Ein pragmatischer Sanierungsansatz sollte sich durch folgende Aspekte auszeichnen:

S	Schnell und ohne nennenswerte Unterrichtsausfälle umsetzbar	A	Anpassungsfähig an verschiedene räumliche Gegebenheiten
M	Modular, um Lüftungsgerät, Akustik-elemente und Beleuchtung nach dem Baukastenprinzip flexibel positionieren und herstellerunabhängig kombinieren oder auch um nur einzelne Aspekte verbessern zu können – etwa dann, wenn bereits eine neuartige Beleuchtung oder eine Systemdecke vorhanden sind	R	Reduzierter Vorplanungsaufwand und gleichzeitig hohes Maß an Universalität, um die flächendeckende Umsetzung zu ermöglichen
		T	Temperatur, Luft, Licht und Akustik gleichzeitig adressieren und das Lehr- und Lernklima integral verbessern



Den gemeinsamen Nenner finden

Um einen solchen möglichst universellen Sanierungsansatz entwickeln zu können, gilt es, zunächst Gemeinsamkeiten der im Detail teilweise sehr unterschiedlich ausgestatteten Klassenräume zu identifizieren: Unabhängig von der Ausstattung werden viele Klassenräume regelmäßig mit hoher Belegungsdichte genutzt. Dadurch ist die nutzbare Grund- bzw. **Verkehrsfläche in Klassenräumen stark eingeschränkt** (siehe etwa Abb. 3.1). Die weiter steigenden Einschulungszahlen [81][83] sollen zwar mittelfristig auch durch Schulneubauten aufgefangen werden, dürften aber zunächst die Belegungsdichten noch weiter erhöhen und somit bestehende Defizite im Luftqualitätsmanagement und der Klassenraumakustik im Bestand verschärfen.

Während in vielen Kurs- und Oberstufenräumen der weiterführenden Schulen sowie in Fachräumen aufgrund ständig wechselnder Belegung in der Regel weniger Mobiliar oder

längerfristiger Stauraum benötigt wird, sind insbesondere in Grundschulen und in den Räumen von festen Klassenverbänden viele Wandflächen durch Regale, Schränke und Aushänge belegt. Dagegen steht – von Ausnahmefällen abgesehen – in fast allen Klassenräumen die **Deckenfläche für bauliche Maßnahmen zur Verfügung**.

Die Klassenraumdecke für Sanierungsmaßnahmen nutzen

Bei der Sanierung von Klassenräumen kann die Decke gleichzeitig für drei Aspekte genutzt werden:

1) **Bessere Luftqualität**

Wenn es die statischen Gegebenheiten zulassen, wird der **Einbau eines Deckenlüftungsgeräts** empfohlen. Ist dies nicht möglich oder erwünscht, kann auch ein Standlüftungsgerät oder eine andere gleichwertige Lösung eingesetzt werden. Dies reduziert jedoch die nutzbare Stellfläche.

Fast immer kann die Deckenfläche für Sanierungsmaßnahmen genutzt werden. SMARTe Umbauten können Luftqualität, Akustik und Beleuchtung gleichzeitig verbessern.

2) **Bessere Akustik**

Parallel zu einem Deckenlüftungsgerät kann an der Decke eine große **akustisch wirksame Absorptionsfläche** (Systemdecke, Akustikbaffel und vergleichbare Flächenelemente, Deckensegel, o. ä. ...) untergebracht werden. Zur weiteren Verbesserung der Sprachverständlichkeit kann diese Absorptionsfläche gezielt mit reflektierenden Oberflächen kombiniert werden. Falls notwendig, möglich und finanziell stemmbar kann sie in einem weiteren Schritt flexibel um Wandabsorber ergänzt werden.

3) **Bessere Beleuchtung**

Moderne (**LED-**)**Beleuchtung** in Kombination mit Anwesenheits- und Tageslichtsensoren sollte zeitgleich mit den Maßnahmen 1) und 2) geplant und sinnvoll mit Deckenlüftungsgeräten und den gewählten Akustikmaßnahmen kombiniert werden.

Ein SMARTer Sanierungsansatz bringt schnelle und wichtige Verbesserungen mit geringem Planungsaufwand und adressiert Temperatur, Luft, Licht und Akustik gleichzeitig.



Abb. 3.1: Oft ist die Decke die einzig freie nutzbare Fläche im Klassenraum und Standlüftungsgeräte oder Luftreinigung können nur mit viel Mühe untergebracht werden. Deckenlüftungsgeräte können dieses Problem lösen.

3.2 Eine gute Kombination: Deckenlüftungsgerät & Systemdecke

Im Folgenden wird ein vereinfachter Sanierungsansatz vorgestellt und beispielhaft für verschiedene Klassenraum-Szenarien durchgespielt. Der vorgestellte Ansatz erfordert ausschließlich Baumaßnahmen im Deckenbereich. Dies macht ihn für die meisten Klassenräume zu einer sinnvollen und leicht umsetzbaren Lösung. Kernelemente der Sanierungsmaßnahme sind eine Systemdecke und ein Deckenlüftungsgerät. Diese Ein- und Umbauten verbessern gleichzeitig Luftqualität, Licht und Akustik im Klassenraum.

Systemdecken als Baukasten für Beleuchtung und Akustik

Eine Systemdecke ist eine einfache, kostengünstige und schnell realisierbare Möglichkeit, um akustische Absorptionsflächen in die Klassenraumdecke einzubringen. Dabei handelt es sich um ein von der Rohdecke abgehängtes Tragschienensystem, in das Leuchten, absorbierende Akustikpaneele wie Mineralfaserplatten und gezielt schallreflektierende Elemente eingelegt werden können.

Diese Art der Deckennutzung hat sich seit vielen Jahrzehnten bewährt. Sie kann flächendeckend und schnell umgesetzt werden und bietet dabei ein hohes Maß an Modularität und Flexibilität. Auch gestalterisch bietet sie Spielraum und hat ihr Image als „Supermarktdecke“ längst hinter sich gelassen. Tragschienen in sichtbarer, halbverdeckter oder verdeckter Ausführung sorgen für Gestaltungsmöglichkeiten, quadratische und rechteckige Elemente können kreativ kombiniert werden. Akustikpaneele können sich neben ihren Absorptionseigenschaften auch in Farbe und Oberflächenbeschaffenheit unterscheiden.

Für den Fall, dass alle genannten Innenraumparameter gleichzeitig verbessert werden sollen und dafür die Klassenraumdecke genutzt werden soll, zeigen die Flussdiagramme in Abb. 3.2 bis Abb. 3.4 zusammenfassend mögliche Ausgangssituationen und dazu passende Sanierungslösungen, die im Folgenden näher betrachtet werden. Abb. 3.7 fasst alle Schritte zusammen.

Zugunsten der Universalität wird dabei ausdrücklich nicht die in jeder Hinsicht perfekte, sondern eine mögliche gute und praxistaugliche Lösung angestrebt, die mit geringem individuellen (Vor-)Planungsaufwand sowie begrenztem Budget in sehr kurzer Zeit realisierbar ist und durch weitere Maßnahmen wie Wandabsorber ergänzt werden kann.

Systemdecken sind flexibel und erlauben die weitere Ausstattung nach dem Baukastenprinzip.

TIPP

Universelles Grundraster wählen

Für das Sanieren von Räumen, in denen noch keine abgehängte Decke installiert oder anderweitig für hinreichend gute Klassenraumakustik gesorgt ist, wird eine Systemdecke mit einem Grundraster von 625 mm vorgeschlagen. Dieses Grundraster ermöglicht eine weitgehend hersteller- und gewerkeunabhängige Bestückung mit Akustikpaneelen und LED-Einlegeleuchten nach dem Baukastenprinzip. Mit welcher Fläche und auf welcher Höhe die Decke abgehängt wird, richtet sich nach den räumlichen Gegebenheiten.



Welche Lösung passt zum Raum?

Bei der Suche nach der passenden Lösung zu den individuellen Gegebenheiten hilft die Beantwortung der folgenden vier Leitfragen. Die entsprechenden Sanierungspfade sind in Abb. 3.7 visualisiert.

LEITFRAGE 1

Gibt es bereits eine passende Systemdecke?

Zunächst wird die Ausgangslage bezüglich der Decke betrachtet: Ist bereits eine Systemdecke vorhanden? Wenn ja, können und sollen das bestehende Abhänger- bzw. Tragschienensystem und/oder die bisherigen Akustikpaneele weiterverwendet werden? Falls ja, sollte sichergestellt werden, dass diese nicht im Laufe der Zeit ihre akustischen Eigenschaften eingebüßt haben oder überstrichen wurden. Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten (siehe Abb. 3.2):

W (Weiternutzung der vorhandenen Systemdecke): Die bisherige Systemdecke soll (und kann) weitergenutzt werden.

R (Rohdecke mit neuer Systemdecke): Der Raum hat entweder noch keine Systemdecke oder eine vorhandene Systemdecke

wird komplett zurückgebaut und entsorgt, so dass als Ausgangssituation ebenfalls von einer Rohdecke ausgegangen werden kann.

LEITFRAGE 2

Wie soll die (neue) Systemdecke nach der Sanierung aussehen?

Wird die vorhandene Systemdecke rückgebaut oder handelt es sich im Ausgangszustand ohnehin um eine blanke Rohdecke, kann die neue Systemdecke geplant werden. Dabei sollten folgende Punkte beachtet werden:

Eine Systemdecke hat eine **Mindestabhängehöhe**. Diese kann von der Rohdecke, dem Abhänger- bzw. Tragschienensystem sowie den gewünschten Platten abhängen. Um Einbußen in der akustischen Wirksamkeit zu vermeiden und eine reibungslose Aufhängung zu gewährleisten, sind die jeweiligen Herstellerangaben zu beachten (Beispiel: 75 bis 100 mm; für die bequeme Demontage der Platten 120 mm Abstand zur Rohdecke).

Die **lichte Raumhöhe sollte nicht zu stark verkleinert** werden, um das (pro Person) zur Verfügung stehende Luftvolumen sowie die thermisch aktivierbare Masse nicht zu stark

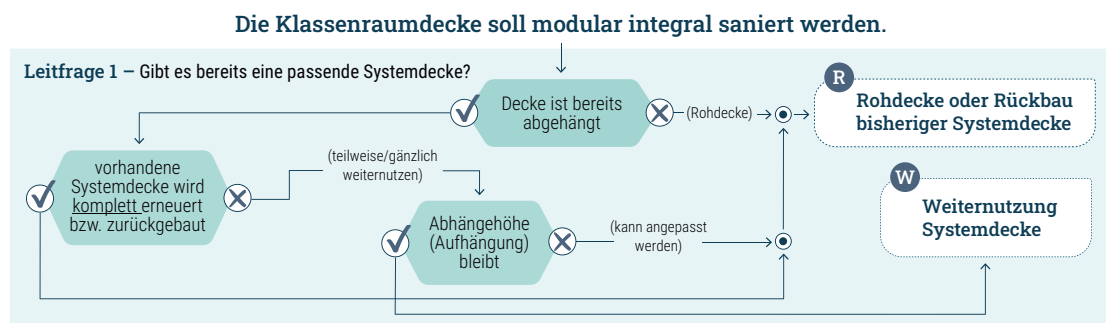


Abb. 3.2: Überprüfung der Beschaffenheit der Klassenraumdecke vor Beginn der geplanten Sanierungsmaßnahmen (Leitfrage 1).

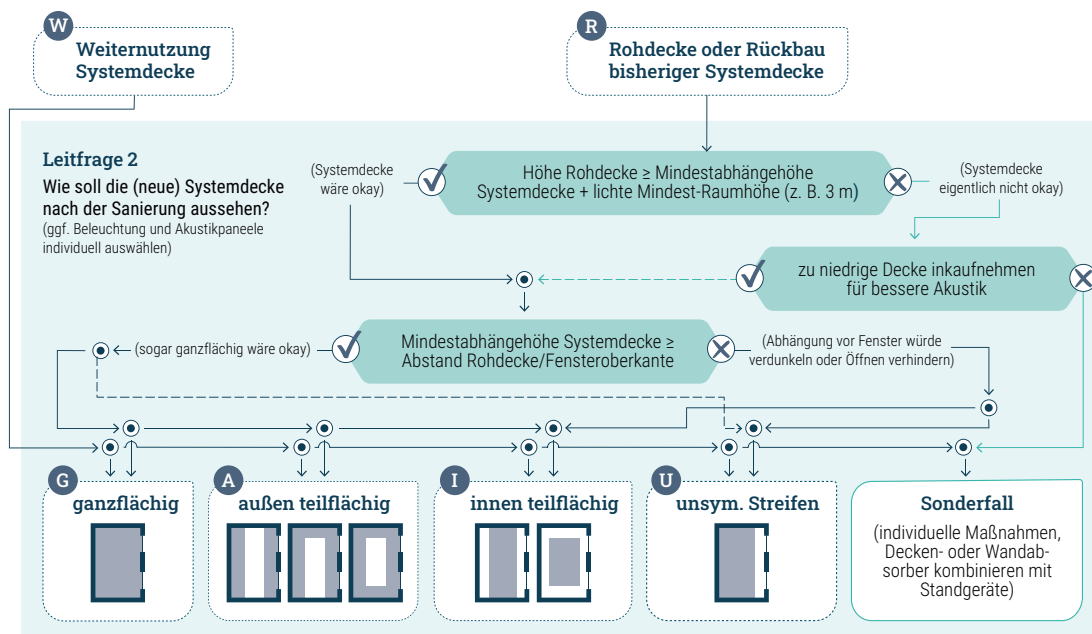


Abb. 3.3: Auswahl der Weiternutzung (Fall „W“) oder Rohdecke/Rückbau (Fall „R“) einer Systemdecke in Abhängigkeit ihrer Mindestabhängehöhe sowie der Empfehlung zur lichten Mindest-Raumhöhe (Leitfrage 2).

zu reduzieren und den Raum nicht zu gedrungen wirken zu lassen. Während die Arbeitsstättenverordnung keine konkreten Angaben zur lichten Mindestraumhöhe macht (siehe auch Kom-Net-Anfrage vom 13.09.2016 [51]), gibt die ASR A1.2 „Raumabmessungen und Bewegungsflächen“ abhängig von der Grundfläche eine Mindesthöhe von 2,5 m (bis 50 m²), 2,75 m (50 bis 100 m²) bzw. 3 m (100 bis 2000 m²) vor [90]. An anderer Stelle wird als lichte Raumhöhe für Klassenräume mindestens 3 m empfohlen [20][57].

Diese Richtwerte geben zusammen mit der Höhe der Rohdecke Aufschluss darüber, ob die Installation einer Systemdecke zulässig ist. Falls ja, muss geprüft werden, ob die Systemdecke bei Einhaltung ihrer Mindestabhängehöhe Fenster oder Oberlichter verdecken bzw. deren Öffnen oder Kippen verhindern würde. Davon abhängig ergeben sich vier Möglichkeiten für den Einbau einer Systemdecke (siehe Abb. 3.3):

G (ganzflächig): Die Systemdecke wird ganzflächig bis an die umlaufenden Wände installiert.

A (außen): Die Systemdecke wird außenliegend bzw. entlang einer oder mehrerer Wände installiert. Dabei wird in der Raummitte ein Bereich schallreflektierender Rohdecke ausgespart.

I (innen): Die Systemdecke wird als Insel- oder Streifenlösung geplant und spart mindestens zwei Wände aus. Dadurch verbleiben außen nicht abgedeckte Bereiche der Rohdecke. Insbesondere bei Klassenräumen mit Fenstern oder Glasflächen an mehreren Seiten (z. B. zum Flurbereich oder bei mehreren Außenwänden) können umlaufende Aussparungen erforderlich sein.

U (unsymmetrischer Streifen): In diesem Fall wird vor den Fenstern ein einzelner Streifen der Systemdecke ausgespart, um z. B. das Öffnen oder Kippen angrenzender Fenster weiterhin zu ermöglichen und Schattenwurf zu vermeiden.

Welche Ausführung im Einzelfall gewählt wird, sollte unter Berücksichtigung der Raumakustik, der Platzierung von Leuchten und des Deckenlüftungsgeräts sowie gestalterischen Aspekten entschieden werden.

Eine **ganzflächige Installation der Systemdecke** ermöglicht die flexible Aufnahme und Positionierung von Einlegeleuchten. Sie lässt sich manchmal mit weniger Aufwand realisieren als eine teilflächige Installation, da bei einer direkten Montage der Profile an der Wand keine seitlichen Abkofferungen oder vergleichbare Maßnahmen notwendig sind.

Wird eine **teilflächige Systemdecke** realisiert und das Deckenlüftungsgerät beispielsweise an der Raumseite gegenüber der Tafel installiert, kann das Vorteile bei der Belüftung bringen: Eine Systemdecke als durchgehender Streifen zwischen Lüftungsgerät und Tafelwand kann ein Entlangströmen der Zuluft entlang der Decke begünstigen, bevor sie in den Raum absinkt und als Walze zurückströmt (siehe Infobox zu „Coandă-Effekt“ auf Seite 42).

Insgesamt sollten die Position und die Größe der Systemdecke so gewählt werden, dass

- **hinreichend akustisch wirksame Absorberfläche** installiert werden kann. Um die raumakustischen Anforderungen einzuhalten, ist zu prüfen, ob ergänzende

Maßnahmen an Wandflächen erforderlich sind.

- die zu installierenden Einlegeleuchten den Raum **ausreichend und gleichmäßig ausleuchten** können. Während Anforderungen an Lichtstärke und Gleichmäßigkeit in unbelegten Randbereichen lokal unterschritten werden dürfen, sollten sie im Aufenthaltsbereich eingehalten werden. Werden die geforderten Beleuchtungsstärken an der Position des Lüftungsgeräts oder in Bereichen, wo keine Systemdecke installiert ist, lokal unterschritten, können zusätzlich (Pendel-)Leuchten angebracht werden.
- **keine Fenster oder Oberlichter verdeckt** werden oder es zu Schattenwurf kommt
- durch die Anwesenden **manuelles Lüften über die Fenster jederzeit möglich** bleibt.

LEITFRAGE 3

Wo wird das Deckenlüftungsgerät installiert?

