Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Zwischenbericht vom 12. Oktober 2026

PassiveClimateSchool

Klimaangepasster Schulraum für morgen – Einfluss auf Treibhausgasemissionen, Behaglichkeit und Architektur



Quelle: Microsoft 365



Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Ko-Finanzierung:
Kanton Basel-Stadt
Bau- und Verkehrsdepartement - Fachstelle umweltgerechtes Planen und Bauen
CH-4051 Basel
www.bs.ch

Subventionsempfänger/innen:
Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau INEB
Institut Architektur IARCH
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch

Waldhauser + Hermann AG
CH-4142 Münchenstein
www.waldhauser-hermann.ch

Hochschule Luzern HSLU
Institut für Gebäudetechnik IGE
CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autor/in:
Gregor Steinke, FHNW INEB, gregor.steinke@fhnw.ch
Monika Hall, FHNW INEB, monika.hall@fhnw.ch
Caroline Hoffman, FHNW INEB, caroline.hoffmann@fhnw.ch
Laura Schmid, FHNW IARCH, laura.schmid@fhnw.ch
Claudia Hauri, HSLU IGE, claudia.hauri@hslu.ch
Stefan Waldhauser, Waldhauser+Hermann AG, stefan.waldhauser@waldhauser-hermann.ch

BFE-Projektbegleitung:
Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, mendard@lowteclab.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502870-01

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt PassiveClimateSchool untersucht Potenziale und Grenzen von Low-Tech-Konzepten für Fassaden, natürliche Lüftung und Nachtauskühlung in Schulbauten. Verglichen werden sie mit mechanischer Lüftung und aktiver Kühlung hinsichtlich thermischem Komfort, Raumluftqualität, Treibhausgasemissionen (THGE), Kosten und Klimaanpassung. Ziel ist eine Entscheidungshilfe für Planende und Bauherrschaften. Im Jahr 2026 wurden Experteninterviews geführt, zwei realisierte Schulbauten als Best-Practice-Beispiele analysiert, die Simulationen eines Klassenzimmers im Bestand erweitert sowie THGE und Kosten verschiedener Lüftungs- und Kühlkonzepte auf Gebäudeebene untersucht.

Die Interviews und Fallbeispiele zeigen, dass die Mitwirkung der Nutzenden nicht als verlässliche Voraussetzung eines Gebäudekonzepts angesetzt werden sollte. Passive und hybride Kühlkonzepte erfordern wirksamen Sonnenschutz, nutzbare Speichermasse, geeignete Lüftungsöffnungen und eine abgestimmte Betriebsführung. In der Simulation ist eine konsequente Nachtlüftung mit grossen freien Öffnungsflächen die wirksamste im Bestand umsetzbare Einzelmassnahme. Zwei Massnahmenkombinationen mit konsequenter Nachtlüftung vermeiden Überschreitungen der oberen Grenzwerte nach SIA 180:2014 vollständig. In den Klimaszenarien für 2060 steigen Maximaltemperaturen und Stunden über 30 °C, während die Überschreitungen des adaptiven Grenzwerts nicht entsprechend zunehmen. Für die Bewertung der Klimaanpassung sind daher auch absolute Temperaturschwellen relevant. In der untersuchten realen Schule liegen die gemessenen Überschreitungsstunden deutlich unter den simulierten Werten. Erhöhte Luftgeschwindigkeiten von 0.6 bis 1.2 m/s erweitern den Komfortbereich um 1.2 bis 2.2 K.