Beim Einsatz eines Deckenlüftungsgeräts ist zunächst sicherzustellen, dass die Installation aus statischer Sicht zulässig ist (siehe Abb. 3.4). In Bezug auf Außen- bzw. Fensterwände sind folgende Fälle denkbar:

0 (Positionierung nicht an Fensterwand):

Anstelle einer Fensterwand kommt in vielen Klassenräumen die der Tafel gegenüberliegende Klassenraumrückwand für die Installation eines Lüftungsgeräts infrage. Ist diese Wand gleichzeitig eine Außenwand, können die Luftkanäle für Fort- und Außenluft direkt durch die Wand geführt werden. Handelt es

sich dagegen um eine Innenwand, sollte das Gerät mit etwas Abstand zur Wand aufgehängt werden. Mithilfe von 90°-Bögen kann die Verrohrung dann seitlich zur nächsten Außenwand (oder Außendecke) geführt werden.

1 (Positionierung an Fensterwand): Die Aufhängung an einer Außenwand mit Fenstern ist möglich und kann die Länge der Luftleitungen reduzieren.

Allgemein ist empfehlenswert, die Wege für die Luftkanäle zur Außenluftanbindung kurz zu halten (siehe Abschnitt zum „Anschluss und Anbindung von Lüftungsgeräten“ auf Seite 75). Darüber hinaus ist zu beachten,

dass Lüftungsgeräte besonders im Betrieb mit höheren Volumenströmen durch leichtes Rauschen zum Hintergrundgeräuschpegel beitragen können. Das muss nicht unbedingt als laut oder störend empfunden werden und ist häufig kaum wahrnehmbar. Dennoch kann es vorteilhaft sein, diese zusätzliche Störgeräuschquelle nicht zwischen der sprechenden und der zuhörenden Person zu platzieren. Bei der endgültigen Positionierung des Lüftungsgeräts sind neben den jeweiligen räumlichen Gegebenheiten wie Unterzügen, Fensterpositionen, Lage der Außenwände etc. auch die Herstellerempfehlungen für eine möglichst gute Durchströmung des Raums zu berücksichtigen.

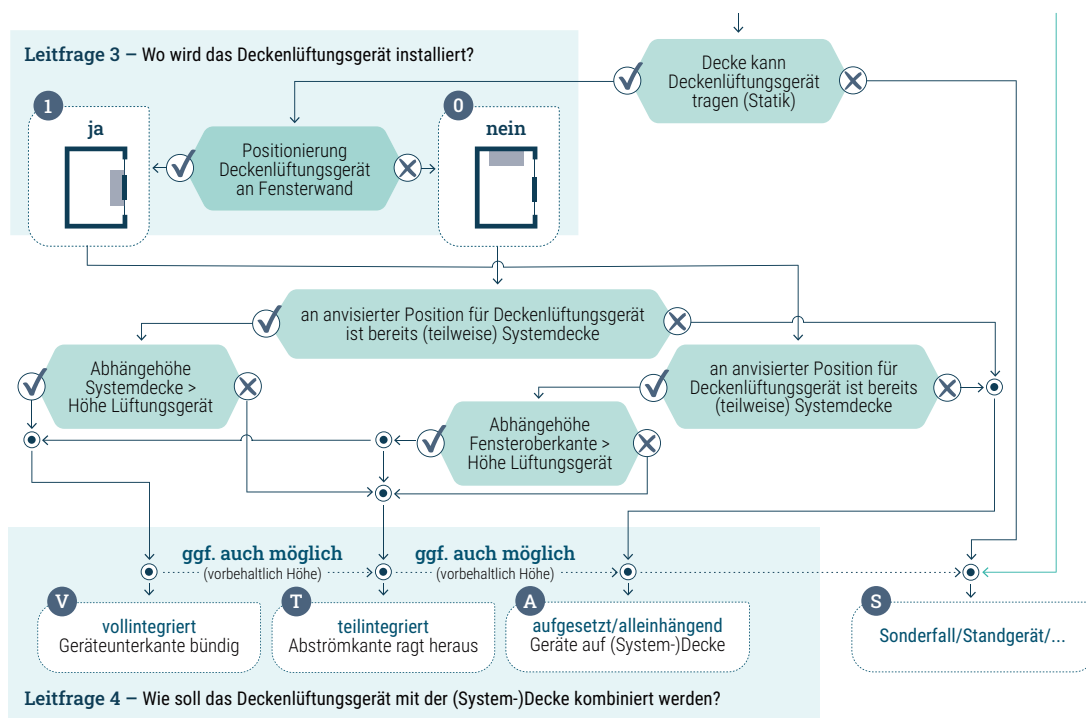


Abb. 3.4: Überprüfung der Tragfähigkeit der Decke (Statik) sowie Möglichkeiten zur Positionierung des Deckenlüftungsgeräts in Abhängigkeit von Fenstern (Leitfrage 3) und Integration in eine Systemdecke (Leitfrage 4).

Wie soll das Deckenlüftungsgerät mit der (System-)Decke kombiniert werden?

Ist an der für das Deckenlüftungsgerät vorgesehenen Position bereits eine Systemdecke (teilweise) vorhanden oder deren Installation geplant, können Gerät und Decke auf verschiedene Weise kombiniert werden (siehe Abb. 3.4). Das genaue Vorgehen hängt von der Höhe des Lüftungsgeräts und der Abhängenhöhe der Systemdecke ab. Auch hier sind die Herstellerangaben zu berücksichtigen und es ist zu prüfen, ob das Gerät für die geplante Installation vorgesehen ist und ob Zubehör wie Abströmbleche benötigt wird. Zusätzlich sind Luftkanäle für Außenluft und Fortluft vorzusehen (siehe Abschnitt zum „Anschluss und Anbindung von Lüftungsgeräten“ auf Seite 75). Generell wird zwischen vollintegrierten, teilintegrierten und aufgesetzten Lösungen unterschieden.

V (vollintegriert): Wenn die Höhe des Lüftungsgeräts geringer ist als die Abhängenhöhe der Systemdecke, kann das Lüftungsgerät vollständig in die abgehängte Decke integriert werden. Es schließt dann bündig mit der Systemdecke ab. Der Vorteil gegenüber einer Teilintegration ist, dass sich der meist horizontal in den Raum eingebrachte Zuluftvolumenstrom direkt an die Decke anschmiegen kann (siehe Infobox zum „Coandă-Effekt“ auf Seite 42). Falls andere Gründe gegen eine Vollintegration sprechen, ist auch bei schlanken Lüftungsgeräten die Teilintegration durch eine tiefere Abhängung des Geräts oder eine aufgesetzte Installation möglich (siehe folgende Abschnitte). Grundsätzlich ist zu beachten, dass nicht alle Geräte für eine Vollintegration vorgesehen sind.

T (teilintegriert): Ist das Lüftungsgerät höher als der Abstand zwischen Rohdecke und Höhe der Systemdecke, wird es teilintegriert und ragt nach dem Einbau aus der Systemdecke heraus. Auch für den Fall, dass eigentlich eine Vollintegration mit bündiger Installation einer Systemdecke in Höhe der Geräteunterkante angedacht wäre, aber dies die lichte Höhe des Raums zu stark reduzieren würde, kann eine Teilintegration erforderlich sein. Allgemein sollte das eingesetzte Gerät für diese Art des Einbaus zugelassen und geeignet sein, damit trotz des Versatzes ein Anschmiegen der Zuluftströmung an die Decke gewährleistet ist.

A (aufgesetzt/alleinhängend): Auch das Aufsetzen eines Deckenlüftungsgeräts auf die Roh- oder Systemdecke ist möglich. Die Luftkanäle werden dabei in der Regel sichtbar geführt. Bei der Positionierung von Leuchten ist dann auf Verschattung und Reflexion sowie auf die einzuhaltende Gleichmäßigkeit zu achten.

S (Sonderfall/Sonstiges/Standgerät): Neben Deckenlüftungsgeräten können alternativ auch Standgeräte eingesetzt werden. Diese werden meist an einer Innenwand installiert und zum Beispiel an der Rückwand eines Klassenraums nahe der Fassade aufgestellt. Die Installation ist daher in der Regel zwar weniger aufwendig als bei Deckenlüftungsgeräten – reduziert aber die Nutzfläche des Raums. Genau wie bei Deckenlüftungsgeräten müssen Luftkanäle für Außenluft und Fortluft durch die Wand und/oder Decke geführt werden (siehe Abschnitt zum „Anschluss und Anbindung von Lüftungsgeräten“ auf Seite 75). Standgeräte arbeiten nach dem Mischlüftungs- oder Quelllüftungs-

prinzip (siehe Seite 43). Die Art der Luftführung ist bei der Wahl des Aufstellungsortes individuell zu berücksichtigen. Der Einsatz von Wand-, Brüstungs-, Fassaden-, Unterflur- und anderen Geräten, Bauformen und Installationsarten ist ebenfalls denkbar, wird aber im Rahmen dieses Leitfadens nicht weiter thematisiert.

Ist bereits eine Systemdecke vorhanden, muss diese sowohl bei der Teil- als auch bei der Vollintegration zunächst lokal rückgebaut und das Lüftungsgerät in die Decke eingebaut werden. Während die spätere (Re-)Installation durch einen Trockenbauer erfolgen sollte, kann der lokale Rückbau unter Umständen durch ein anderes Gewerk erfolgen. Je nach Einbausituation sollte dabei besonders auf den Platzbedarf potenziell benötigter Anschlussstücke und (90°-)Bögen der Lüftungskanäle geachtet werden.

Anschluss und Anbindung von Lüftungsgeräten

Damit Lüftungsgeräte den Luftaustausch unterstützen können, müssen Luftkanäle für die Außen- und Fortluft (siehe Abb. 2.5) vorgesehen werden. Wie und wo diese nach außen geführt werden, hängt vom Installationsort im Raum und davon ab, ob es sich bei den angrenzenden Flächen um Außenwände bzw. eine Außendecke handelt. In jedem Fall sind die statischen Gegebenheiten zu prüfen und zu berücksichtigen.

- Sollen die Luftkanäle **durch ein Fenster oder ein Oberlicht** nach außen geführt werden, müssen vorhandene Verglasungen zurückgebaut oder verkleinert und durch entsprechende Module bzw. Isopa-



Abb. 3.5: Kernbohrung zur Durchführung von Lüftungskanälen durch das Mauerwerk.

neer ersetzt werden. Dadurch kann sich der Tageslicht-Einfall verringern.

- Bei einer **direkten Wand- oder Deckendurchführung** sind zwei Kernbohrungen erforderlich. Bei einer Außenwand wird außen ein Wetterschutzgitter, bei einem Deckendurchgang eine Deflektorhaube vorgesehen und anschließend alles gegen Wärmeverluste gedämmt und gegen Wassereintritt abgedichtet.

Nach dem elektrischen Anschluss des Lüftungsgeräts – und bei Geräten mit Wasser-Luft-Wärmeübertrager auch der hydraulischen Einbindung in einen Warmwasserkreislauf – kann die Systemdecke bis an das Gerät heran (re-)installiert werden. Bei Bedarf erfolgen abschließend der Austausch bzw. die Installation der Beleuchtung sowie die Installation von Tageslicht- und Präsenzsensoren bzw. Bedienelementen.



TIPP

Deckenlüftungsgerät & Systemdecke in einem Schritt installieren

Im gleichen baulichen Schritt mit der Systemdecke kann ein Deckenlüftungsgerät eingebaut werden – je nach den räumlichen Gegebenheiten als vollintegrierte, teilintegrierte oder alleinhängende Lösung.

Kleine Entscheidungshilfe (Sanierungs-ABC)

Durch die Kombination der beiden möglichen Ausgangssituationen der Decke vor der Sanierung mit den vier verschiedenen Ausführungen/Positionierungen einer Systemdecke, der Frage nach der Positionierung des Deckenlüftungsgeräts an einer Fensterwand und den drei möglichen Kombinationen von Deckenlüftungsgerät und (System-)Decke ergeben sich verschiedene Sanierungslösungen.

Diese Lösungen können entsprechend Abb. 3.6 eindeutig durch eine individuelle Buchstaben-Zahlen-Kombination (z. B. W-G0V, R-I1V, ...) gekennzeichnet werden. Der Sonderfall „S“ umfasst alle sonstigen Szenarien, die durch diesen Ansatz nicht abgedeckt werden und individuell betrachtet werden müssen. Ein Großteil der Klassenräume im Bestand sollte jedoch bereits abgedeckt sein.

Sanierungsschlüssel	
Gibt es bereits eine passende Systemdecke?	
- R: nein (Rohdecke oder Rückbau bisheriger Systemdecke)	
- W: ja (Weiternutzung vorhandener Systemdecke)	
Wie ist die Systemdecke geplant/ausgeführt?	
- G: ganzflächig	
- A: teilflächig (außen)	
- I: teilflächig (innen)	
- U: unsymmetrischer Streifen bzw. einseitige Aussparung	
Wo wird das Deckenlüftungsgerät installiert?	
- 0: nicht an einer Fensterwand	
- 1: an einer Fensterwand	
Wie soll das Deckenlüftungsgerät mit der (System-)Decke kombiniert werden?	
- V: vollintegriert	
- T: teilintegriert	
- A: aufgesetzt/alleinhängend	

Abb. 3.6: Welche Sanierungsschritte sich im konkreten Fall empfehlen, zeigen die Antworten auf die obigen Leitfragen. Aus den Antworten ergeben sich eindeutige Buchstaben-Zahlen-Kombinationen, die jeweils für eine Sanierungslösung stehen. Alle nicht abgedeckten Szenarien sind im Sonderfall „S“ zusammengefasst.

Nach der Inbetriebnahme sollten die Schulleitung, Lehrkräfte und Hausmeister:innen unbedingt eine Einführung erhalten, bei der die Nutzung und Vorteile der neuen Ausstattung erklärt werden. Stundenpläne, Volumenströme und Grenzwerte können individuell im Gerät hinterlegt werden. Ist ein Schulnetzwerk vorhanden, können Lüftungsgeräte auf Wunsch in dieses eingebunden werden, so dass die Geräteparameter überwacht und Einstellungen (etwa bei Änderungen des Stundenplans, zusätzlichem Nachmittagsunterricht bzw. anderer Raumnutzung) von der Schule selbst vorgenommen werden können. Auch die Wartung sollte gut geplant werden – für dauerhaft gute Luft. Der jährliche Filterwechsel kann oft direkt von der Haustechnik übernommen werden. Darüber hinaus gehende Wartungsarbeiten in vom Hersteller vorgegebenen Intervallen können externe Wartungsfirmen übernehmen.

Einige Praxisbeispiele verschiedener Hersteller sind in Abb. 3.8 bis Abb. 3.15 dargestellt.

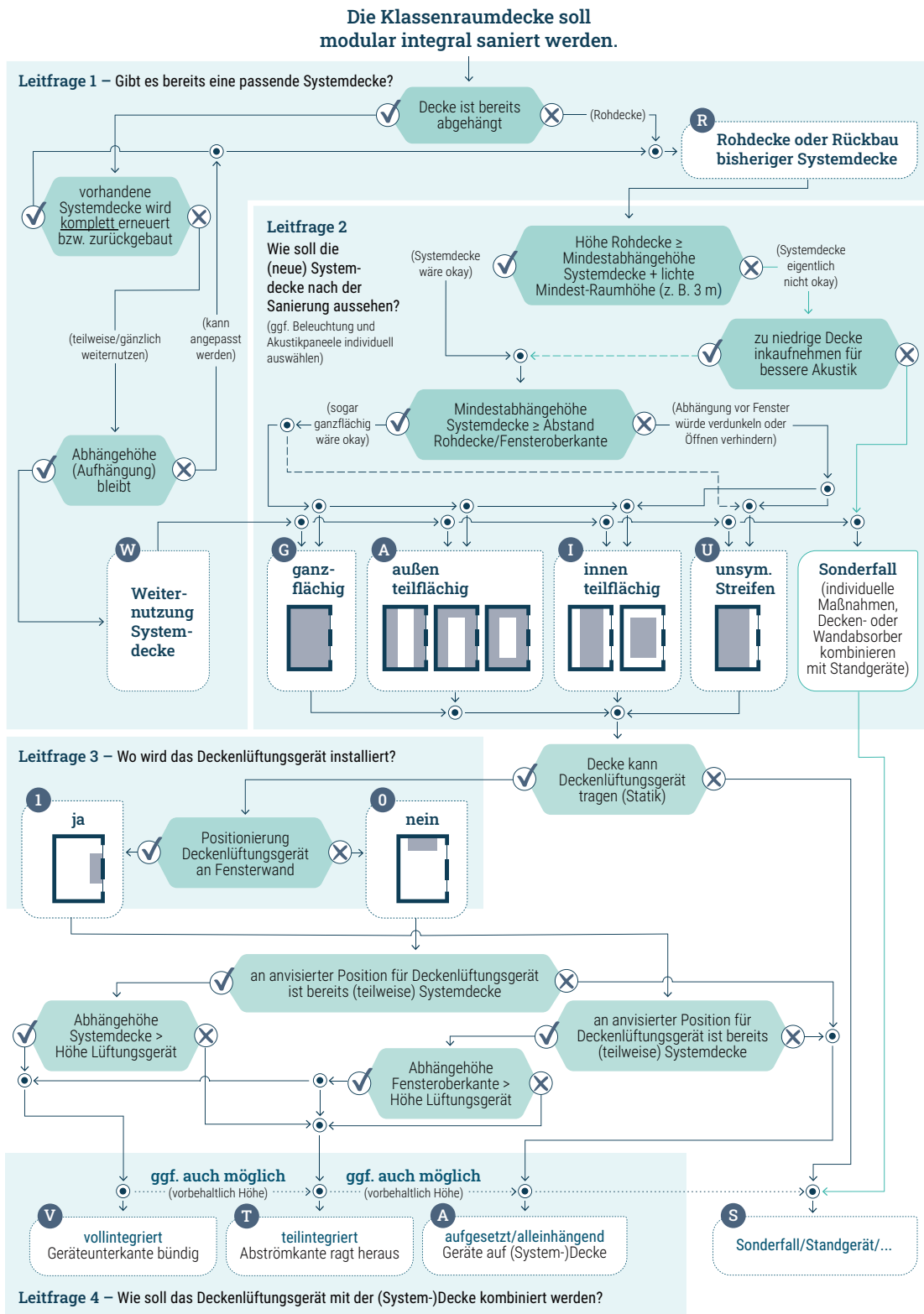


Abb. 3.7: Mögliche Sanierungspfade: Flussdiagramm zum vorgestellten Sanierungsansatz mit verschiedenen Möglichkeiten zur Installation eines Deckenlüftungsgeräts in Kombination mit einer Systemdecke zur Verbesserung von Raumakustik und Beleuchtung.

Beispiele für installierte Deckenlüftungsgeräte sowie ein Standgerät verschiedener Hersteller in unterschiedlichen Räumen.



Abb. 3.8: Flächig vollintegriertes Deckenlüftungsgerät (TROX GmbH) mit unsichtbarer Rohrführung durch die Decke in einem Musikraum (Fall W-G0V, Seite 85).



Abb. 3.9: 2/3-Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts (© Airflow Lufttechnik GmbH) in ganzflächiger Akustikdecke (Schulzentrum Much) [1].



Abb. 3.10: 1/3-Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts (© Airflow Lufttechnik GmbH) in Systemdecke mit abgekofferter Rohrführung durch Fensterwand (Rachel-Carson-Schule, Dormagen) [2].



Abb. 3.11: Teilintegriertes Deckenlüftungsgerät (tecalor GmbH) in Systemdecke an Raumrückseite mit unsichtbarer Rohrführung durch angrenzende Wand (TSA Bildung und Soziales gGmbH, Jena).



Abb. 3.12: Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts (TROX GmbH) in die Systemdecke mit Aussparung entlang der Fensterwand zum Öffnen der Oberlichter mit unsichtbarer Rohrführung durch die angrenzende Außenwand (Fall W-U0T, Seite 88).



Abb. 3.13: Aufgesetztes Deckenlüftungsgerät (tecalor GmbH) direkt an der Fensterwand mit Rohrführung durch Oberlicht-Bereich (Einhard-Gymnasium, Aachen) [89].



Abb. 3.14: Aufgesetztes Deckenlüftungsgerät (Swegon Germany GmbH) an Raumrückseite mit sichtbarer Rohrführung durch Isopaneel an ehemaliger Oberlichtposition (Grundschule Olching) [86].



Abb. 3.15: Standlüftungsgerät (Kampmann GmbH & Co. KG) kombiniert mit akustischem Wandabsorber mit sichtbarer Rohrführung durch angrenzende Wand (Fall S, Sünte-Marienschule, Wietmarschen) [49].



**ESSENZ
für Eilige**

TEIL 3

SMART sanieren: Modularer Sanierungsansatz für Klassenräume

- ✓ Damit die an zehntausenden Schulen notwendige Sanierung nicht am individuellen Planungsaufwand scheitert, müssen Sanierungskonzepte **einfach und flächendeckend umsetzbar** sein.
- ✓ Unser Vorschlag: **SMART sanieren**
 - Schnell: Ein Raum kann schon in wenigen Tagen deutlich verbessert werden – z. B. während der Ferien.
 - Modular nach dem Baukastenprinzip: Lüftungsgerät, Akustikelemente und Beleuchtung können flexibel kombiniert werden und ggf. vorhandene Technik ergänzen.
 - Anpassungsfähig an die jeweiligen räumlichen Gegebenheiten.
 - Reduzierter Planungsaufwand: Unterschiedliche Räume können in ähnlichen Schritten saniert werden.
 - Temperatur, Licht, Luft und Akustik: Die vier Raumfaktoren werden gleichzeitig berücksichtigt und das Lernklima im Raum wird rundum besser.
- ✓ Ein passendes SMARTes Sanierungskonzept ergibt sich automatisch aus den vier Leitfragen zu Raum und Raumnutzung – etwa, ob und wie eine vorhandene Systemdecke weitergenutzt oder eine Rohdecke abgehängt werden kann. Tipp: Die **Klassenraumdecke für Sanierungsmaßnahmen** nutzen.





Teil 4 – Exemplarische Sanierungsmaßnahmen

- 4.1 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen
- 4.2 Vorher-Nachher-Vergleich am Beispiel eines Grundschulklassenraums
- 4.3 Was kostet eine SMARTe Sanierung?

Auf der Grundlage des vorgestellten Sanierungsansatzes werden Beispiele für durchgeführte Sanierungsmaßnahmen in vier Klassenräumen vorgestellt. Die Kosten für diese Maßnahmen werden diskutiert und auf Person und Jahr heruntergebrochen.

4.1 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen

Im Rahmen einer Interventionsstudie hat die Heinz Trox Wissenschafts gGmbH vier verschiedene Klassenräume an drei Schulen in Neukirchen-Vluyn saniert und die Verbesserungen der Raumsituation gemessen. Die Sanierungsarbeiten fanden in den Herbstferien 2020 und in den Osterferien 2021 statt.

Im Rahmen einer Studie wurde die Innenraumqualität in 4 Klassenräumen SMART verbessert. 3 Sanierungslösungen kamen dabei zum Einsatz.

Das Ziel war, gleichzeitig die Luftqualität, den thermischen Komfort, die Raumakustik sowie die Beleuchtung in einem einzigen baulichen Schritt zu verbessern. Dabei sollte überprüft werden, ob eine Lösung, die gängige und einzeln bereits erprobte Komponenten nach dem Baukastenprinzip und ohne hohen individuellen (Vor-)Planungsaufwand kombiniert, bereits eine deutliche Verbesserung erzielen kann, die leicht auf unterschiedliche Räume im Bestand übertragbar ist. Kernstück der Sanierung war jeweils eine Deckenlüftungslösung. Der Interventionsstudie war eine Feldstudie an 23 Schulen in NRW vorausgegangen (siehe auch [13][14][15]), die grundlegende Defizite in allen genannten Bereichen aufgezeigt hatte.

Vereinfachter Sanierungsansatz

Das Konzept der modularen integralen Klassenraumsanierung wurde exemplarisch und vereinfacht in vier Räumen an drei Schulen umgesetzt. Da zwei der Räume sehr ähnlich beschaffen waren, wurde hier der gleiche Sanierungsansatz bezüglich des Deckenlüftungsgeräts gewählt und dafür der Leuchtentyp (Einlegeleuchten vs. Anbauleuchten) sowie die akustisch wirksame Fläche der Systemdecke variiert.

Gemeinsam mit den Schulleitungen und Schulträgern wurden Räume ausgewählt, die hinsichtlich Lüftung, sommerlicher Temperaturentwicklung bzw. Sonnenschutz, Sprachverständlichkeit und/oder Beleuchtung auffielen (siehe Abb. 4.1 bis Abb. 4.3). Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass trotz der geringen Anzahl an Räumen unterschiedliche Einbausituationen abgedeckt werden. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Räume.

Im Überblick

- saniert wurden vier Klassenräume an drei Schulen
- für die Räume wurden insgesamt drei verschiedene Sanierungslösungen gewählt und umgesetzt
- alle Sanierungsmaßnahmen fanden innerhalb weniger Tage während der Schulferien statt

Alle Sanierungsmaßnahmen fanden während der Schulferien statt, so dass der Unterricht nicht beeinträchtigt wurde. In jedem Raum wurde ein **Deckenlüftungsgerät** mit Zwei-Leiter-Wärmeübertrager installiert und in den bestehenden Heizkreis eingebunden. Die Geräte verfügen über Temperatur- und CO₂-Sensoren zur Regelung und nah am Pult installierte **Raumbediengeräte** mit Thermostat. Mit diesen lassen sich die Solltemperatur einstellen und Betriebsarten wie Anwesenheit, Spüllüftung mit hoher Ventilationsstufe und Klausur- bzw. Flüstermodus auswählen.

Mit Ausnahme des Musikraums, in dem eine bestehende Systemdecke mitsamt Absorber-

platten erhalten blieb, wurden zur Reduktion der Nachhallzeit **Mineralfaserplatten (Dicke 15 mm)** eingebaut. Als elektrische Beleuchtung wurden **DALI-dimmbare LED-Leuchten mit Linsenoptik in WideBeam-Variante** mit jeweils 25,4 W Leistung eingesetzt. Der größere Abstrahlwinkel der WideBeam-Variante ermöglicht eine gleichmäßigere Ausleuchtung des gesamten Aufenthaltsbereichs. Die Leuchten sind bildschirmarbeitsplatztauglich ($UGR < 19$) und eignen sich für die Nutzung von Tablets und ähnlichen digitalen Hilfsmitteln.

Zusätzlich zu der im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtstoffröhren energiesparsameren LED-Technologie wurden zur weiteren Reduktion des Stromverbrauchs **Anwesenheitssensoren und Tageslichtaugen** installiert. Diese ermöglichen ein Ausschalten bei Inaktivität bzw. ein Anpassen der Lichtstärke an die Außenbedingungen. Das Bedienpanel ermöglicht darüber hinaus die Auswahl zwischen drei voreingestellten Settings (z. B. Beamer-Präsentation, mittlere Beleuchtungsstärke für kreativere Arbeiten, hohe Beleuchtungsstärke) sowie das individuelle Schalten und Dimmen der auf mehrere Kanäle aufteilbaren Leuchten.



Abb. 4.1: Fensterloser Musikraum mit Lichtkuppeln und vorhandener abgehängter Decke (vor Sanierung).



Abb. 4.2: Informatikraum einer Gesamtschule mit vorhandener abgehängter Decke und Anbauleuchten (vor Sanierung).



Abb. 4.3: Schallharte Betondecke und fragwürdige Positionierung der fensternahen Leuchtstoffröhren in einer Grundschule (vor Sanierung).



		Musikraum	Informatikraum	Klassenzimmer (2x)
Schultyp	–	Gymnasium	Gesamtschule	Grundschule
Etage	–	EG	1. OG	1. OG
Länge	m	9,8	10,8	9,5
Breite	m	7,1	6,9	6,5
lichte Höhe	m	3,0 (bis Systemdecke)	3,1 (bis Systemdecke)	3,3 (bis Rohdecke)
Grundfläche	m ²	68,3	74,5	61,8
Volumen	m ³	210	231	204
Ausrichtung Fensterwand	–	keine (innenliegend)	Westen	Osten
Fenster/Oberlichter	–	6 Lichtkuppeln (kipppbar)	10 Fenster (öffnen- und kipppbar), 5 Oberlichter (kipppbar)	4 Fenster (öffnen- und kipppbar), 4 Oberlichter
Lüftung	–	manuell (+defekte Grundlüftung)	manuell	manuell
Künstliche Beleuchtung (exkl. Tafelbeleuchtung)	–	10 Module à 4 Röhren à 18 W = 720 W	2 Reihen x 5 Leuchten à 58 W = 580 W	2 Reihen x 4 Leuchten à 58 W = 464 W
Decke	–	ganzflächig abgehängte Systemdecke (Höhe 52 cm)	abgehängte Systemdecke (Höhe 30 cm) mit schmaler Aussparung entlang Fensterseite	Rohdecke
Sonnenschutz innen	–	Glastönung der Lichtkuppeln	–	Vorhang
Sonnenschutz außen	–	–	Rolladen	Lamellenjalousie
Bestuhlung (exkl. Lehrkraft)	–	32	25	22 bzw. 24
Gewählte Sanierungslösung		W-GOV Vollintegration eines Deckenlüftungsgeräts in vorhandene ganzflächige Systemdecke mit Einlegeleuchten	W-U0T Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts in vorhandene Systemdecke mit fensterseitiger Aussparung (Einlegeleuchten)	R-10V Installation eines Deckenlüftungsgeräts auf Rohdecke (ein Raum Anbauleuchten, ein Raum Einlegeleuchten)

Tabelle 4.1: Übersicht über die vier Räume vor der Sanierung und die jeweils gewählte Sanierungslösung. Die Angaben beziehen sich auf den Zustand vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen (Maße gerundet).

Lösung 1: Vollintegration eines Decken- lüftungsgeräts in vorhandene ganzflächige Systemdecke mit Einlegeleuchten (Musikraum, W-GOV)

Kurzbeschreibung des Raums

Der Musikraum eines Gymnasiums mit 68 m² Grundfläche und 210 m³ Raumvolumen hat keine Außenwände und ist fensterlos, so dass im Ausgangszustand nur über sechs elektrisch kippbare Lichtkuppeln gelüftet werden konnte (Abb. 4.4 und Abb. 4.13). Bei ungünstigen Witterungsbedingungen wie Regen oder Schnee war somit keine Lüftung möglich und es kam zu Wasserschäden bei nicht vollständig geschlossenen Kuppeln. Die nutzbare Fläche der um 52 cm unter der Rohdecke abgehängten Systemdecke wird durch die Lichtkuppeln und zwei Unterzüge reduziert. Die elektrische Beleuchtung erfolgt über zehn Einlegeleuchtenmodule mit jeweils vier Leuchtstoffröhren.

Aufgrund der eingeschränkten Lüftungsmöglichkeiten wurde in der Vergangenheit bereits



Abb. 4.4: Fensterloser Musikraum mit Lichtkuppeln und vorhandener abgehängter Decke (vor Sanierung).

eine unterstützende Grundlüftung mit Luftdurchlässen nahe der Vorder- und Rückwand des Raums installiert, die jedoch nach Aussage der Schule nicht zu einer ausreichenden Verbesserung beitragen konnte.

Durchgeführte Maßnahmen

Da die Abhängehöhe der vorhandenen ganzflächigen Systemdecke die Höhe des Lüftungsgeräts überstieg, konnte eine Vollintegration des Lüftungsgeräts erfolgen (Sanierungsschlüssel siehe Abb. 4.6). Das gewählte Lüftungsgerät kann sowohl bei Voll- als auch bei Teilintegration in einer zusätzlichen Zarge installiert werden. Bei der Zarge handelt es sich um ein nur leicht größeres Leergehäuse mit einer Masse von etwa 100 kg, das vorab an der Decke montiert wird und dann das Lüftungsgerät aufnimmt.

Folgende Schritte wurden durchgeführt:

- 1) Zunächst wurde die Systemdecke lokal demontiert, die alte Beleuchtung ausgebaut, die Lüftungskanäle und -auslässe der alten Grundlüftung freigelegt und die vorhandene, aber unzureichende Grundlüftung zurückgebaut (Abb. 4.5).



Abb. 4.5: Lokaler Rückbau der vorhandenen Systemdecke an der für das Deckenlüftungsgerät vorgesehenen Position und Freilegen der Luftkanäle der bestehenden, nicht funktionierenden Grundlüftung.



Sanierungsschlüssel		W	G	D	V
Gibt es bereits eine passende Systemdecke?					
- W: ja (Weiternutzung vorhandener Systemdecke)					
Wie ist die Systemdecke geplant/ausgeführt?					
- G: ganzflächig					
Wo wird das Deckenlüftungsgerät installiert?					
- D: nicht an einer Fensterwand					
Wie soll das Deckenlüftungsgerät mit der (System-)Decke kombiniert werden?					
- V: vollintegriert					

Abb. 4.6: Sanierungsschlüssel des Musikraums.



Abb. 4.7: Kernbohrung durch die freigelegte Rohdecke zur Kanaldurchführung.

2) Da es sich bei der angrenzenden Wand nicht um eine Außenwand handelte, wurden die Luftkanäle durch die Decke nach außen geführt. Dazu wurde zunächst die Dampfsperre durch einen Dachdecker aufgetrennt und die Dachfläche lokal freigelegt. Anschließend wurden zwei 355 mm große Kernbohrungen durch die Stahlbetondecke vorgenommen (Abb. 4.7).



Abb. 4.8: Durch Decke geführter Luftkanal und anschließende Abdichtung und Wiederherstellung der Dampfsperre.

3) Die gedämmten Luftkanäle wurden durch die Kernbohrungen geführt. Auf dem Dach wurde die Dampfsperre wiederhergestellt und anschließend eine Deflektorhaube installiert und abgedichtet (Abb. 4.8).

4) Anschließend wurde die Zarge (Leergehäuse zur Aufnahme des Deckenlüftungsgeräts) mit etwas Abstand zur Wand montiert, um ausreichend Platz für die 90°-Luftkanalbögen zu lassen (Abb. 4.9). Fehlende Lüftungskanäle wurden installiert (Abb. 4.10) und das Lüftungsgerät in die Zarge eingehängt (Abb. 4.11).

5) Die alte Akustikdecke wurde wieder bis bündig an die Zarge montiert. Abschließend wurden Tageslicht- und Anwesenheitssensor sowie Raumbediengeräte und CO₂-Ampel installiert (Abb. 4.12) und die bisherigen Leuchtstoffröhren gegen dimmbare LED-Einlegeleuchten mit Linsenoptik getauscht.



Abb. 4.9: Installation der Zarge mit etwas Abstand vom rückliegenden Unterzug zum seitlichen Verspringen mit 90°-Bögen.



Abb. 4.10: Rückseitiges Verspringen der Luftkanäle und Durchführung durch die Kernbohrung.



Abb. 4.11: Einhängen des Geräts in die zuvor installierte Zarge und rückseitiger Anschluss der Luftkanäle.



Abb. 4.12: Sichtbare Installation von CO₂-Ampel (optionale Möglichkeit zum Funkdatenlogging über WiFi).



Abb. 4.13: Innenliegender Musikraum eines Gymnasiums mit Lichtkuppeln ohne Außenwände und Fenster vor der Sanierung (links). Vollintegration des Deckenlüftungsgeräts in eine vorhandene Systemdecke mit Austausch der Einlegeleuchten (rechts). Der Luftreiniger wurde zwischenzeitlich an einer anderen Position aufgestellt.

Lösung 2: Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts in vorhandene teilflächige Systemdecke mit Einlegeleuchten (Informatikraum, W-U0T)

Kurzbeschreibung des Raums

Der Informatikraum einer Gesamtschule mit 75 m² Grundfläche und 231 m³ Raumvolumen verfügte bereits über eine um 30 cm abgehängte Systemdecke. Die elektrische Beleuchtung erfolgte über zwei Reihen mit jeweils fünf lückenlos installierten Anbauleuchten. Gelüftet wurde durch manuelle Fensterlüftung, wobei die Fensteröffnung durch eine Tischreihe mit Computern und Bildschirmen in unmittelbarer Fensternähe stark eingeschränkt war (Abb. 4.15, links).

Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen

Der Informatikraum verfügte bereits über eine abgehängte Systemdecke mit aufgesetzten Anbauleuchten. Da die Höhe des Lüftungsgeräts die Abhängehöhe der Systemdecke überstieg, wurde das Lüftungsgerät teilintegriert (Sanierungsschlüssel siehe Abb. 4.14).



Abb. 4.15: Informatikraum einer Gesamtschule mit bereits abgehängter Decke vor Sanierung (links). Teilintegration des Deckenlüftungsgeräts in vorhandene unsymmetrische Systemdecke mit Aussparung vor der Fensterwand sowie Austausch der Absorberplatten und Wechsel von Anbauleuchten (Leuchtstoffröhren) gegen Einlegeleuchten (LED) (rechts).