Die THGE der untersuchten Neubauvarianten liegen zwischen 9.4 und 11.2 kg CO_2-eq/(m² EBF·a). 75 bis 86 % entfallen auf die Erstellung. Mit Wärmepumpe verursacht das Low-Tech-Konzept mit Fensterlüftung und Lüftungsflügeln geringere THGE als die mechanisch belüfteten Varianten. Der Einfluss der Bauweise ist grösser als derjenige des Lüftungskonzepts. Bei Fernwärme hängt der Variantenvergleich wesentlich von der für die Fensterlüftung angesetzten Aussenluftrate ab. Die jährlichen Energiekosten liegen in ähnlicher Grössenordnung. Bauliche Mehrkosten der grösseren Raumhöhe und Lebenszykluskosten werden noch abschliessend bewertet. Der projektintern entwickelte Fassadenkonfigurator zeigt, dass sich bei einer Fassadenbreite von 8.5 m eine Netto-Verglasungsfläche von 20 % und Lüftungsflügel mit einer wirksamen Öffnungsfläche von 5 % der Bodenfläche erst ab einer lichten Raumhöhe von etwa 3.5 bis 3.6 m gleichzeitig unterbringen lassen. Die Ergebnisse zu THGE und Kosten stellen Zwischenstände dar und werden bis zum Projektabschluss um Bestandsgebäude ergänzt und in die Entscheidungshilfe überführt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ... **3**
Inhaltsverzeichnis ... **4**
Abkürzungsverzeichnis ... **5**
1 Einleitung ... **6**
1.1 Kontext und Motivation ... 6
1.2 Projektziel ... 6
1.3 Aufbau des Berichts ... 6
2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion ... **7**
2.1 Interviews ... 7
2.1.1. Konzeption Interviews ... 7
2.1.2. Erste Ergebnisse ... 8
2.2 Best-Practice-Beispiele ... 11
2.2.1. Ausgangslage ... 11
2.2.2. Best-Practice Beispiel Primarschulhaus Wasgenring Trakt A ... 12
2.2.3. Architektur ... 12
2.2.4. Wärmespeicherfähigkeit ... 13
2.2.5. Passive Nachtauskühlung ... 14
2.2.6. Fensterflächen ... 17
2.2.7. Variabler Sonnenschutz ... 17
2.2.8. Bauliche Verschattung ... 18
2.2.9. Best-Practice Beispiel Sekundarschulhaus Lochacker ... 19
2.2.10. Architektur ... 19
2.2.11. Wärmespeicherfähigkeit ... 21
2.2.12. Nachtauskühlung ... 21
2.2.13. Fensterflächen ... 24
2.2.14. Variabler Sonnenschutz ... 25
2.2.15. Bauliche Verschattung ... 25
2.2.16. Vergleichende Einordnung der Best-Practice-Beispiele ... 26
2.3 Simulation eines Klassenzimmers im Bestand ... 28
2.3.1. Basismodell ... 28
2.3.2. Varianten ... 29
2.3.3. Analyse ... 31
2.3.4. Kombination von Massnahmen ... 33
2.3.5. Bauliche Nachweis und Komfortnachweis nach SIA 180:2014-C1/C2 ... 34
2.3.6. Fazit ... 35
2.4 Behaglichkeit bei erhöhter Luftgeschwindigkeit ... 36

2.4.1. Theoretische Untersuchungen ... 36
2.4.2. Praxiserfahrungen mit Deckenventilatoren ... 39
2.5 Varianten und THGE/Kosten ... 40
2.5.1. Untersuchte Varianten ... 40
2.5.2. Treibhausgasemissionen ... 43
2.5.3. Kostenanalyse ... 48
2.6 Fassadenkonfigurator ... 54
3 Schlussfolgerungen und Ausblick ... 56
3.1 Zentrale Erkenntnisse ... 56
3.2 Projektfortschritt ... 57
3.3 Ausblick ... 57
4 Publikationen und andere Kommunikation ... 57
5 Literaturverzeichnis ... 58
6 Anhang ... 60
6.1 Grundlagen Simulationsmodell: Analyse Klassenzimmer im Bestand ... 60
6.2 Klimadaten ... 64
6.3 Daten zu Treibhausgasemissionen (AP6) ... 65
7 Jahresbericht 2025 ... 67