Die vorhandene Systemdecke wurde lokal zurückgebaut. Die Anbauleuchten und die bisherigen Absorberplatten wurden vollflächig demontiert (Abb. 4.16). Die Luftkanäle wurden durch Kernbohrungen in der rückwärtigen Außenwand direkt nach außen geführt. Nach der Installation der Zarge und dem Einhängen des Geräts erfolgte die hydraulische Einbindung in den Warmwasserkreis sowie der Wiedereinbau der Akustikdecke bis an die Zarge heran. Abschließend wurden neue Absorberplatten eingelegt und analog zum Musikraum neue Beleuchtung und Sensorik installiert (siehe Abb. 4.15, rechts).

Sanierungsschlüssel	W-U0T
Gibt es bereits eine passende Systemdecke?	
- W: ja (Weiternutzung vorhandener Systemdecke)	
Wie ist die Systemdecke geplant/ausgeführt?	
- U: unsymmetrischer Streifen bzw. einseitige Aussparung	
Wo wird das Deckenlüftungsgerät installiert?	
- 0: nicht an einer Fensterwand	
Wie soll das Deckenlüftungsgerät mit der (System-)Decke kombiniert werden?	
- T: teilintegriert	

Abb. 4.14: Sanierungsschlüssel des Informatikraums. (Leuchtstoffröhren)- gegen Einlegeleuchten (LED) (rechts).



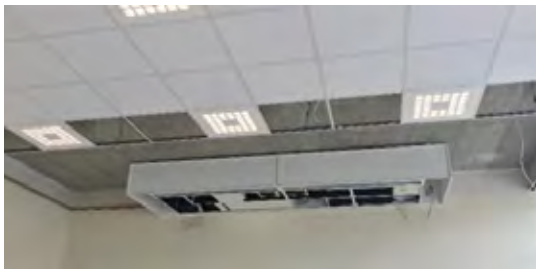


Abb. 4.16: Lokaler Rückbau einer vorhandenen Systemdecke (oben) und Installation eines Deckenlüftungsgeräts in eine Zarge (unten).

Lösung 3: Deckenlüftungsgerät mit neuer teilflächiger Systemdecke (innenliegender durchgehender Streifen) auf Rohdecke (2x Grundschulklassenraum, R-IOV)

Kurzbeschreibung der Räume

Die beiden sehr ähnlichen Klassenräume einer Grundschule in verschiedenen Trakten des ersten Obergeschosses mit einer für diesen Schultyp typischen Grundfläche von 62 m² und einem Raumvolumen von 204 m³ verfügten über schallharte Betondecken, die lange Nachhallzeiten haben und sich nach Aussagen des Lehrpersonals und der Schulleitung negativ auf die Sprachverständigung auswirkten. Die Belüftung der Räume erfolgte ganzjährig manuell über das Öffnen der Fenster durch die anwesenden Personen. Als elektrische Beleuchtung installiert waren zwei Reihen von je vier Leuchtstoffröhren,

deren Position in der Raummitte und direkt vor dem Fenster sehr ungünstig gewählt war (Abb. 4.17). Dies führte zu einer ungleichmäßigen Ausleuchtung der Arbeitsflächen und teilweise zu Schattenwurf auf den Tischoberflächen.

Durchgeführte Maßnahmen

Die bisher vorgestellte Kombination aus Deckenlüftungsgerät mit einer (ganz-)flächig abgehängten Systemdecke ist in vielen Klassenräumen im Bestand realisierbar. Es kann aber Raumsituationen geben, bei denen eine Systemdecke nicht bündig mit den Wänden des Raums eingebaut werden kann. In den ausgewählten Grundschulklassenräumen nehmen die Fenster bzw. Oberlichter die gesamte Raumhöhe ein. Hier wäre die ganzflächige Installation einer Systemdecke nicht möglich. Es hätte zwar ein Streifen vor der Fensterwand ausgespart und die Systemdecke bis an die Wand der gegenüberliegenden Seite gezogen werden können. Es wurde aber eine **symmetrische Lösung mit einem innenliegenden durchgehenden Längsstreifen der Systemdecke** realisiert.



Abb. 4.17: Schallharte Betondecke und fragwürdige Positionierung der fensternahen Leuchtstoffröhren in einer Grundschule (vor Sanierung).



Zunächst wurden in beiden Räumen Kernbohrungen vorgenommen (Abb. 4.18) und die Deckenlüftungsgeräte ohne Zarge auf der Klassenraumseite gegenüber der Tafel installiert (Abb. 4.19). Luftkanäle für Außen- und Fortluft konnten durch Kernbohrungen direkt durch die rückwärtigen Außenwände verlegt und außen mit Wetterschutzgittern verkleidet werden (Abb. 4.22). Vom Lüftungsgerät bis zur gegenüberliegenden Tafelwand wurde dann jeweils ein durchgehender Streifen mit Systemdecke abgehängt, seitlich abgekoffert, verputzt und gestrichen. Dabei wurden sowohl die Breite der Systemdecke als auch die Art der Leuchten variiert. Damit konnte gezeigt werden, dass das Baukastenprinzip auch mit Anbauleuchten kompatibel ist – etwa für den Fall, dass bei einer Sanierung die bisherigen Anbauleuchten weitergenutzt oder diese aus anderen Gründen Einlegeleuchten vorgezogen werden.

- In einem der Räume wurde ein innenliegender Systemdeckenstreifen in der Breite des Lüftungsgeräts verbaut und mit Anbauleuchten versehen (Abb. 4.23 bis Abb. 4.25, links). Damit die Mineralfaserplatten nicht das gesamte Gewicht der Anbauleuchten aufnehmen müssen, wurden an den entsprechenden Stellen von oben zusätzliche OSB-Platten zur Lastaufnahme in das Tragschienensystem eingelegt. Die Befestigung bzw. Verschraubung der Anbauleuchten erfolgte dann durch

die Absorberplatten hindurch direkt in die Holzplatten. Es ist anzumerken, dass dieses Vorgehen einen Mehraufwand gegenüber der Installation von Einlegeleuchten im passenden Rastermaß bedeutete.

- Im anderen Raum (siehe Abb. 4.23 bis Abb. 4.25 rechts) wurde eine etwa 4,4 m breite Systemdecke verbaut, die Platz für sieben vollständige Akustikpaneele à 62,5 mm nebeneinander bot, was den Verschnitt und damit den Arbeitsaufwand reduzierte. Außerdem wurde eine bessere Ausleuchtung der Randbereiche ermöglicht und mehr akustisch wirksame Paneele zur Verfügung gestellt.

Abschließend erfolgte der elektrische Anschluss sowie die Einbindung in den Heizkreis über seitlich positionierte Anschlüsse am Deckenlüftungsgerät (Abb. 4.20), wofür die Leitungen temporär eingefroren wurden (Abb. 4.21). Abb. 4.25 zeigt die beiden Räume nach der Sanierung. Auf eine optionale Tafelbeleuchtung (siehe Abb. 4.23) wurde verzichtet, da bereits ein Umstieg auf Smartboards mit Beamer erfolgt war.



Abb. 4.18: Kernbohrungen für die Durchführung der Luftkanäle für Fort- und Außenluft direkt durch die angrenzende Außenwand.



Abb. 4.19: Aufhängung des Deckenlüftungsgeräts an der (Außen-)Rückwand des Klassenraums gegenüber der Tafel.



Abb. 4.20: Durch die in diesem Fall seitlich positionierten Anschlüsse erfolgte der elektrische Anschluss sowie die Einbindung in den Heizkreis.



Abb. 4.21: Einfrieren der Warmwasserleitungen während des hydraulischen Anschlusses des Deckenlüftungsgeräts in den Heizkreis.



Abb. 4.22: Unauffällige Wetterschutzgitter an der Außenfassade für Fort- und Außenluft.

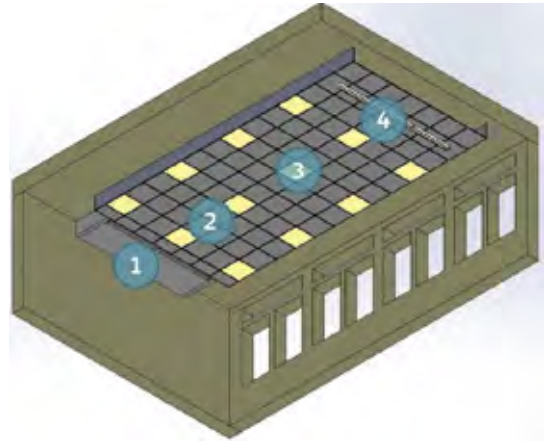
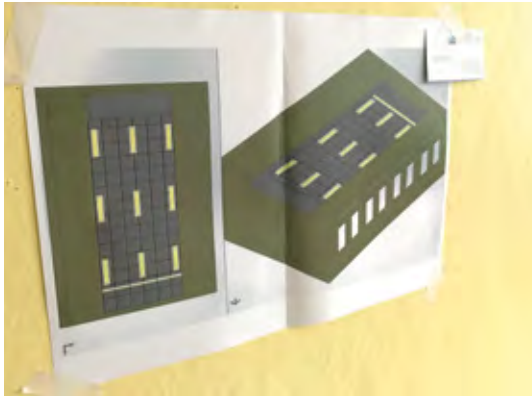


Abb. 4.23: Planungsansichten mit (1) Deckenlüftungsgerät an Außenwand, (2) Systemdecke, (3) Anbau- (links) bzw. Einlegeleuchten (rechts) und (4) Tafelbeleuchtung (optional).



Abb. 4.24: Installation der Anbauleuchten mit rückseitiger Verstärkung durch OSB-Platten zum Abfangen der Last und seitlicher Abkofferung des Systemdeckenstreifens (links) und Vorbereitung der Systemdecke mit Revisionsausparung für das Deckenlüftungsgerät vor Einlegen der restlichen Mineralfaserplatten und LED-Deckenleuchten (rechts).



Abb. 4.25: Deckenlüftungsgerät an der Klassenraumrückseite mit teilflächig abgehängter Systemdecke. Variante Akustikdeckenstreifen (3,6 m) mit Anbauleuchten (links) und Variante Akustikdeckenstreifen (4,4 m) und Einlegeleuchten (rechts).



4.2 Vorher-Nachher-Vergleich am Beispiel eines Grundschulklassenraums

Im Folgenden wird die Wirkung einer Sanierungslösung nach dem SMART-Konzept auf die objektiv erfassbaren Innenraumbedingungen evaluiert – am Beispiel eines in Abschnitt 4.1 vorgestellten Grundschulräume (siehe Tabelle 4.1). Dabei wird überprüft, inwieweit die zuvor festgestellten Defizite mit einer SMARTen Lösung ohne zusätzliche individuelle (Vor-)Planung adressiert werden konnten.

Durch die Sanierung haben sich Luftqualität, Akustik und Beleuchtung signifikant verbessert.

Das Minimalziel des SMART-Konzepts ist es, mit reduziertem Aufwand und Pareto-orientiert mindestens 80 % der Defizite zu verbessern und den verbleibenden Spielraum nach oben nur (oder erst) dann anzugehen, wenn genügend zusätzliche Ressourcen zur Verfügung stehen. Nach diesem Prinzip wurde der betrachtete Raum zunächst mit einem neuem Deckenlüftungsgerät und einem 4,4 m breiten Systemdeckenstreifen mit Einlegeleuchten saniert.

In der folgenden Evaluierung werden die Luftqualität, die Raumakustik und die Beleuchtung im Grundschulraum nach der Sanierung mit den Ergebnissen einer vorangegangenen Feldstudie sowie Messungen im unsanierten Zustand verglichen. Die Luftqualität wurde anhand der CO₂-Konzentration im Raum bewertet und die Raumakustik anhand der Nachhallzeit. Der Effekt der neuen LED-Beleuchtung wurde anhand der horizontalen Beleuchtungsstärken in Tischhöhe mit den alten Leuchtstoffröhren verglichen.

Geringere CO₂-Konzentration

Zur Beurteilung der Luftqualität wurde der Verlauf der CO₂-Konzentration mit Hilfe von Luftqualitätsampeln im sanierten Raum

aufgezeichnet. Ausgewertet wurden die im Stundenplan der Schule vorgesehenen Unterrichtsstunden am Vormittag ohne Pausen.

Beispielhafte Tagesverläufe in Abb. 4.26 zeigen, dass die höchsten CO₂-Konzentrationen mit Lüftungsgerät im Stundenverlauf bei etwa 1.300 ppm lagen. Die Auswertung mehrerer Wintermonate (Abb. 4.27) zeigt kaum höhere Konzentrationen. Dies ist eine deutliche Verbesserung der Luftqualität gegenüber von verschiedenen Studien festgestellten Konzentrationen in rein natürlich belüfteten Klassenräumen. So wurden im Rahmen einer Feldstudie der Heinz Trox WissenschaftsgmbH mediane Konzentrationen pro Schulstunde von bis zu 2.590 ppm gemessen [14] [15]. Weitere Studien geben sogar Konzentrationen von bis zu 6.000 ppm an (siehe auch [70]), die bei unzureichender manueller Fensterlüftung regelmäßig auftreten.

Auch wenn 1.000 ppm im Stundenverlauf zeitweise überschritten wurden, lag die Luftqualität über lange Zeiträume im hygienisch unbedenklichen Bereich. Dies gilt insbesondere für die ebenfalls dargestellten Stundenmittelwerte pro Unterrichtseinheit, für die die Richtwerte gelten. Ausgeprägte sägezahnförmige Konzentrationsverläufe mit hohen Spitzenwerten (siehe [14]) waren nach der Sanierung nicht mehr festzustellen.

Da die Fenster und Oberlichter im sanierten Klassenraum trotz Deckenlüftungsgerät weiterhin geöffnet bzw. gekippt werden können, lässt sich der alleinige Effekt des Deckenlüftungsgeräts in der bisherigen Auswertung nicht hundertprozentig beziffern. Für eine genauere Evaluierung müsste in einem

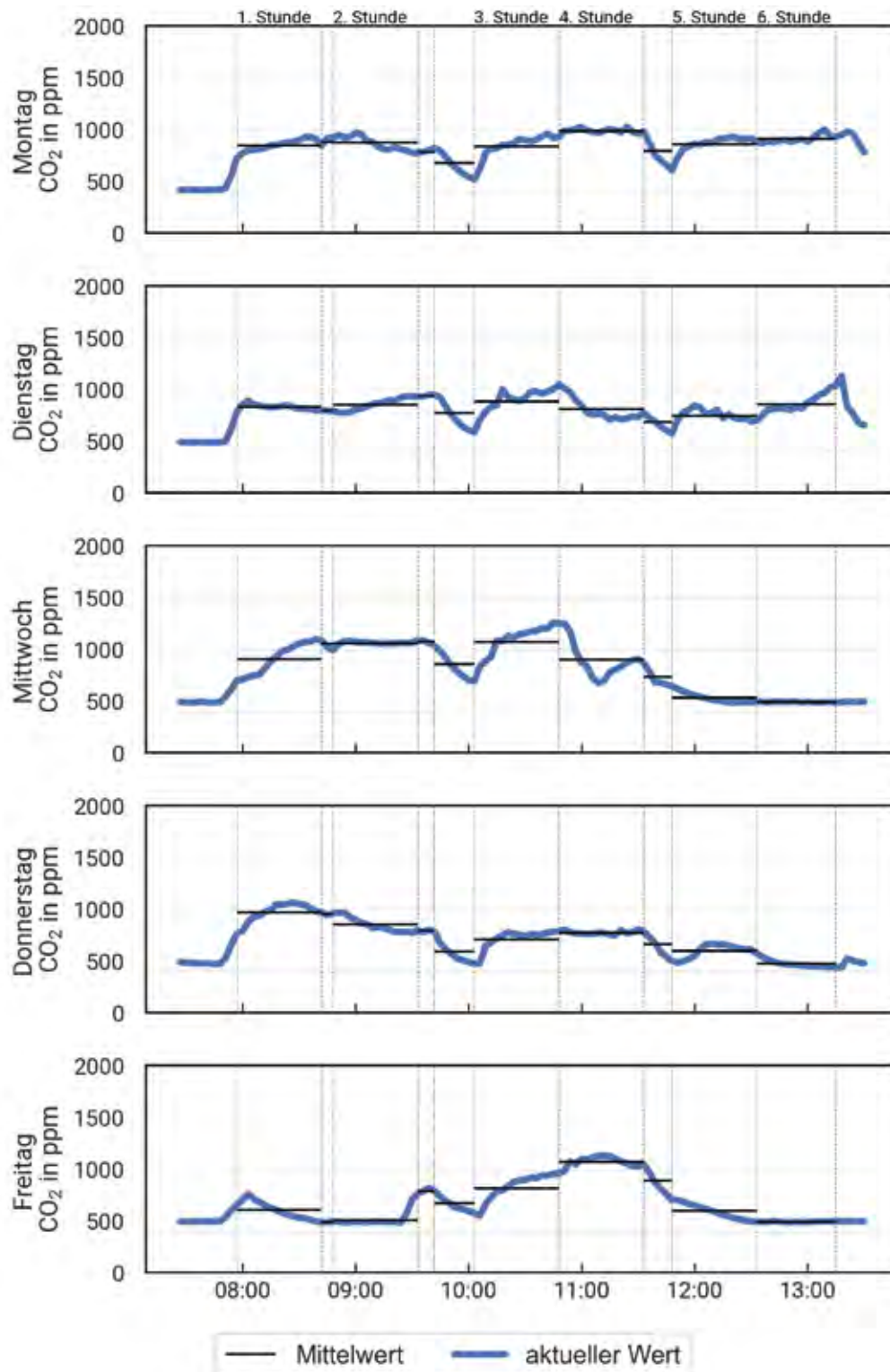


Abb. 4.26: Exemplarische Tagesverläufe der CO₂-Konzentration im sanierten Klassenraum einer Grundschule mit Deckenlüftungsgerät im März 2024.

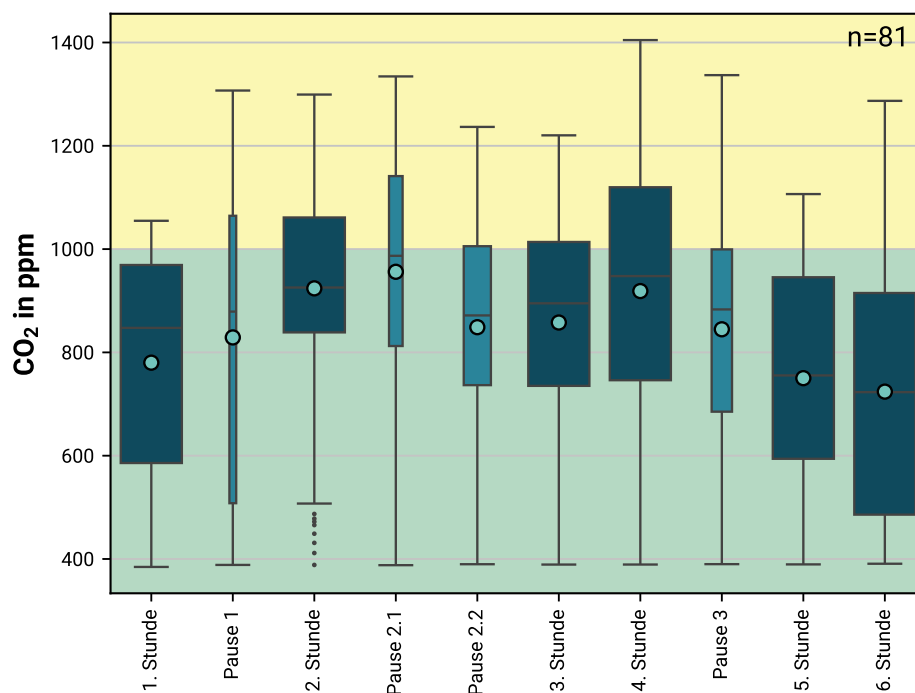


Abb. 4.27: Mittelwerte der CO₂-Konzentration pro Stunde bzw. Unterrichtseinheit im sanierten Raum mit Deckenlüftungsgerät für den Zeitraum von Dezember 2023 bis April 2024.

nächsten Schritt zusätzlich das manuelle Lüftungsverhalten über Kontaktsensoren an den Fenstern erfasst werden, um zwischen Phasen mit und ohne zusätzliches Fensteröffnen unterscheiden zu können.

Bessere Akustik durch halbierte Nachhallzeit

Zur Beurteilung der Raumakustik wurden vereinfachte Messungen der Nachhallzeit durchgeführt. Die Anregung des unbesetzten Raums erfolgte mit einer aus der Leichtathletik bekannten Starterklappe, die Tonaufnahme (Impulsantwort) mit einem binauralen Kunstkopf (einem künstlichen Kopf mit Mikrofonen an den beiden Ohrpositionen) und die Auswertung mit der Software DIRAC 6 von Brüel & Kjær. Dazu wird vereinfacht der Mittelwert aus linkem und rechtem Ohr des Kunstkopfes ohne zusätzliche örtliche Mittelung betrachtet.

Abb. 4.28 zeigt die frequenzabhängigen Ergebnisse der Nachhallzeit vor und nach der Sanierung, einmal gemessen für den unbesetzten Raum und einmal berechnet für einen Belegungsgrad von 80 %, rechnerisch ermittelt anhand Tabelle A.1 der DIN 18041 [22]. Als Vollbelegung wurde gemäß Bestuhlung zum Zeitpunkt der Sanierung von 24 Schülerinnen und Schülern und einer Lehrkraft ausgegangen. In schwarz ist der Toleranzbereich für normale und inklusive Nutzung gemäß DIN 18041 [22] angegeben.

Für den für die menschliche Sprache wichtigen Frequenzbereich zwischen 250 und 2.000 Hz wurde im unbesetzten Raum eine mittlere Nachhallzeit von 1,2 s im unsanierten Zustand und von 0,6 s nach der Sanierung gemessen. Der Nachhall konnte also bereits durch den Einbau einer einfachen Akustikdecke in Streifenausführung

zwischen Klassenrückwand und Tafelwand stark dem Sollwert angenähert werden. Auch subjektiv wurde eine spürbare Verbesserung der Sprachverständlichkeit erreicht.

Im belegten Zustand entsprachen die Nachhallzeiten bei allen Frequenzen nach der Sanierung den Anforderungen für eine normale Nutzung. Lediglich die Anforderungen für eine inklusive Nutzung wurden bei tieferen Frequenzen von 125 und 250 Hz überschritten und würden zusätzliche Maßnahmen über die einfache und Pareto-orientierte Sanierungslösung hinaus erfordern.

Stark verbesserte Beleuchtung

Die Beleuchtungssituation vor und nach der Sanierung wurde anhand von Messungen der horizontalen Beleuchtungsstärken auf allen Tischen im abgedunkelten Raum bei Nacht verglichen. Vor der Sanierung wurden die geforderten 500 lx an keinem Platz und selbst 300 lx nur an jedem dritten Platz erreicht (siehe Abb. 4.29 und Tabelle 4.2).

Nach der Sanierung erfüllen alle Plätze trotz einer um 30 % geringeren installierten Leistung nicht nur die strengeren Anforderungen von 500 lx, sondern die geforderte Mindestbeleuchtungsstärke wird sogar deutlich übertroffen (Abb. 4.29, rechts). Durch die bessere Beleuchtung ist eine Steigerung der Arbeitsleistung sowie eine geringere Ermüdung und Fehlerquote bei den Anwesenden zu erwarten. Die Leuchten können beliebig gedimmt werden, um je nach Unterrichts- und Tagesform auch eine weniger starke Ausleuchtung zu ermöglichen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der überwiegende Teil der Defizite der betrachteten Grundschulräume behoben werden konnte. Dies war durch einfache Maßnahmen – modular, mit erprobten Bausteinen und nur durch Umgestaltung der ohnehin freien Klassenraumdecke – ohne aufwändige individuelle (Vor-)Planung möglich.

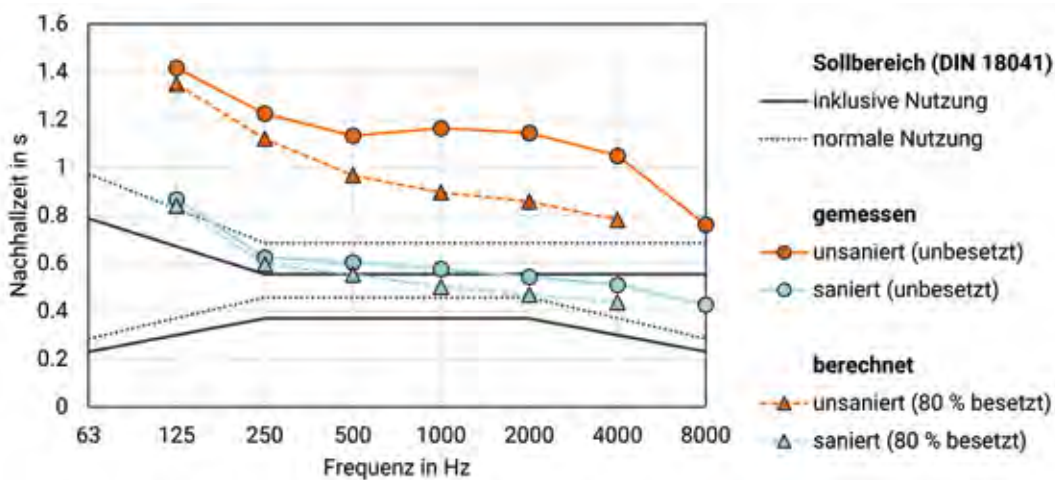


Abb. 4.28: Nachhallzeit vor und nach der Sanierung eines Grundschulklassenraums im unbesetzten (gemessen) und zu 80 % besetzten Raum (berechnet).

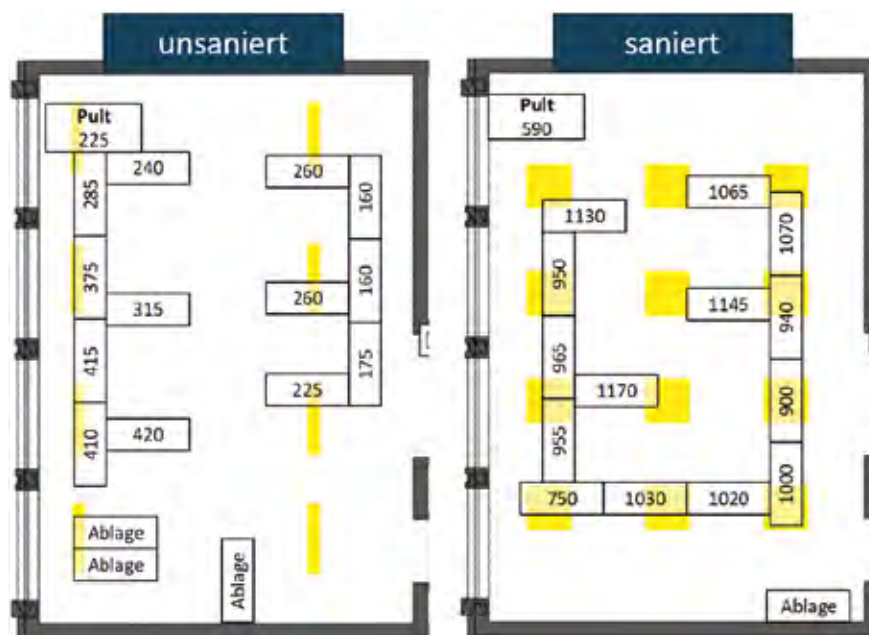


Abb. 4.29: Horizontale Beleuchtungsstärken vor und nach der Sanierung eines Grundschulklassenraums. Die maximalen Beleuchtungsstärken im sanierten Raum liegen über den Mindestanforderungen und können stufenlos gedimmt werden, wodurch Energie eingespart werden kann.

Nach der Sanierung ist die **Luftqualität** weitgehend und insbesondere bei Betrachtung der Stundenmittelwerte hygienisch unbedenklich. Wer den Raum nutzt, ist nicht mehr darauf angewiesen, auch bei ungünstigen Außenbedingungen wie Lärm, starkem Wind oder unbehaglichen Temperaturen regelmäßig die Fenster zu öffnen. Natürliches Lüften bleibt dennoch möglich: Fenster und Oberlichter lassen sich weiterhin jederzeit öffnen. Dies kann die Akzeptanz des Lüftungsgeräts erhöhen und ermöglicht die persönliche Einflussnahme auf das Raumklima, was vielen Menschen sehr wichtig ist.

Die **Beleuchtung** des betrachteten Raums ist seit der Sanierung bildschirmarbeitsplatzgerecht und ermöglicht die blendfreie Nutzung von Tablets und Smartboards. Zudem ist die Ausleuchtung deutlich stärker, so dass an jedem Sitzplatz nicht nur 300 lx, sondern

sogar 500 lx erreicht und übertroffen werden können. Je nach Vorliebe und Unterrichtsform kann die Beleuchtung gedimmt werden. Bei Abwesenheit wird sie automatisch ausgeschaltet und dem Tageslicht angepasst, so dass im Betrieb zusätzlich Energie eingespart werden kann.

Auch bei der **Raumakustik** konnte ein gutes Ergebnis erzielt werden. Abstriche bei der Nachhallzeit bestehen, wenn inklusive Anforderungen eingehalten werden sollen und das Bedürfnis nach erhöhter Sprachverständlichkeit besteht. Insgesamt kann die Verbesserung dennoch als sehr zufriedenstellend bewertet werden. Das gilt besonders dann, wenn der geringe Aufwand und die Tatsache berücksichtigt werden, dass eine mittige Anordnung eines Systemdeckenstreifens von der DIN 18041 [22] nicht empfohlen und stattdessen eine umlaufende Anordnung

von absorbierender Fläche an der Decke (für Frontalunterricht) vorgezogen wird. Hier könnten die Nachhallzeiten bei den tiefen Frequenzen durch zusätzliche Absorber verbessert werden. Beim Betreten des Raums ist die Halbierung der mittleren Nachhallzeit von 1,2 auf 0,6 s aber auch so schon sehr deutlich wahrnehmbar.

nahmen groß und sollte unbedingt genutzt werden. Dabei geht es nicht darum, die Klangqualität eines Tonstudios zu erreichen. Schon mit den durchgeführten Maßnahmen ist eine Verbesserung sofort spürbar, die sich kurz-, mittel- und langfristig positiv auf das Wohlbefinden, die Gesundheit und die Lernfähigkeit der Anwesenden auswirkt.

Gerade im Bereich der Akustik ist der Hebel durch einfache und kostengünstige Maß-



		unsaniert	saniert
Übersicht und Ausstattung	installierte Leistung	464 W	328 W
	dimmbar (mehrkanalig)	nein	ja
	Tageslichtabsenkung	nein	ja
	Präsenzmelder	nein	ja
	bildschirmarbeitsplatztauglich	nein	ja
	vorauswählbare Lichtstimmungen	keine	3
Messungen	Beleuchtung (minimal)	160 lx	590 lx
	Beleuchtung (maximal)	420 lx	1.170 lx
	Beleuchtung (Mittelwert)	280 lx	980 lx
	Anzahl (Anteil) Tische < 300 lx	9 (64 %)	0 (0 %)
	Anzahl (Anteil) Tische < 500 lx	14 (100 %)	0 (0 %)

Tabelle 4.2: Beleuchtungssituation vor und nach der Sanierung eines Grundschulklassenraums.

4.3 Was kostet eine SMARTe Sanierung?

Die integrale Sanierung von Klassenräumen und insbesondere der Einbau maschineller Lüftungsgeräte ist mit Investitionen verbunden, die für die Schulträger anfangs eine Hürde darstellen können. Auch müssen die Wartung einkalkuliert und Betriebskosten getragen werden.

Kostenrechnung Sanierungsbeispiel

Die folgende Kostenabschätzung betrachtet exemplarisch die integrale Sanierung des im Abschnitt „4.1 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen“ vorgestellten Klassenraums einer Grundschule mit blanker Betondecke. Folgende Maßnahmen wurden durchgeführt:

Installation eines Deckenlüftungsgeräts einschließlich

- zwei Kernbohrungen (Durchmesser 355 mm) und Außenluftanbindung mit gedämmten Luftkanälen und Wetterschutzgittern
- hydraulischer Einbindung des integrierten Zwei-Leiter-Wärmeübertragers in den Warmwasserkreislauf
- elektrischem Anschluss und Installation eines Raumbediengeräts

Installation eines akustisch wirksamen Systemdeckenstreifens zwischen Lüftungsgerät und gegenüberliegender Tafelseite mit

- Mineraldeckenplatten OWA Brillianto A (15 mm)
- seitlicher Verkleidung sowie Grundierung und Anstrich der Abkofferung

- Anstrich der verbleibenden Rohdeckenfläche

Installation von 12 LED-Einlegeleuchten einschließlich

- Anwesenheitssensor zum automatischen Ein- bzw. Ausschalten der Leuchten
- Tageslichtsensor zur Adaption an das einfallende Tageslicht
- Bedienfeld zum individuellen Dimmen einzelner Leuchtengruppen sowie Schnellauswahl verschiedener Settings bzw. Stimmungen
- Rückbau und Entsorgung der alten Beleuchtung

Annahmen für die Kostenabschätzung

Die Kostenschätzung geht (vereinfachend ohne Inflation) von folgenden Annahmen aus, die sich an derzeitigen Anforderungen und Richtlinien orientieren:

- **25 Anwesende** (24 Schülerinnen und Schüler sowie eine Lehrkraft). Dies entspricht der tatsächlichen Besetzung des beispielhaft betrachteten Klassenraums zum Zeitpunkt der Sanierung und spiegelt typische Verhältnisse einer Grundschule wider.
- **Lebenszyklus RLT-Gerät: 15 Jahre**
Diese Lebensdauer entspricht der Angabe in VDI 2067 Blatt 1 (Tabelle 1) [104]. In der Praxis können entsprechende Geräte oft deutlich länger betrieben werden.

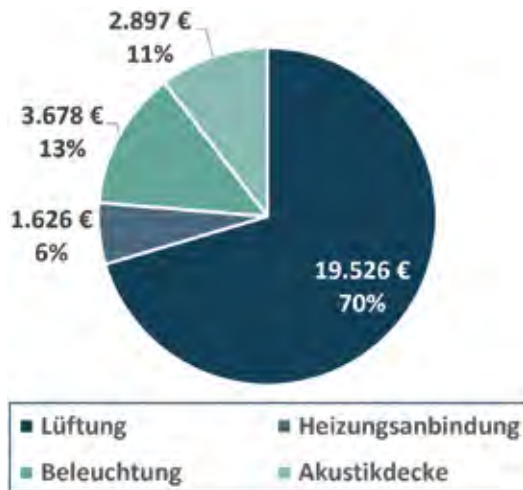


Abb. 4.30: Aufschlüsselung der Investitions- und Installationskosten (ohne Wartung etc.) am Beispiel eines integral sanierten Grundschulklassenraums.

Die Berechnung der reinen Installationskosten des Lüftungsgeräts einschließlich der hydraulischen Einbindung in den Warmwasserkreislauf wurde über die Aufwendungen für die vier betrachteten Sanierungslösungen (in Abschnitt 4.1) gemittelt. Damit ergeben sich Kosten für Investition und abgeschätzte Wartungskosten gemäß Abb. 4.30. Die Betriebskosten wurden nicht in die Kalkulation eingeschlossen, da die Strom- bzw. Gaspreisentwicklung schwer vorhersagbar ist und die genaue Raumnutzung sowie die Anzahl der Betriebsstunden eine große Rolle spielen. Für eine Abschätzung der betriebsgebundenen Einsparung durch die Wärmerückgewinnung sei auf die Beispielrechnung auf Seite 51 verwiesen.

- **mittlere jährliche Wartungskosten für Lüftungsgerät: 200 €**

Dieser Betrag wurde unter der Voraussetzung angenommen, dass die in VDI 6022-8 [106] geforderten jährlichen Filterwechsel direkt durch eine(n) Hausmeister(in) übernommen werden können und ergänzende Wartungsarbeiten in größeren Intervallen durch eine externe Firma durchgeführt werden.

- **Lebenszyklus LED-Beleuchtung: 35 Jahre**

Laut Hersteller sind für die eingesetzten Leuchten 50.000 Betriebsstunden bis zu einem Lichtstromrückgang auf 85 % des Anfangswertes zu erwarten.

- **Sanierungsintervall Systemdecke: 25 Jahre**

Die typische Lebensdauer der eingesetzten Systemdecke liegt laut Hersteller für diesen Anwendungsfall bei 25 bis 30 Jahren.

Relative Ausgaben pro Kopf und Jahr

Um die anfänglichen Investitionskosten sowie die zu erwartende Wartungskosten besser einordnen zu können, werden die Ausgaben ins Verhältnis zu der Anzahl der anwesenden Schülerinnen, Schüler und Lehrkräfte gesetzt und mit den sonstigen Pro-Kopf-Ausgaben verglichen. Für das genannte Beispiel ergeben sich unter den getroffenen Annahmen die in Tabelle 4.3 angegebenen Investitions- und Wartungskosten pro Kopf, wobei ausdrücklich auf den beispielhaften Charakter bzw. die getroffenen Annahmen hingewiesen wird. Insbesondere hängt die Berechnung stark von der tatsächlichen Anzahl der anwesenden Personen ab: Ist ein Raum stärker ausgelastet, sinken rein rechnerisch auch die spezifischen Kosten pro Kopf.