Abkürzungsverzeichnis

A_E	Energiebezugsfläche
AP	Arbeitspaket
BFE	Bundesamt für Energie
CO_2	Kohlendioxid
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
LCC	Lebenszykluskosten
NGF	Nettogrundfläche
NL	Nachtlüftung
ppm	parts per million
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenario)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
THGE	Treibhausgasemissionen
θopr.	Operative Temperatur, Raumlufttemperatur, Temperatur
WRG	Wärmerückgewinnung
WWR	Window-to-Wall-Ratio

1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Der Bedarf an neuem oder angepasstem Schulraum ist in den nächsten Jahren gross, während zunehmende Hitzeperioden den sommerlichen Wärmeschutz vor neue Herausforderungen stellen. Das Projekt evaluiert Low-Tech-Fassaden sowie passive Lüftungs- und Kühlkonzepte für Schulräume im Kontext der Netto-Null-Ziele.

Eine FHNW-interne Vorstudie hat Erkenntnisse zum Einfluss natürlicher Lüftung und feststehender Verschattung erarbeitet. Darauf aufbauend werden verschiedene Low-Tech-Konzepte hinsichtlich Treibhausgasemissionen, thermischer Behaglichkeit und Raumluftqualität bewertet und konventionellen Systemen gegenübergestellt. Dynamische Simulationen prüfen die Leistungsfähigkeit unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen. Die Untersuchungen umfassen Neubauten und die Nachrüstung bestehender Bauten.

1.2 Projektziel

Das Projekt zielt auf den systematischen Vergleich von Low-Tech- und konventionellen Konzepten für Schulbauten. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Analyse von Fallbeispielen aus dem Kanton Basel-Stadt. Die Erkenntnisse fliessen in eine praxisorientierte Entscheidungshilfe ein, die Planende und Bauherrschaften bei der Wahl geeigneter Konzepte unterstützt.

Das Projekt gliedert sich in acht Arbeitspakete:

AP 1: Projektmanagement und Koordination

AP 2: Literaturrecherche, Experteninterviews, Best-Practice

AP 3: Fallbeispiele – Analyse und Simulation von Optimierungsmassnahmen

AP 4: Definition, Simulation und Analyse weiterer Parameter

AP 5: Einfluss auf Gestaltung und Materialisierung

AP 6: THGE-Bilanzierung für Erstellung und Betrieb

AP 7: Kostenanalyse

AP 8: Entscheidungshilfe, Wissensvermittlung und Dissemination

1.3 Aufbau des Berichts

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Arbeiten des Jahres 2026. Er baut auf dem vorhergehenden Jahresbericht 2025 (Kap. 7) auf, der die normativen, klimatischen und bauphysikalischen Grundlagen, die daraus abgeleiteten Planungsrichtwerte, die Erkenntnisse aus den Begehungen von Schulbauten im Kanton Basel-Stadt, einen Katalog von Sofortmassnahmen für Bestandsbauten sowie das Simulationsmodell eines Klassenzimmers enthält. Diese Grundlagen werden nicht wiederholt, sondern mit Kapitelangabe referenziert.

Im Berichtsjahr lag der Schwerpunkt auf dem Abschluss deren Experteninterviews in AP 2, der Vertiefung der Simulationen in AP 3 und auf Lebenszyklusbetrachtungen in AP 6 und AP 7, sowie der Entwicklung eines Fassadenkonfigurators für Schulzimmer. Kapitel 2 ist nach der Reihenfolge der Arbeitspakete aufgebaut. Kapitel 3 fasst die Erkenntnisse zusammen, ordnet den Projektfortschritt ein und gibt einen Ausblick auf die Arbeiten bis zum Projektabschluss im März 2027.

2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

2.1 Interviews

Die Experteninterviews (AP 2) ergänzen die Literaturrecherche um Erfahrungswissen aus Gesundheitsbehörden, Bauherrschaften, Architektur, Fachplanung, Betrieb und Schulleitung. Sie verfolgen drei Ziele. Zu klären, was die Praxis unter Low-Tech im Schulbau versteht, Grenzen und Erfolgsfaktoren passiver Lüftungs- und Kühlkonzepte zu identifizieren und Anforderungen an die Entscheidungshilfe (AP 8) zu erheben. Interviews mit elf Fachpersonen übertrifft die im Projektantrag vorgesehene Mindestzahl von fünf Interviews.

2.1.1. Konzeption Interviews

Bei den Interviews geht es darum die Perspektive der Interviewpartner auf die Themen sommerlicher Wärmeschutz und Low-Tech Konzepte im Kontext von Schulen zu erfassen. Um dem jeweiligen fachlichen Kontext der Gesprächspartner gerecht zu werden sind die Fragen nicht identisch formuliert und die Interviews haben inhaltliche Schwerpunkte.
Insgesamt werden elf Personen aus unterschiedlichen Fachbereichen interviewt (Tabelle 1). Die Interviews werden im Zeitraum von 01.07.2026 bis zum 21.09.2026 per Teams durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung stehen die Interviews im Bereich «Wohlbefinden Kinder» noch aus.

Die Interviewfragen werden auf Wunsch vorgängig versendet. Die Zusammenfassung des Interviews erhalten die Interviewpartner zu Freigabe nach dem Interview zugeschickt. Bis jetzt sind acht Interviews freigegeben worden.

Tabelle 1 Übersicht Interviewpartner. Die Initialen der Gesprächspartner werden im weiteren Text als Quellenangabe verwendet.

Fachbereich	**Name und Institution,** **Datum Interview**	**Themenschwerpunkt**
Gesundheit/Raumluft	Roger Waeber (RW), Bundesamt für Gesundheit, BAG 01.07.2026	CO_2-Wirkung, Hitzestress, BAG-Position zu Lüftungskonzepten.
Wohlbefinden Kinder	Markus Ledergerber (MG), Gesundheitsdepartment Basel Stadt Termin offen	kantonal-gesundheitsbehördlich
	Patrick Hetzel (PH), Kinderarzt in Riehen 21.09.2026	Gesundheit Kinder
Bauherrenstrategie	Franz Sprecher (FS), Amt für Hochbauten, Stadt Zürich 08.07.2026	strategisch-programmatisch
	Marius Keller (MK), Immobilien Basel Stadt 06.07.2026	operativ-bauherrnseitig (Schnittstelle Facility Management)
Architektur	Andy Senn (ASE), Architekt BSA SIA 13.07.2026	Schulhausplanung
Fachplanung HLK / Bauphysik	Seraphin Burri (SB), Kuster+Partner AG 23.07.2026	Auslegung, Nachweis, Praxisbezug, Schweiz

	Wolfgang Kessling (WK), Transsolar Energietechnik GmbH 14.07.2026	Auslegung, Praxisbezug, Deutschland
	Martin Meier (MM), Plan-K AG 07.07.2026	Auslegung, Gebäudetechnik, Nachweis, Praxisbezug
Facility Management	Abdullah Tuzcu (AT), Facility Management Primarschulhaus Volta, Basel 01.09.2026	Betrieb, Wartung, Bedienung.
Lehrpersonen	Alex Simmen (ASI), Schulleiter Brugg 19.08.2026	Schulbetrieb, Akzeptanz, Einbezug Nutzende bei Low-Tech

2.1.2. Erste Ergebnisse

Nachstehend finden sich erste Querauswertungen der Interviews. Da die Interviews im Bereich «Wohlbefinden Kinder» noch nicht geführt wurden, wird dieser Bereich nicht berücksichtigt. Anmerkung: Die nachfolgenden Zusammenfassungen aus den Interviews sind sinngemässe Wiedergaben, keine Zitierungen.

Wie wird Low-Tech im Schulbau verstanden?