Als Gesamtausgaben je Schülerin und Schüler gibt das Statistische Bundesamt für das Jahr 2022 für die öffentlichen allgemeinbil-



	pro Jahr und Raum	pro Jahr und Person bei	
		25 Anwesenden	34 Anwesenden
Lüftung mit Heizkreiseinbindung und Wartung	1.610 €	64,41 €	47,35 €
Beleuchtung	105 €	4,20 €	3,09 €
Akustikdecke	116 €	4,64 €	3,41 €
gesamt	1.831 €	73,25 €	53,85 €

Tabelle 4.3: Exemplarische spezifische Aufschlüsselung der Aufwendungen für Investition und angenommener Wartung am Beispiel eines integral sanierten Grundschul-Klassenraums.

Im Beispiel genügen 73 Euro pro Person und Jahr für sanierte Räume.

denden Schulen durchschnittlich 9.500 € an, wobei die Grundschulen mit 8.200 € am unteren Ende, die Gymnasien mit 10.500 € und die integrierten Gesamtschulen mit 11.400 € über dem Durchschnitt lagen [80].

Die Ausgaben variieren zwischen Schularten und Bundesländern, u. a. aufgrund unterschiedlicher Betreuungsverhältnisse, Pflichtstundenzahlen der Lehrkräfte, Besoldung, Klassengrößen und Besoldungsstrukturen [82]. Die Personalkosten machen mit 7.200 € etwa 77 % der Gesamtausgaben für einen Schulplatz aus. Die restlichen Mittel entfallen mit 1.300 € bzw. 14 % auf laufende Sachausgaben sowie mit 900 € bzw. 10 % auf Investitionen [80], einschließlich Schulgebäude und sonstige Sachgüter [82].

Laut Statistischem Bundesamt sind die Ausgabenunterschiede zwischen den Bundesländern insbesondere auf landesspezifische Regelungen zur Lernmittelfreiheit sowie auf Unterschiede sowohl in der Gebäudebewirtschaftung als auch im erforderlichen Modernisierungsaufwand zurückzuführen [82].

Gutes und gesundes Raumklima für kaum 0,8 % der Gesamtkosten eines Schulplatzes

Die exemplarisch ermittelten Ausgaben für die betrachtete integrale Klassenraumsanierung relativieren sich beim Vergleich mit den übrigen Aufwendungen: Die reinen Investitionskosten ohne Wartung betragen nur knapp 7 % (bei 25 Anwesende) bzw. 5 % (34 Anwesende) der in der Statistik erfassten durchschnittlichen jährlichen Investitionskosten von 900 €. Da dieser Betrag bereits Schulbau- und damit auch Sanierungsmaßnahmen einschließt, dürfte die Mehrbelastung durch das vorgeschlagene integrale Sanierungskonzept noch weniger ins Gewicht fallen.

Setzt man die Sanierungskosten außerdem ins Verhältnis zu allen schulischen Aufwendungen einschließlich der Personalkosten, so machen sie gerade einmal 0,8 % der Gesamtkosten aus. Dieser Anteil dürfte noch geringer ausfallen, wenn man die möglichen Einsparungen bei Personalausgaben berücksichtigt, wenn weniger krankheits- und stressbedingte Ausfälle von Lehrkräften kompensiert werden müssen. Ein gesünderes und angenehmeres Klassenraumklima sowie eine bessere Klassenraumakustik könnten dazu beitragen, solche krankheitsbedingten Fehlzeiten oder gar Frühpensionierungen zu reduzieren.



ESSENZ
für Eilige

TEIL 4 Exemplarische Sanierungsmaßnahmen

- ✓ Im Rahmen einer **Praxis-Studie** wurde die Innenraumqualität in vier Klassenräumen nach dem SMART-Prinzip verbessert. Dabei kamen verschiedene Sanierungslösungen zum Einsatz, die alle eine **Systemdecke mit Deckenlüftungsgerät** einsetzen.
- ✓ Durch die Sanierung haben sich in allen Räumen die Luftqualität, Akustik und Beleuchtung signifikant verbessert. Beispielsweise hat sich die **Sprachverständlichkeit deutlich erhöht** (halbierte Nachhallzeiten durch eingesetzte Akustikpaneele), neue LED-Leuchten und Sonnenschutz sorgen für eine **auch für Bildschirmarbeit geeignete Beleuchtung** und dank der zusätzlichen maschinellen Lüftung bleiben die **CO₂-Konzentrationen weitgehend im unbedenklichen Bereich**.
- ✓ Für die vorgestellten Lösungen liegen die **Sanierungskosten bei unter 1 % der Gesamtkosten eines Schulplatzes**. Konkret waren es im durchgerechneten Beispiel rund 75 Euro pro Person und Jahr für die Sanierung inklusive der späteren Instandhaltung.





Exkurs

Empfehlungen für Neubauvorhaben

Ergänzend folgt ein Exkurs zu Gestaltungsmöglichkeiten bei Neubauvorhaben, um von Anfang an die Voraussetzungen für ein gutes und gesundes Lehr- und Lernklima zu schaffen.

Exkurs: Neubauvorhaben

Der vorliegende Leitfaden legt den Schwerpunkt auf Möglichkeiten, die Innenraumbedingungen im Rahmen einer Sanierung zu verbessern. Neben der Sanierung von Schulgebäuden als eine der Hauptaufgaben besteht aber auch weiterhin Bedarf an Neubauten: einerseits aufgrund steigender Schülerzahlen [81][83] und andererseits, wenn bestehende Schulgebäude in einem Zustand sind, der eine Sanierung nicht zulässt.

Neubauten bieten auch neue Chancen.

Im Rahmen von Neubauprojekten ergeben sich im Vergleich zu Sanierungen weitere Möglichkeiten, die Bedürfnisse der Schülerinnen und Schüler sowie der Lehrkräfte zu berücksichtigen und gesundheitsförderliche Räume zu schaffen. Dies wird im Folgenden kurz beleuchtet. Aufgrund des primären Fokus dieses Leitfadens auf Sanierungen werden die Themen nur angerissen und nicht im Detail ausgeführt.

Anforderungen genau analysieren und Zielgrößen festhalten – auch für den Innenraum!

Phase 0 ist entscheidend, damit gute und nutzerzentrierte Innenräume gelingen.

Wie bei Sanierungsvorhaben steht auch bei Neubauprojekten vor der Planung (HOAI-Leistungsphasen 1 bis 5) und Umsetzung (HOAI-Leistungsphasen 6 bis 9) [46] die Analyse der Anforderungen und die Abstimmung der Ziele und Möglichkeiten im Vordergrund. Neben klassischen Aspekten wie der Erstellung eines Raumprogramms oder Festlegung des möglichen Kostenrahmens gilt es in dieser Phase, sich über die Ziele für die Innenraumbedingungen zu verständigen und möglichst konkrete Zielwerte festzulegen. Dabei gelten auch für Neubauten die in Teil 1 beschriebenen Anforderungen und Richtwerte.

Was ist die HOAI?

Die HOAI (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure) ist eine deutsche Verordnung, die regelt, wie Architekten und Ingenieure für ihre Planungsleistungen bezahlt werden. Sie teilt die Arbeit in 9 Leistungsphasen auf und ordnet Projekte nach Schwierigkeitsgrad in empfohlene Honorarzonen ein. Ziel der HOAI ist es, eine faire Vergütung und hohe Qualität bei Bauprojekten zu sichern.

Zusätzlich zu den 9 offiziellen Leistungsphasen sollte (gerade im Schulbau) im Rahmen einer „Phase 0“ eine partizipative Vorplanung mit allen Beteiligten stattfinden. Ebenso etabliert sich eine Phase 10 zur Inbetriebnahme und Monitoring (siehe Abb. Ex.1). Für weitere Informationen sei z. B. auf die Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft [58] und die Sophia-Akademie [77] hingewiesen.

Je nach Ausgangssituation kann die Zahl möglicher Lösungen bei Neubauvorhaben jedoch deutlich größer sein als bei Sanierungsprojekten. Relativ begrenzt sind die Möglichkeiten, wenn das Grundstück bereits feststeht und durch seine Lage, z. B. an stark befahrenen Straßen oder in beengten städtebaulichen Situationen die Planungsfreiheit einschränkt. Dagegen sind die Möglichkeiten umso größer, je weniger Festlegungen bereits getroffen wurden.

Partizipative Vorplanung

In Phase 0 kommen Eltern, Lehrkräfte, Schüler:innen, Politik und Nachbarschaft an einen Tisch. Im intensiven Austausch entstehen Vorgaben für das pädagogische Konzept und Raummodell. Darauf aufbauend beginnt die eigentliche Planungs- und Umsetzungsphase nach HOAI.

- 0 • Infos sammeln
- analysieren
- vertiefen
- konkretisieren
- festlegen

HOAI-Leistungsphasen

Planung

- 1 Grundlagenermittlung
- 2 Vorplanung
- 3 Entwurfsplanung
- 4 Genehmigungsplanung
- 5 Ausführungsplanung

Umsetzung

- 6 Vorbereitung der Vergabe
- 7 Mitwirkung bei der Vergabe
- 8 Objektüberwachung
- 9 Objektbetreuung

Inbetriebnahme und Monitoring

- 10 • nutzen
- trainieren
- evaluieren
- optimieren
- weitergeben

Phase 10 ergänzt die HOAI um ein Monitoring der Gebäude-nutzung nach Inbetriebnahme.

Sie stärkt die Beziehung der Nutzer:innen zu den Räumen, fördert Verantwortungsgefühl und sichert die nachhaltige Optimierung sowie die Übertragbarkeit auf zukünftige Projekte.

Die Umgebung bei der Planung berücksichtigen

Besteht noch die Möglichkeit, das Baugrundstück festzulegen oder bietet das Baugrundstück Spielraum für Varianten, kann und sollte bereits vor den ersten Überlegungen zum Gebäudeentwurf diskutiert werden, welche Anforderungen sich aus diesen ersten Festlegungen ergeben. Denn frühzeitige Überlegungen und Entscheidungen zur genauen Gebäudelage beeinflussen bereits in diesem sehr frühen Planungsstadium, mit welchem baulichen, technischen und finanziellen Aufwand gesundheitsförderliche Innenraumbedingungen geschaffen werden können. Eine große Rolle spielt die Lage in Bezug auf vorhandene Schallemissionen in der Umgebung (angrenzende Verkehrsadern oder Industriebetriebe) und Einflussgrößen auf die Außenluftqualität (Lage in Parknähe oder an Verkehrsader). Auch die Orientierung des Baukörpers und die Ausrichtung von Fensterflächen und Aufenthaltsräumen innerhalb des Baukörpers in Bezug zu äußeren Lärm-, Luft- und Lichtquellen sind von Bedeutung.

Mit allen Fachbereichen gemeinsam planen

Der frühzeitige Austausch zwischen den Beteiligten aus Architektur und Ingenieurwesen ist notwendig und hilfreich, um z. B. mit planerisch gestalterischen Maßnahmen, die häufig unter dem Begriff passive Maßnahmen zusammengefasst werden, spätere Mehraufwände zu reduzieren.

Gute Architektur kann beispielsweise den Heiz- und Kühlenergiebedarf, die Dimensionierung von Lüftungskomponenten und den Energiebedarf für künstliche Beleuchtung durch bewusste Anordnung und Gestaltung von Räumen, durch maßvolle, aber aus-

Abb. Ex.1: Offizielle Leistungsphasen gemäß HOAI [46] sowie ergänzende Phasen 0 und 10.

reichende Fensterflächen und -öffnungen sowie durch den Einsatz von nutzbarer thermischer Masse deutlich reduzieren. Dabei ist Vorsicht geboten, sich auf mögliche Blaupausen zu verlassen, denn gute Architektur muss sich sowohl den städtebaulichen und klimatischen Gegebenheiten als auch den Nutzungsbedürfnissen und der Umgebung anpassen.

Spielraum beim Einsatz technischer Anlagen nutzen

Generell bieten Schulneubauten auch deutlich mehr Möglichkeiten, technische Anlagen gezielt einzusetzen. Bei der Planung von Lüftungskonzepten etwa können dezentrale, zentrale, hybride oder natürliche Lüftungsvarianten in Bezug auf ihre jeweiligen Vor- und Nachteile im Zusammenspiel mit den Umgebungsfaktoren wie Außenlärm und Luftverschmutzung sowie dem architektonischen Entwurfsansatz miteinander verglichen werden.

Zentrale Lüftungsgeräte, die – wie in Teil 2 dieses Leitfadens beschrieben – bei Sanierungen eher selten zum Einsatz kommen, weisen im Neubau häufiger wirtschaftliche Vorteile gegenüber dezentralen Lösungen auf, da die Luftkanäle direkt bei der Planung des Neubaus vorgesehen werden können. Ein großes, zentrales Lüftungsgerät ist in der Regel kostengünstiger als mehrere dezentrale Lüftungsgeräte. Welches Lösungskonzept in Neubauvorhaben tatsächlich kostengünstiger ist, hängt stark vom Gebäude und den damit verbundenen Investitionen in das Lüftungskanalnetz ab.

Gesundheitsförderliche Räume schaffen und individuellen Einfluss ermöglichen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich bei Neubauvorhaben deutlich mehr und kostengünstiger umzusetzende Möglichkeiten bieten, gesundheitsförderliche Bedingungen für Lernende und Lehrende zu schaffen. Dabei ist – ebenso wie bei der Sanierung – darauf zu achten, dass für eine gesunde Entwicklung von Kindern nicht alle unbehaglichen Reize beseitigt werden sollten, damit der Körper lernt, mit entsprechenden Störreizen umzugehen und sich anzupassen. Dies gilt – wie in Teil 1 ausgeführt – vor allem für Temperaturbedingungen und Tageslichtversorgung, weniger für Aspekte der Luftqualität und Akustik. Gleichzeitig kann in allen Bereichen die Erfahrung eigener Einfluss- und Kontrollmöglichkeiten das Gefühl der Selbstwirksamkeit steigern und der Schulkontext genutzt werden, um auch pädagogisch einen ressourcenschonenden und gesundheitsförderlichen Umgang mit dem Gebäude zu erlernen und zu erleben und die Technikabhängigkeit zu reduzieren.

Schließlich ist Gesundheitsförderung, ganzheitlich betrachtet, mehr als nur die Frage nach der Reduktion von Reizen, die Unbehagen auslösen können. Es ist auch eine Frage von Suffizienz und Resilienz. Resiliente Lösungen sind nicht immer komplex, sondern oft eher einfach und robust.



ESSENZ für Eilige

EXKURS

Empfehlungen für Neubauvorhaben

- ✓ Neubauprojekte bieten über Sanierungen hinausgehende Möglichkeiten. Dabei ist die **Phase 0 der Bauplanung entscheidend**. Hier sollten die Anforderungen für die Innenräume genau analysiert und Zielgrößen festgehalten werden, die in die Gesamtplanung der Schulgebäude einfließen.
- ✓ Eine gute Gebäudeplanung ist **ganzheitlich (Luft, Raumklima, Licht und Akustik beachtet), energieeffizient und nachhaltig (Instandhaltung mitgeplant)**.
- ✓ Gesundheitsförderung ist mehr als nur die Frage nach der Reduktion von Reizen, die Unbehagen auslösen können. Es bedeutet auch Suffizienz und Resilienz. Resiliente Lösungen sind oft eher einfach und robust. Tipp: Auch **Möglichkeiten der individuellen Einflussnahme** auf das Lernklima in Klassenräumen einplanen!



Quellenverzeichnis

- [1] AIRFLOW Lufttechnik GmbH, „Schulzentrum, Much“, <https://www.airflow.de/referenzen/schulzentrum-much/>
- [2] AIRFLOW Lufttechnik GmbH, „Vom Sanierungsfall zum Vorzeigeprojekt“, Rachel Carson Sekundarschule (Dormagen), <https://www.airflow.de/referenzen/rachel-carson-sekundarschule-dormagen/>
- [3] AKUSTEC Ingenieurbüro für Schall- und Schwingungstechnik, Dipl.-Ing. Wolfgang Metzen VDI.: „Lombard-Effekt“, <https://www.akustec.de/topics.html>
- [4] ANSI/ASHRAE Standard 55: „Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy“ (2023)
- [5] Arbeitskreis Klimatechnik (Hrsg.): „Lüftung unter Pandemiebedingungen – Stellungnahme vom Arbeitskreis Klimatechnik, insbesondere zu Schulen und vergleichbaren Räumen“ (2022)
- [6] Bakó-Biró, Z.; Clements-Croome, D. J.; Kochhar, N.; Awbi, H. B.; Williams, M. J.: „Ventilation rates in schools and pupils’ performance“, *Building and Environment* (2012). DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.08.018
- [7] Baloch, R. M.; Maesano, C. N.; Christoffersen, J.; Mandin, C.; Csobod, E.; Fernandes, E. d. O.; Annesi-Maesano, I.; Consortium, O. B. O. T. S.: „Daylight and School Performance in European Schoolchildren“, *International Journal of Environmental Research and Public Health* (2020). DOI: 10.3390/ijerph18010258
- [8] Bildungsportal Niedersachsen: „Fensterlüftung“, <https://bildungsportal-niedersachsen.de/aug/uebergreifendethemen/fensterlueftung>
- [9] Blauer Engel: „Das Deutsche Umweltzeichen“, <https://www.blauer-engel.de/>
- [10] Blume, C.; Garbazza, C.; Spitschan, M.: „Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood“, *Somnology* (2019). DOI: 10.1007/s11818-019-00215-x
- [11] Brand, S.; Salzgeber, J.: „Kosten steigen schneller als die Investitionen: Bedarfe für Schulen weiter hoch“, KfW Research Nr. 401 (2022), <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2022/Fokus-Nr.-401-September-2022-Update-Schulen.pdf>
- [12] Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e.V. (BTGA); TGA-Repräsentanz Berlin; Verein Deutscher Ingenieure (VDI); Fachverband Gebäude-Klima e.V. (FGK); VDMA e.V.; Herstellerverband RLT-Geräte e.V. (Hrsg.): „Mindestens zu erfüllende Rahmenbedingungen bei der Planung von maschinellen Schullüftungssystemen“ (2022)
- [13] Burgholz, T. M.; Müller, D.: Vortrag „Wärme, Luft und Akustik in Unter-