Übereinstimmend stellen alle Interviewpartner fest, dass eine einheitliche Definition des Begriffes nicht existiert, im fachspezifischen Kontext wird der Begriff eher nicht verwendet. Von der Tendenz her kann der Begriff wie folgt interpretiert werden:

- Eher architektonisches Konzept, das Technikbedarf reduziert (FS, ASE)
- Eher gebäudetechnisches Konzept (MK, SB, MM)
- Eher Mensch und Komfort im Zentrum (WK)

Obwohl die Interviewpartner den Begriff Low-Tech unterschiedlich interpretieren, wird aktive Kühlung über eine Kältemaschine von keinem Interviewpartner als Bestandteil eines Low-Tech-Konzepts genannt. Auch eine mechanische Lüftung wird von keinem Interviewpartner explizit als Merkmal eines Low-Tech-Konzepts erwähnt. Bezogen auf die Haustechnik lässt sich ableiten, dass Low-Tech meist als Konzept ohne aktive Kühlung und tendenziell mit reduziertem Einsatz gebäudetechnischer Anlagen verstanden wird.

Welche Rolle beim Erhalt des Raumklimas spielen Nutzerverhalten und Nutzermitwirkung?

Das Verhalten der Gebäudenutzenden ist zentral. Allerdings sind sich alle Interviewpartner einig, dass die Mitwirkung der Nutzenden nicht als verlässliche Grösse im Gebäudekonzept eingeplant werden sollte. Es lassen sich die folgenden Grundaussagen vereinheitlichen:

- Lüftungskonzepte funktionieren besser, wenn die Umsetzung nicht allein bei den Nutzenden liegt (RW).
- Das Nutzerverhalten wird häufig überschätzt; manuelle Lüftungsstrategien funktionieren schlechter als geplant (FS).
- Der Erfolg von nicht automatisierten Konzepten hängt direkt von der korrekten Bedienung durch die Nutzenden (ASE), bzw. der Lehrpersonen (ASI) ab.
- Zumutbar für Lehrpersonen ist eine Pausenlüftung, eine Nachtlüftung ist es eher nicht (WK, MM).
- Eine feste Zuordnung von Klassenzimmer und Lehrpersonen, wie z. B. in der Primarschule, für die manuelle Lüftung (SB), oder eine Lüftungsplan (RW) können sinnvoll sein.

Wo liegen die Grenzen natürlicher Lüftung und Nachtauskühlung?

Die Gesprächspartner sind sich einig, dass die natürliche Lüftung enge Grenzen aufweist. Die Grenzen selber werden aber unterschiedlichen Bereichen zugeordnet.

- Konsequenz in der Durchführung (RW), (ASE)
- Zunehmende Anzahl von Tropennächten und langen Hitzeperioden (FS, ASE, SB, MM, AT, ASI)
- Unzureichende Nachtlüftung (WK)

Ist eine automatisierte Nachtlüftung eine sinnvolle Strategie für Schulbauten?

Mehrheitlich wird eine automatisierte Nachtlüftung empfohlen, wenn Nachtlüftung Teil des Konzepts ist. Die Interviewpartner sehen darin (im Gegensatz zur manuellen Nachtlüftung) die einzige realistische Möglichkeit, Nutzerabhängigkeiten zu reduzieren und eine verlässliche Nachtauskühlung sicherzustellen. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass automatisierte Fenster keineswegs „technikfrei" sind, sondern Wartungsaufwand, Störungsrisiken und höhere Komplexität mit sich bringen. Die grösste Unsicherheit liegt weniger bei der Automation als bei der künftig zu erwartenden abnehmenden Wirksamkeit der Nachtlüftung infolge häufiger Tropennächte.

- Manuelle Nachtlüftung wird als langfristig wenig zuverlässig eingeschätzt (RW, WK, MM).
- Nur eine automatisierte Nachtlüftung kann eine Nutzerunabhängigkeit gewährleisten (RW, WK, MM, AT).
- Eine automatisierte Nachtlüftung in zentralen Bereichen kann sinnvoll sein (SB).
- Automatisierte Nachtlüftung erhöht die Funktionssicherheit, verursacht aber zusätzlichen technischen und betrieblichen Aufwand (SB, MM, AT).
- Der Nutzen nimmt mit steigender Zahl von Tropennächten ab, weil die nächtliche Abkühlung geringer wird (FS, SB, MM).

Kritisch wird allerdings angemerkt:

- Mit automatisierten Lüftungsfenstern für den Tag- und Nachtbetrieb wurden schlechte Erfahrungen gemacht. Die Systeme waren technisch aufwändig, wartungsintensiv und hatten eine geringe Nutzerakzeptanz. Die Stadt Zürich schliesst automatisierte Fensterlüftung heute grundsätzlich aus; lediglich als Lösung für Nachtauskühlung kann sie in Einzelfällen sinnvoll sein (FS).
- Die Umsetzung motorisierter Fenster erweist sich als komplex. Motorisierung, Steuerung, Wetterschutz, Einklemmschutz und Gebäudeautomation verursachen erheblichen Aufwand (MM).
- Im Betrieb fallen Fenstermotoren regelmässig aus. Reparaturen sind aufwändig und erfordern mehrere Fachfirmen gleichzeitig (AT).

Wo werden die harten Grenzen von Low-Tech-Konzepten gesehen?

Rein passive Kühlstrategien, die nur natürliche Lüftung umfassen, sollten kritisch hinterfragt werden. Als ergänzender Baustein hat die Nachtlüftung jedoch weiter eine Berechtigung.

- Die Grenze liegt dort, wo die Anforderungen der Bauherrschaft nicht erfüllt werden (RW).
- Übermässige Raumtemperaturen sind nicht akzeptabel (MK, ASE).
- Der Einsatz von natürlicher Lüftung (manuell und/oder automatisiert) (MM, AT, FS, ASI).
- Lärm, Emissionsbelastungen, Wärmeinseln, Tropennächte (SB, WK) und eine fehlende Nachtlüftung (WK).

Welche Bedeutung haben Sonnenschutz, Speichermasse und Architektur?

Alle Interviewpartner sind sich einig, dass ein effizienter Sonnenschutz, hohe Speichermassen und eine gute Architektur die Grundlage für robuste Gebäude mit wenig Gebäudetechnik sind.

Aus den Interviews lässt sich implizit ableiten, dass unter einem «effizienten Sonnenschutz» in der Regel ein aussenliegener, automatisiert betriebener Sonnenschutz verstanden wird. Unter „guter Architektur“ verstehen die Interviewpartner keine bestimmte Formensprache, sondern eine klimaangepasste Gebäudeplanung, welche den sommerlichen Wärmeschutz bereits durch den Entwurf unterstützt (z. B. mit einer günstigen Gebäudeorientierung, angemessenen Fensterflächen und ggf. wirksamen natürlichen Lüftungsmöglichkeiten sowie einer Nachtauskühlung).

Welche Rolle spielen Holzbau und Speichermasse in Low-Tech-Schulbauten?

Es herrscht breiter Konsens, dass Speichermasse eine Schlüsselstrategie für Low-Tech-Schulbauten ist und dass sie mit abnehmendem Technikeinsatz an Bedeutung gewinnt. Keiner der Interviewpartner lehnt Holzbau ab. Vielmehr wird Holzbau als grundsätzlich geeignet angesehen, sofern die geringere Speichermasse durch zusätzliche Massnahmen wie Holz-Beton-Verbunddecken, schwere Böden, Lehmbaustoffe oder hybride Konstruktionen kompensiert wird (ASE, SB, WK, MM). Der eigentliche Konsens lautet daher nicht „Holzbau oder Speichermasse“, sondern: Je weniger Technik eingesetzt wird, desto sorgfältiger müssen Speichermasse, Konstruktion, Sonnenschutz und Nachtlüftung im Entwurf zusammenwirken.

Wie werden CO_2-Ampeln und CO_2-Messgeräte bewertet?

CO_2-Ampeln und CO_2-Messgeräte werden von vier Interviewpartnern erwähnt und bewertet. Sie werden als Hilfsmittel bewertet, aber nicht als dauerhaft verlässliche Lösung.

- Ein sinnvolles Hilfsmittel, um Lüftungspläne zu erstellen und das Lüftungsverhalten zu verbessern (RW, AS, SB).
- Die Handlung muss weiter vom Nutzenden ausgehen, daher ist die Lösung nicht verlässlich und der Effekt eventuell nur temporär (RW, FS, AS).