- richtsräumen – Ergebnisse einer Feldstudie in Nordrhein-Westfalen“, https://www.zukunftsraum-schule.de/pdf/kongress-2019/VRfL/112_VRfL_BURGHOLZ_PW.pdf
- [14] Burgholz, T.; Müller, D.: „CO₂ levels in differently ventilated classrooms with regard to occupational ventilation behavior under spring and summer conditions“, 16th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2020), Seoul (2020)
- [15] Burgholz, T.; Müller, D.: „Comparison of CO₂ Concentrations During Lessons in Naturally and Mechanically Ventilated Classrooms“, 15th Roomvent Virtual Conference: Energy Efficient Ventilation for Healthy Future Buildings, Turin (2021)
- [16] Ciarleglio, C. M.; Resuehr, H. E. S.; McMahon, D. G.: „Interactions of the serotonin and circadian systems: nature and nurture in rhythms and blues“, Neuroscience (2011). DOI: 10.1016/j.neuroscience.2011.09.036
- [17] Coley, D. A.; Greeves, R.; Saxby, B. K.: „The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class“, International Journal of Ventilation (2007). DOI: 10.1080/14733315.2007.11683770
- [18] Delvaeye, R.; Ryckaert, W.; Stroobant, L.; Hanselaer, P.; Klein, R.; Breesch, H.: „Analysis of energy savings of three daylight control systems in a school building by means of monitoring“, Energy and Buildings (2016). DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.033
- [19] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): „Innenraum-arbeitsplätze – Vorgehensempfehlung für die Ermittlungen zum Arbeitsumfeld“ (2013), ISBN 9783864230653 (print)
- [20] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): „Sichere Schulen – Unterrichtsraum“ (2014-11)
- [21] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Regel 102-601 „Branche Schule“ (2019-08)
- [22] DIN 18041 Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung (2016-03). Beuth, Berlin
- [23] DIN EN 12464-1 Beiblatt 1: „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten“ (2024-05) Beuth, Berlin
- [24] DIN EN 12464-1: „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“ (2021-11). Beuth, Berlin
- [25] DIN EN 12792: „Lüftung von Gebäuden – Symbole, Terminologie und graphische Symbole“ (2004-01). Beuth, Berlin
- [26] DIN EN 14501: „Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Leistungsanforderungen und Klassifizierung“ (2021-09). Beuth, Berlin

- [27] DIN EN 16798-3: „Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme“ (2017-11). Beuth, Berlin
- [28] DIN EN 17037: „Tageslicht in Gebäuden“ (2022-05). Beuth, Berlin
- [29] DIN EN 410:2011: „Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen“ (2011-04). Beuth, Berlin
- [30] DIN EN ISO 16890-1: „Luftfilter für die allgemeine Raumlüftungstechnik – Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad“ (2017-08). Beuth, Berlin
- [31] DIN EN ISO 6946: „Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren“ (2018-03). Beuth, Berlin
- [32] DIN EN ISO 7730: „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“ (2006-05). Beuth, Berlin
- [33] DIN EN ISO 16000-26: „Innenraumluftverunreinigung – Teil 26: Probenahme- und Messstrategie für Kohlendioxid (CO₂)“ (2012-11). Beuth, Berlin
- [34] DIN EN ISO 7726: „Umgebungs-klima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen“ (2021-03). Beuth, Berlin
- [35] DIN/TS 5031-100 (Vornorm): „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen“ (2021-11). Beuth, Berlin
- [36] EdSource: „Average Daily Attendance“, <https://edsources.org/glossary/average-daily-attendance-ada>
- [37] Education Data Partnership: „How Students Are Counted“, <https://www.ed-data.org/article/How-Students-Are-Counted>
- [38] Eppenberger, L. S.; Sturm, V.: „The Role of Time Exposed to Outdoor Light for Myopia Prevalence and Progression: A Literature Review“, *Clinical ophthalmology* (2020). DOI: 10.2147/OPHTH.S245192
- [39] Fachverband Gebäude-Klima e. V. (Hrsg.): Status-Report 61 „Akustik in Klassenräumen“ (2023)
- [40] Fraunhofer IBP, Leistner P. et al.: „Leistung von Zweitklässlern beim Kategorisieren von Lauten“ (Dezember 2006)
- [41] Freudenberg Filtration Technologies (MicronAir Blue), „Feinstaub im Größenvergleich“, <https://micronairblue.com>

- com/de/feinstaubbelastung-kfz-innenraumfilter
- [42] Gaihre, S.; Semple, S.; Miller, J.; Fielding, S.; Turner, S.: „Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment”, *The Journal of school health* (2014). DOI: 10.1111/josh.12183
- [43] Hanssen, M. J. W.; van der Lans, A. A. J. J.; Brans, B.; Hoeks, J.; Jardon, K. M. C.; Schaart, G.; Mottaghy, F. M.; Schrauwen, P.; van Marken Lichtenbelt, W. D.: „Short-term Cold Acclimation Recruits Brown Adipose Tissue in Obese Humans”, *Diabetes* (2016). DOI: 10.2337/db15-1372
- [44] Heschong, L.; Saxena, M.; Wayland, S.; Perry, T.: Final Project Report „Daylight Metrics Report for the CEC PIER Daylighting Plus Research Program” (2012). DOI: 10.13140/RG.2.2.33003.59689
- [45] Heschong, L.; Wright, R.; Okura, S.: „Daylighting Impacts on Human Performance in School”, *Journal of the Illuminating Engineering Society* (2013). DOI: 10.1080/00994480.2002.10748396
- [46] HOAI 2021 Volltext: „Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI)”, <https://www.hoai.de/hoai/volltext/hoai-2021/>
- [47] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): „Climate Change 2013 – The Physical Science Basis”, Cambridge University Press (2013)
- [48] Kaminska, A.: „Impact of Building Orientation on Daylight Availability and Energy Savings Potential in an Academic Classroom”, *Energies* (2020). DOI: 10.3390/en13184916
- [49] Kampmann GmbH & Co. KG, „Optimales Klima im Klassenzimmer”, Sünthe-Marienschule (Wietmarschen), <https://www.kampmann.de/hvac/referenzen/suente-marienschule>
- [50] Klätte, M.; Meis, M.; Nocke, C.; Schick, A.: „Akustik in Schulen: Könnt ihr denn nicht zuhören?!", *Einblicke* Nr. 35, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (2002)
- [51] KomNet-Wissensdatenbank: „Wie ist der Stand bezüglich Raumhöhen in Klassenräumen? Die Arbeitsstättenverordnung beschreibt Schutzziele, konkrete Angaben zur Raumhöhe werden jedoch nicht gemacht”, Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsgestaltung NRW, https://www.komnet.nrw.de/_sitetools/dialog/8480
- [52] Kremer, M. T.; Rewitz, K.; Müller, D.: Whitepaper „Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen mittels dynamischer Simulationsmodelle”, Aachen 2022. DOI: 10.18154/RWTH-2022-01613

- [53] Leistner, P.; Hellbrück, J.; Klätte, M.; Seidel, J.; Weber, L.: Forschungsbericht FZKA-BWPLUS „Lärm in der schulischen Umwelt und kognitive Leistungen bei Grundschulkindern“ (2006)
- [54] licht.de, Fördergemeinschaft Gutes Licht: licht.wissen 21 „Leitfaden Human Centric Lighting (HCL)“ (2021)
- [55] licht.de: „Lichtfarbe“, <https://www.licht.de/de/grundlagen/lichtlexikon/details-lichtlexikon/lichtfarbe>
- [56] Mattenklott, M.; Höfert, N.: „Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt – Vergleich der Begriffsbestimmungen“, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft (2009)
- [57] Ministerium der Finanzen Rheinland Pfalz: Rundschreiben „Bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen“, MinBl. 2004, S. 156 (2004-03)
- [58] Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft, <https://www.montag-stiftungen.de/ueber-uns/montag-stiftung-jugend-und-gesellschaft>
- [59] Moore, R. Y.: „Suprachiasmatic nucleus in sleep-wake regulation“, Sleep medicine (2007). DOI: 10.1016/J.SLEEP.2007.10.003
- [60] Mundt, E.; Mathisen, M. P.; Nielsen, P. V.; Moser, A.: „REHVA Guidebook No. 2 – Ventilation Effectiveness“. REHVA, Brüssel 2004. ISBN: 2960046803
- [61] Fraunhofer IBP, Leistner P.: „Raumakustischer Effekt“ (Dezember 2006)
- [62] Nienaber, F.; Rewitz, K.; Seiwert, P.; Müller, D.: Whitepaper „Einfluss der Luftfeuchte auf den Menschen und seine Gesundheit“, Aachen 2021. DOI: 10.18154/RWTH-2021-01238
- [63] Oberdörster, M.; Tiesler, G.: „Akustische Ergonomie der Schule“, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2006), ISBN: 3-86509-513-5
- [64] O'Brien, W.; Kapsis, K.; Athienitis, A. K.: „Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review“, Building and Environment (2013). DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.10.003
- [65] Ostmann, P.; Derwein, D.; Rewitz, K.; Kremer, M.; Müller, D.: „Computational Fluid Dynamics-Based Calculation of Aerosol Transport in a Classroom with Window Ventilation, Mechanical Ventilation and Mobile Air Purifier“, MDPI Atmosphere (2024). DOI: 10.3390/atmos15010140
- [66] Pallubinsky, H.; Kramer, R. P.; van Marken Lichtenbelt, W. D.: „Establishing resilience in times of climate change-a perspective on humans and buildings“, Climatic Change (2023). DOI: 10.1007/s10584-023-03614-0
- [67] Pallubinsky, H.; Phielix, E.; Dautzenberg, B.; Schaart, G.; Connell, N. J.; Wit-Verheggen, V. de; Havekes, B.; van

- Baak, M. A.; Schrauwen, P.; van Marken Lichtenbelt, W. D.: „Passive exposure to heat improves glucose metabolism in overweight humans”, *Acta physiologica* (2020). DOI: 10.1111/apha.13488
- [68] profilter (bridgify GmbH): „Filterklassen für die Lüftung nach ISO-Normen”, <https://profilter.at/blog/fachwissen-1/filterklassen-fur-die-luftung-nach-iso-normen-5>
- [69] ROCKWOOL Rockfon GmbH, „Primary School no 46 in Poznan”, (Polen), <https://www.rockfon.co.uk/sectors/case-studies/primary-school-no-46-in-poznan/> und <https://www.rockfon.de/produkte/rockfon-system-eclipse-island/>
- [70] Sedelbauer, K.; Grün, G.; Urlaub, S.; Study Report „Impact of the indoor environment on learning in schools in Europe”, Holzkirchen 2015. Corpus ID: 209503772
- [71] Seifert, B.: „Richtwerte für die Innenraumluft – Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert)”, *Bundesgesundheitsblatt* (1999). DOI: 10.1007/s001030050091
- [72] Shackelford, J.; Mathew, P.; Regnier, C.; Walter, T.: „Laboratory Validation of Integrated Lighting Systems Retrofit Performance and Energy Savings”, *Energies* (2020). DOI: 10.3390/en13133329
- [73] Shendell, D. G.; Prill, R.; Fisk, W. J.; Apte, M. G.; Blake, D.; Faulkner, D.: „Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho”, *Indoor Air* (2004). DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x
- [74] Shield, B.; Conetta, R.; Dockrell, J.; Connolly, D.; Cox, T.; Mydlarz, C.: „A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in England”, *The Journal of the Acoustical Society of America* (2015). DOI: 10.1121/1.4904528
- [75] Slegers, P. J.; Moolenaar, N. M.; Galletzka, M.; Pruyn, A.; Sarroukh, B. E.; van der Zande, B.: „Lighting affects students’ concentration positively: Findings from three Dutch studies”, *Lighting Research & Technology* (2012). DOI: 10.1177/1477153512446099
- [76] SNR 592024:2021: „Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik” SIA (2021), Zürich
- [77] Sophia-Akademie, <https://sophia-akademie.de/>
- [78] Stadt Zürich: „Feinstaub”, <https://www.stadt-zuerich.ch/de/gesundheit/gesundheitschutz/luftqualitaet/luftschadstoffe/feinstaub.html>
- [79] Statistisches Bundesamt (Destatis): „Wohnfläche”, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/tabelle-wo4-wohnflaeche.html>

- [80] Statistisches Bundesamt (Destatis): Pressemitteilung Nr. 097 vom 13. März 2024 („9 500 Euro je Schülerin und Schüler an öffentlichen Schulen im Jahr 2022“), Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_097_217.html
- [81] Statistisches Bundesamt (Destatis): Pressemitteilung Nr. 101 vom 14. März 2024 („1,0 % mehr Schülerinnen und Schüler im Schuljahr 2023/2024“), Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_101_211.html
- [82] Statistisches Bundesamt (Destatis): Broschüre „Schulen auf einen Blick (Ausgabe 2018)“, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Schulen/Publikationen/Downloads-Schulen/broschuere-schulen-blick-0110018189004.pdf>
- [83] Statistisches Bundesamt (Destatis): „Zahl der Einschulungen“, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Bildungsindikatoren/einschulungen.html>
- [84] Statistisches Bundesamt (Statista): „Anzahl der allgemeinbildenden Schulen in Deutschland in den Schuljahren von 2000/2001 bis 2023/2024“, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/476776/umfrage/allgemeinbildende-schulen-in-deutschland/>
- [85] Stiftung Warentest: „CO₂-Messgeräte und -Ampeln im Test“, <https://www.test.de/CO2-Messgeraete-und-CO2-Ampeln-im-Test-5709239-0/>
- [86] Swegon Germany GmbH, „Frischer Wind in Esting und Olching“, Grundschule Olching, <https://www.swegon.com/de/referenzen/schulen-und-kitas/grundschule-esting-und-olching/>
- [87] Syndicus, M.; Huang, Q.; Frisch, J.; van Treeck, C. A.; Parting, A.: Fachartikel „Luftqualität in Klassenzimmern“, tab 1-2/2023, <https://www.tab.de/artikel/luftqualitaet-in-klassenzimmern-3903017.html>
- [88] Tartarini, F.; Schiavon, S.; Cheung, T.; Hoyt, T.: „CBE Thermal Comfort Tool : online tool for thermal comfort calculations and visualizations“, SoftwareX 12, 100563. (2020), <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>
- [89] tecalor GmbH, „Bestmögliche Luftqualität für Schüler und Lehrer“, Einhard-Gymnasium (Aachen), <https://www.tecalor.de/de/ratgeber/referenzen/objektbericht-einhard-gymnasium-aachen-lueftungsanlagen.html>
- [90] Technische Regeln für Arbeitsstätten: ASR A1.2 „Raumabmessungen und Bewegungsflächen“. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2013, zuletzt geändert 2022)

- [91] Technische Regeln für Arbeitsstätten: ASR A3.4 „Beleuchtung und Sichtverbindung“. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2023)
- [92] Technische Regeln für Arbeitsstätten: ASR A3.5 „Raumtemperatur“. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2010, zuletzt geändert 2022)
- [93] Technische Regeln für Arbeitsstätten: ASR A3.6 „Lüftung“. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2012, zuletzt geändert 2018)
- [94] Technische Regeln für Arbeitsstätten: ASR A3.7 „Lärm“. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2021)
- [95] Technische Regeln für Gefahrstoffe: TRGS 900 „Arbeitsplatzgrenzwerte“. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2006, zuletzt geändert und ergänzt 2024)
- [96] Texas Education Agency (Office of School Finance): „Average Daily Attendance (ADA) and Weighted ADA (WADA)“ (2020), <https://tea.texas.gov/finance-and-grants/state-funding/state-funding-manuals/ada-and-wada-one-pager.pdf>
- [97] Tosini, G.; Ferguson, I.; Tsubota, K.: „Effects of blue light on the circadian system and eye physiology“, *Molecular Vision* (2016). PMID: 26900325
- [98] Umweltbundesamt: „Anforderungen an die Innenraumluftqualität in Gebäuden: Gesundheitliche Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VVOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten“, Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (2021)
- [99] Umweltbundesamt: „Flüchtige organische Verbindungen“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#wie-konnen-voc-vermindert-werden>
- [100] Umweltbundesamt: „Richtig Lüften in Schulen“, <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#wie-stelle-ich-fest-ob-ein-schulraum-ausreichend-geluftet-werden-kann>
- [101] Umweltbundesamt: „Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittelwerte)“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2-4_abb_langzeitreihen-konz_2024-05-17.xlsx
- [102] Umweltbundesamt: „Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden“, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (2008)
- [103] van Marken Lichtenbelt, W.; Hanssen, M.; Pallubinsky, H.; Kingma, B.; Schellen, L.: „Healthy excursions outside the thermal comfort zone“, *Building Research & Information* (2017). DOI: 10.1080/09613218.2017.1307647

- [104] VDI 2067-1: „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung“, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG) (2012-09). Beuth Berlin
- [105] VDI 2081-1: „Raumluftechnik – Geräuscherzeugung und Lärmminde- rung“, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG) (2022-04). Beuth Berlin
- [106] VDI 6022-8: „Raumluftechnik, Raum- luftqualität – Reinigung von RLT-An- lagen und Luftleitungen“, VDI-Gesell- schaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG) (2024-09). Beuth Berlin
- [107] Wargocki, P.; Wyon, D. P.: „Effects of HVAC on students performance“, ASHRAE Journal (2006)
- [108] Zhao, W.-T.; Yang, M.; Wu, H.-M.; Yang, L.; Zhang, X.-M.; Huang, Y.: „System- atic Review and Meta-Analysis of the Association between Sarcopenia and Dysphagia“, The Journal of Nutrition, Health & Aging (2018). DOI: 10.1007/ s12603-018-1055-z

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Physikalische Einflussfaktoren auf das Lehr- und Lernklima in Klassenräumen. Seite 8

Abb. 1.2: Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit 1960 (eigene Darstellung in Anlehnung an [101]). Seite 11

Abb. 1.3: Geschwindigkeit der Bearbeitung von Aufgaben durch Schülerinnen und Schüler bei verschiedenen personenbezogenen Außenluftvolumenströmen (eigene Darstellung in Anlehnung an [107]). Seite 12

Abb. 1.4: Wirkung von Feinstaub auf den menschlichen Körper (eigene Darstellung in Anlehnung an [78]). Seite 15

Abb. 1.5: Feinstaub im Größenvergleich (eigene Darstellung in Anlehnung an [41]). Seite 16

Abb. 1.6: Das Thermal Comfort Tool des Center for the Built Environment (CBE) [88] ist ein kostenloses Online-Tool für Berechnungen und Visualisierungen rund um thermischen Komfort. Seite 20

Abb. 1.7: Lombard-Effekt (eigene Darstellung in Anlehnung an Metzen [3]) und Raumakustischer Effekt (eigene Darstellung in Anlehnung an Fraunhofer IBP [61]). Seite 23