Wie wird der Einfluss des Klimawandels bewertet?

Der Einfluss wird hoch bewertet, speziell der extreme Sommer 2026 führte die Notwendigkeit einer Anpassung an zukünftige Klimakonzepte anschaulich vor Augen.

- Klimaanpassung darf Klimaschutz nicht verdrängen (RW).
- Der Sommer 2026 wird voraussichtlich zu strengeren Klimaannahmen führen (FS).
- Reine Low-Tech-Lösungen werden unter künftigen Klimabedingungen zunehmend infrage gestellt (MK, AS).
- Die Auslegung stützt sich zunehmend auf zukünftige Klimabedingungen ab (SB).
- Bereits heute robuste Konzepte bleiben auch unter zukünftigen Klimabedingungen überlegen (WK).
- Nicht die Kühlleistung, sondern die Betriebsdauer der Kühlung wird zunehmen (MM).
- Die aktuellen Lösungen reichen bei zukünftigen Hitzewellen nicht aus (AT).
- Überhitzung entwickelt sich von einer Komfortfrage zu einer Frage von Gesundheit und Leistungsfähigkeit (AS).

Welche Anforderungen werden an die im Projekt entwickelte Entscheidungshilfe gestellt?

Der Fokus einer Entscheidungshilfe sollte auf einer frühen Planungsphase liegen.

- Der Prozess soll bei Zieldefinition und Anforderungen beginnen, nicht bei der Technik (RW).
- Entscheidungen müssen möglichst früh getroffen werden; Betriebserfahrungen sollen einfliessen (FS).

- Unterstützung bei frühen Projektentscheidungen (AS, SB).
- Fokus auf Bestand, Typologien und Priorisierung von Massnahmen (MK).
- Systemische Zusammenhänge aufzeigen und isolierte Einzellösungen kritisch bewerten (MM, SB).

Für den Schlussbericht wird die Auswertung der Interviews noch um den Aspekt «Wohlbefinden Kinder» ergänzt.

Tendenziell gibt es zwischen den Interviewpartnern keine kontroversen Themen. Die Lüftung über automatisierte Fensterflügel wird von allen Interviewpartnern als aufwändig eingestuft. Für einen Interviewpartner resultiert daraus eine grundsätzliche Ablehnung für die Taglüftung. Eine Nachtlüftung über automatisierte Fensterflügel wäre projektbezogen zu überprüfen. Insgesamt sind sich alle die Interviewpartner darüber einig, dass der Klimawandel dazu führt, dass Konzepte, die keine passiven Kühlstrategien oder ausschliesslich eine manuelle Nachtlüftung als Kühlstrategie verwenden kritisch hinterfragt werden müssen.

Die folgenden Best-Practice-Beispiele zeigen, wie zwei realisierte Schulbauten Low-Tech-Ansätze baulich und betrieblich umsetzen.

2.2 Best-Practice-Beispiele

Die Analyse realisierter Projekte ist Teil von AP 2 und dient der Identifikation von Erfolgsfaktoren und Herausforderungen passiver Kühlkonzepte. Dokumentiert werden der Neubau Trakt A der Primarschule Wasgenring in Basel, dessen sommerlicher Wärmeschutz von Beginn an auf natürlicher Nachtauskühlung aufbaut und für den Messdaten der Sommer 2024 und 2025 vorliegen, sowie die Gesamtsanierung des Sekundarschulhauses Lochacker in Reinach (BL), in der die Nachtauskühlung mechanisch unterstützt wird. Beide Beispiele werden nach einem einheitlichen Raster beschrieben (Kap. 2.2.2) und in Kapitel 2.2.17 vergleichend eingeordnet. Die architektonischen Analysen bilden zugleich eine Grundlage für AP 5 (Gestaltung und Materialisierung).