Abb. 1.8: Leistung von Zweitklässlern beim Kategorisieren von Lauten [40]. Seite 25

Abb. 1.9: Die Abbildung zeigt die spektrale Zusammensetzung von a) Tageslicht bei unterschiedlichen Farbtemperaturen, und b) einer LED (oben), einer fluoreszierenden Lichtquelle (Mitte) und einer Glühlampe (unten), normalisiert auf 100 Lumen, alle mit einer ähnlichen Farbtemperatur und visuellem Eindruck trotz unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung (eigene übersetzte Darstellung in Anlehnung an [10]). Seite 30

Abb. 2.1: Bei geöffneten Fenstern haben die Temperaturdifferenz zwischen außen und innen, vorherrschende Windgeschwindigkeiten sowie die Windrichtung Einfluss auf den Lüftungseffekt. Auf eine steuerbare maschinelle Ventilation wird vollkommen verzichtet (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]). Seite 36

Abb. 2.2: Lüftungsempfehlungen des Umweltbundesamtes [100] sowie unterschiedliche Arten der manuellen Fensterlüftung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bildungsportal Niedersachsen [8]). Seite 37

Abb. 2.3: Zeitlicher Verlauf der mittleren Raumtemperatur (links) und der mittleren CO₂-Konzentration (rechts) während einer Schulstunde für drei Außenlufttemperaturen [65]. Seite 38

Abb. 2.4: Ein Abluftventilator kann die Nachströmung der Außenluft durch gekippte Fenster unterstützen. Ist die eintretende Luft kühler als die Raumluft, entsteht eine aufsteigende Verdrängung der Raumluft, die der Ventilator im oberen Raumbereich absaugt (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]). Seite 39

Abb. 2.5: Bezeichnungen der verschiedenen Luftarten nach DIN EN 16798-3 [27]. Seite 41

Abb. 2.6: Ein zentrales Lüftungsgerät, in der Regel auf dem Gebäudedach oder im Untergeschoss, kann über ein Luftkanalnetz für den Luftaustausch (Zuluft und Abluft) mehrerer Räume sorgen. Aufgrund des hohen Installationsaufwands kommt diese Art eher in Neubauten zum Einsatz (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]). Seite 42

Abb. 2.7: Dezentrale Lüftungsgeräte sind im Raum installiert. Sie versorgen den Raum mit Frischluft und führen die Abluft nach außen ab. In den Geräten sorgen Systeme zur Wärme-, Kälte- und Feuchtigkeitsrückgewinnung für einen nachhaltigen Betrieb (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]). Seite 42

Abb. 2.8: Verschiedene Arten der Luftführung in Innenräumen (eigene Darstellung in Anlehnung an [60]). Seite 44

Abb. 2.9: Von den Schülerinnen und Schülern dekorierte Sensorbox in einer Feldstudie. Seite 48

Abb. 2.10: Schematischer Aufbau eines Lüftungsgeräts mit Wärmerückgewinnung (WRG) und einem Bypass: Sommer (links), Winter (rechts). Seite 49

Abb. 2.11: Nutzen der Wärmerückgewinnung für Altbauten (links) und Neubauten (rechts). Seite 50

Abb. 2.12: Luftreiniger arbeiten im Umluftverfahren. Dabei werden Aerosolpartikel und anhängende Keimen und Viren aus der Luft gefiltert oder Schadstoffe werden mittels Desinfektionsmaßnahmen wie z. B. UVC-Strahlern abgetötet (Abbildung von Kampmann GmbH & Co. KG aus [5]). Seite 53

Abb. 2.13: Flächige, akustisch wirksame Systemdecke mit Einlegeleuchten. Seite 54

Abb. 2.14: Lokal installierte Deckensegel (Primary School no 46 in Poznan) zur Reduktion der Nachhallzeit (ROCKWOOL Rockfon GmbH [69]). Seite 56

Abb. 2.15: Vertikal von der Decke abgehängte Baffeln zur Reduktion der Nachhallzeit (ROCKWOOL Rockfon GmbH). Seite 56

Abb. 2.16: Wege von Schallwellen in einem Klassenraum mit Deckenabsorbern (Abbildung aus [39]). Seite 57

Abb. 2.17: Wege von Schallwellen in einem Klassenraum mit Decken- und Wandabsorbern (Abbildung aus [39]). Seite 57

Abb. 2.18: Direktes und indirektes Licht: Drei Quader, von links nach rechts mit vorwiegend direktem Licht, vorwiegend indirektem Licht und einer Kombination aus beidem beleuchtet. Seite 58

Abb. 2.19: Pendelleuchte mit einer Kombination aus direkter und indirekter Beleuchtung: Sie emittiert direktes Licht nach unten und erzeugt durch Deckenreflexion indirekte Beleuchtung. Seite 58

Abb. 2.20: Beispiel einer Tageslichtsteuerung: Ein Tageslichtsensor misst das verfügbare Tageslicht und passt die Intensität der künstlichen Beleuchtung automatisch an, so dass eine konstante Helligkeit im Raum gewährleistet und der elektrische Energieverbrauch der Beleuchtung reduziert wird. Seite 59

Abb. 2.21: Beispiel für einen künstlichen Lichtverlauf nach dem Prinzip des Human Centric Lighting (HCL): Die künstliche Beleuchtung wird dem Lichtbedarf unserer inneren Uhr angepasst. Seite 61

Abb. 2.22: Beispiel eines von unten nach oben verstellbaren Sonnenschutzes für eine verbesserte Tageslichtnutzung. Im Innenbereich sind solche Systeme häufig als verspannte Jalousien oder Plissees erhältlich. Diese lassen sich in beide Richtungen, von oben nach unten oder von unten nach oben bewegen. Im Außenbereich sind entsprechende Systeme wenig verbreitet. Eine Option sind Markisen mit **Gegenzugsystem** (z. B. von Solarmatic), die wahlweise schienen- oder seilgeführt und fest im unteren Fensterbereich installiert werden können. Seite 63

Abb. 3.1: Oft ist die Decke die einzig freie nutzbare Fläche im Klassenraum und Standlüftungsgeräte oder Luftreinigung können nur mit viel Mühe untergebracht werden. Deckenlüftungsgeräte können dieses Problem lösen. Seite 68

Abb. 3.2: Überprüfung der Beschaffenheit der Klassenraumdecke vor Beginn der geplanten Sanierungsmaßnahmen (Leitfrage 1). Seite 70

Abb. 3.3: Auswahl der Weiternutzung (Fall „W“) oder Rohdecke/Rückbau (Fall „R“) einer Systemdecke in Abhängigkeit ihrer Mindestabhänghöhe sowie der Empfehlung zur lichten Mindest-Raumhöhe (Leitfrage 2). Seite 71

Abb. 3.4: Überprüfung der Tragfähigkeit der Decke (Statik) sowie Möglichkeiten zur Positionierung des Deckenlüftungsgeräts in Abhängigkeit von Fenstern (Leitfrage 3) und Integration in eine Systemdecke (Leitfrage 4). Seite 73

Abb. 3.5: Kernbohrung zur Durchführung von Lüftungskanälen durch das Mauerwerk. Seite 75

Abb. 3.6: Welche Sanierungsschritte sich im konkreten Fall empfehlen, zeigen die Antworten auf die obigen Leitfragen. Aus den Antworten ergeben sich eindeutige Buchstaben-Zahlen-Kombinationen, die jeweils für eine Sanierungslösung stehen. Alle nicht abgedeckten Szenarien sind im Sonderfall „S“ zusammengefasst. Seite 76

Abb. 3.7: Mögliche Sanierungspfade: Flussdiagramm zum vorgestellten Sanierungsansatz mit verschiedenen Möglichkeiten zur Installation eines Deckenlüftungsgeräts in Kombination mit einer Systemdecke zur Verbesserung von Raumakustik und Beleuchtung. Seite 77

Abb. 3.8: Flächig vollintegriertes Deckenlüftungsgerät (TROX GmbH) mit unsichtbarer Rohrführung durch die Decke in einem Musikraum (Fall W-G0V, Seite 85). Seite 78

Abb. 3.9: 2/3-Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts (© Airflow Lufttechnik GmbH) in ganzflächiger Akustikdecke (Schulzentrum Much) [1]. Seite 78

Abb. 3.10: 1/3-Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts (© Airflow Lufttechnik GmbH) in Systemdecke mit abgekoffelter Rohrführung durch Fensterwand (Rachel-Carson-Schule, Dormagen) [2]. Seite 78

Abb. 3.11: Teilintegriertes Deckenlüftungsgerät (tecalor GmbH) in Systemdecke an Raumrückseite mit unsichtbarer Rohrführung durch angrenzende Wand (TSA Bildung und Soziales gGmbH, Jena). Seite 78

Abb. 3.12: Teilintegration eines Deckenlüftungsgeräts (TROX GmbH) in die Systemdecke mit Aussparung entlang der Fensterwand zum Öffnen der Oberlichter mit unsichtbarer Rohrführung durch die angrenzende Außenwand (Fall W-U0T, Seite 88). Seite 78

Abb. 3.13: Aufgesetztes Deckenlüftungsgerät (tecalor GmbH) direkt an der Fensterwand mit Rohrführung durch Oberlicht-Bereich (Einhard-Gymnasium, Aachen) [89]. Seite 78

Abb. 3.14: Aufgesetztes Deckenlüftungsgerät (Swegon Germany GmbH) an Raumrückseite mit sichtbarer Rohrführung durch Isopaneel an ehemaliger Oberlichtposition (Grundschule Olching) [86]. Seite 79

Abb. 3.15: Standlüftungsgerät (Kampmann GmbH & Co. KG) kombiniert mit akustischem Wandabsorber mit sichtbarer Rohrführung durch angrenzende Wand (Fall S, Sünthe-Marienschule, Wietmarschen) [49]. Seite 79

Abb. 4.1: Fensterloser Musikraum mit Lichtkuppeln und vorhandener abgehängter Decke (vor Sanierung). Seite 83

Abb. 4.2: Informatikraum einer Gesamtschule mit vorhandener abgehängter Decke und Anbauleuchten (vor Sanierung). Seite 83

Abb. 4.3: Schallharte Betondecke und fragwürdige Positionierung der fensternahen Leuchtstoffröhren in einer Grundschule (vor Sanierung). Seite 83

Abb. 4.4: Fensterloser Musikraum mit Lichtkuppeln und vorhandener abgehängter Decke (vor Sanierung). Seite 85

Abb. 4.5: Lokaler Rückbau der vorhandenen Systemdecke an der für das Deckenlüftungsgerät vorgesehenen Position und Freilegen der Luftkanäle der bestehenden, nicht funktionierenden Grundlüftung. Seite 85

Abb. 4.6: Sanierungsschlüssel des Musikraums. Seite 86

Abb. 4.7: Kernbohrung durch die freigelegte Rohdecke zur Kanaldurchführung. Seite 86

Abb. 4.8: Durch Decke geführter Luftkanal und anschließende Abdichtung und Wiederherstellung der Dampfsperre. Seite 86

Abb. 4.9: Installation der Zarge mit etwas Abstand vom rückliegenden Unterzug zum seitlichen Verspringen mit 90°-Bögen. Seite 87

Abb. 4.10: Rückseitiges Verspringen der Luftkanäle und Durchführung durch die Kernbohrung. Seite 87

Abb. 4.11: Einhängen des Geräts in die zuvor installierte Zarge und rückseitiger Anschluss der Luftkanäle. Seite 87

Abb. 4.12: Sichtbare Installation von CO₂-Ampel (optionale Möglichkeit zum Funkdatenlogging über WiFi). Seite 87

Abb. 4.13: Innenliegender Musikraum eines Gymnasiums mit Lichtkuppeln ohne Außenwände und Fenster vor der Sanierung (links). Vollintegration des Deckenlüftungsgeräts in eine vorhandene Systemdecke mit Austausch der Einlegeleuchten (rechts). Der Luftreiniger wurde zwischenzeitlich an einer anderen Position aufgestellt. Seite 87

Abb. 4.14: Sanierungsschlüssel des Informatikraums.(Leuchtstoffröhren)- gegen Einlegeleuchten (LED) (rechts). Seite 88

Abb. 4.15: Informatikraum einer Gesamtschule mit bereits abgehängter Decke vor Sanierung (links). Teilintegration des Deckenlüftungsgeräts in vorhandene unsymmetrische Systemdecke mit Aussparung vor der Fensterwand sowie Austausch der Absorberplatten und Wechsel von Anbauleuchten (Leuchtstoffröhren) gegen Einlegeleuchten (LED) (rechts). Seite 88

Abb. 4.16: Lokaler Rückbau einer vorhandenen Systemdecke (oben) und Installation eines Deckenlüftungsgeräts in eine Zarge (unten). Seite 89

Abb. 4.17: Schallharte Betondecke und fragwürdige Positionierung der fensternahen Leuchtstoffröhren in einer Grundschule (vor Sanierung). Seite 89

Abb. 4.18: Kernbohrungen für die Durchführung der Luftkanäle für Fort- und Außenluft direkt durch die angrenzende Außenwand. Seite 91

Abb. 4.19: Aufhängung des Deckenlüftungsgeräts an der (Außen-)Rückwand des Klassenraums gegenüber der Tafel. Seite 91

Abb. 4.20: Durch die in diesem Fall seitlich positionierten Anschlüsse erfolgten der elektrische Anschluss sowie die Einbindung in den Heizkreis. Seite 91

Abb. 4.21: Einfrieren der Warmwasserleitungen während des hydraulischen Anschlusses des Deckenlüftungsgeräts in den Heizkreis. Seite 91

Abb. 4.22: Unauffällige Wetterschutzgitter an der Außenfassade für Fort- und Außenluft. Seite 91

Abb. 4.23: Planungsansichten mit (1) Deckenlüftungsgerät an Außenwand, (2) Systemdecke, (3) Anbau- (links) bzw. Einlegeleuchten (rechts) und (4) Tafelbeleuchtung (optional). Seite 92

Abb. 4.24: Installation der Anbauleuchten mit rückseitiger Verstärkung durch OSB-Platten zum Abfangen der Last und seitlicher Abkofferung des Systemdeckenstreifens (links) und Vorbereitung der Systemdecke mit Revisionsaussparung für das Deckenlüftungsgerät vor Einlegen der restlichen Mineralfaserplatten und LED-Deckenleuchten (rechts). Seite 92

Abb. 4.25: Deckenlüftungsgerät an der Klassenraumrückseite mit teilflächig abgehängter Systemdecke. Variante Akustikdeckenstreifen (3,6 m) mit Anbauleuchten (links) und Variante Akustikdeckenstreifen (4,4 m) und Einlegeleuchten (rechts). Seite 92

Abb. 4.26: Exemplarische Tagesverläufe der CO_2 -Konzentration im sanierten Klassenraum einer Grundschule mit Deckenlüftungsgerät im März 2024. Seite 95

Abb. 4.27: Mittelwerte der CO_2 -Konzentration pro Stunde bzw. Unterrichtseinheit im sanierten Raum mit Deckenlüftungsgerät für den Zeitraum von Dezember 2023 bis April 2024. Seite 96

Abb. 4.28: Nachhallzeit vor und nach der Sanierung eines Grundschulklassenraums im unbesetzten (gemessen) und zu 80 % besetzten Raum (berechnet). Seite 97

Abb. 4.29: Horizontale Beleuchtungsstärken vor und nach der Sanierung eines Grundschulklassenraums. Die maximalen Beleuchtungsstärken im sanierten Raum liegen über den Mindestanforderungen und können stufenlos gedimmt werden, wodurch Energie eingespart werden kann. Seite 98

Abb. 4.30: Aufschlüsselung der Investitions- und Installationskosten (ohne Wartung etc.) am Beispiel eines integral sanierten Grundschulklassenraums. Seite 101

Abb. Ex.1: Offizielle Leistungsphasen gemäß HOAI [46] sowie ergänzende Phasen 0 und 10. Seite 107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Leitwerte und hygienische Bewertung der CO₂-Konzentration [93][102]. Seite 11

Tabelle 1.2: Empfehlung für die maximale relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Lufttemperatur [93][102]. Seite 19

Tabelle 1.3: Schalldruckpegel typischer Sprechweisen in 1 m Entfernung vom Sprechsignal [22]. Seite 24

Tabelle 1.4: Empfehlungen für weitgehend störungsfreie Sprachkommunikation. Seite 25

Tabelle 1.5: Empfehlungsstufen für die Tageslichtverfügbarkeit durch vertikale und geneigte Tageslichtöffnungen nach Beleuchtungsstärke und Tageslichtquotient (zusammengefasst aus DIN EN 17037, Anhang A, Tabelle A.1, A.3, A.4 [28]). Seite 28

Tabelle 2.1: Empfohlene Lüftungsdauer bei Stoßlüftung nach Jahreszeit [93]. Seite 37

Tabelle 2.2: Partikelgrößen nach ISO 16890 (siehe auch [68]). Seite 47

Tabelle 2.3: Exemplarische Berechnung des betriebsgebundenen Einsparpotenzials maschineller Lüftung mit Wärmerückgewinnung gegenüber manueller Fensterlüftung. Seite 51

Tabelle 4.1: Übersicht über die vier Räume vor der Sanierung und die jeweils gewählte Sanierungslösung. Die Angaben beziehen sich auf den Zustand vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen (Maße gerundet). Seite 84

Tabelle 4.2: Beleuchtungssituation vor und nach der Sanierung eines Grundschulklassenraums. Seite 99

Tabelle 4.3: Exemplarische spezifische Aufschlüsselung der Aufwendungen für Investition und angenommener Wartung am Beispiel eines integral sanierten Grundschul-Klassenraums. Seite 102

Klassenräume jetzt sanieren statt abwarten!

Für alle, die nach einer praktikablen Lösung für die Sanierung von Klassenräumen suchen, bietet dieser Leitfaden einen schnellen Einstieg. Eine digitale Version des Leitfadens, ergänzt um weiterführende und aktuelle Infos, interaktive Tools sowie Berichte aus der Praxis gibt es im zugehörigen Wissensportal im Web:

www.gute-luft-in-schulen.de



1. Auflage – Februar 2025

Heinz Trox-Stiftung
Heinrich-Trox-Platz
47504 Neukirchen-Vluyn

Die Heinz Trox-Stiftung fördert Wissenschaft und Forschung im Bereich der Klima- und Lüftungstechnik sowie soziale, kulturelle und karitative Aktivitäten. Seit der Gründung im Jahr 1991 ist sie Ausdruck des Lebenswerkes ihres Stifters Heinz Trox.