2.2.1. Ausgangslage

Beim Trakt A des Primarschulhaus Wasgenring wurden die Raumtemperaturen in mehreren Klassenzimmern erfasst und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass sich das Schulhaus als Best-Practice-Beispiel für den sommerlichen Wärmeschutz mit passivem Konzept eignet.

Beim Sekundarschulhaus Lochacker handelt es sich um eine Gesamtsanierung. Im Sommer 2026 zeigte sich, dass die Steuerung der Nachtauskühlung zunächst nicht optimal eingestellt war. Die entsprechenden Einstellungen wurden während der Sommerferien angepasst und damit die Funktion der Nachtauskühlung optimiert. Die Nachtauskühlung wird durch einen Ventilator unterstützt. Das Beispiel ist daher nicht als reine passives Konzept, sondern als hybride Lösung aus passiven und mechanischen Komponenten einzuordnen.

Trotz des Einsatzes eines mechanischen Unterstützungssystems wurde das Schulhaus Lochacker als Best-Practice-Beispiel berücksichtigt. Ausschlaggebend ist insbesondere der Kontext der Gesamtsanierung, bei der die bestehenden baulichen Rahmenbedingungen und die daraus resultierenden technischen Möglichkeiten zu berücksichtigen sind. Die Kombination aus baulichen Massnahmen zur passiven Kühlung und einer bedarfsgesteuerten mechanischen Unterstützung stellt unter diesen Bedingungen einen praxisgerechten Ansatz für die Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes dar.

Die Beschreibung beider Beispiele folgt einem einheitlichen Raster mit sechs Aspekten: Architektur, Wärmespeicherfähigkeit, Nachtauskühlung, Fensterflächen, variabler Sonnenschutz und bauliche Verschattung. Das Raster entspricht den im Jahresbericht 2025 (Kap. 7) beschriebenen Wirkprinzipien des sommerlichen Wärmeschutzes (Kap. 2.4 und 2.5) und den Massnahmen der Wegleitung der Stadt Zürich [1] (Abbildung 1). Gemäss SIA 180:2014 [2] werden die spezifische Wärmespeicherfähigkeit, der

Glasanteil fg als Verhältnis der Glasfläche zur Fassadenfläche des Raumes und für die Nachtauskühlung eine wirksame Öffnungsfläche von mindestens 5 % der Nettogeschossfläche oder ein Aussenluft-Volumenstrom von mindestens 10 m³/(h·m²) betrachtet.



Die baulichen Massnahmen 1 bis 5 entscheiden über die langfristige Robustheit und Resilienz eines Gebäudes. Sie haben gegenseitige Abhängigkeiten und sollen in einem ersten Schritt untereinander optimiert werden (siehe 3.3).

Technische Mittel (Massnahme 6 oder 7) werden eingesetzt, wenn die baulichen Massnahmen für sich allein nicht genügen oder (ökonomisch und/oder ökologisch) unverhältnismässig aufwändig wären.

Die Massnahmen 8 und 9 ergänzen und unterstützen die übrigen.

Abbildung 1 Auszug aus: «Wegleitung Sommerlicher Wärmeschutz bei Bauvorhaben der Stadt Zürich [1]

2.2.2. Best-Practice Beispiel Primarschulhaus Wasgenring Trakt A

2.2.3. Architektur

Der Neubau Trakt A der Schulanlage Wasgenring an der Welschmattstrasse 130 im Basler Quartier Iselin positioniert sich als präzise gesetzte Ergänzung innerhalb eines heterogenen Ensembles der Nachkriegsmoderne. Die Gesamtanlage, ein Frühwerk von Fritz Haller und exemplarisch für die Haltung der sogenannten Solothurner Schule, ist durch eine aufgelockerte Pavillonstruktur in einem grosszügigen, zusammenhängenden Grünraum geprägt, dessen raumwirksame Baumstruktur die einzelnen Baukörper zu einem kohärenten Gefüge verbindet. Vor diesem Hintergrund nimmt der Neubau eine vermittelnde Rolle ein: Er liegt in der nordöstlichen Ecke des Areals, stärkt die Adressbildung zur Welschmattstrasse und verdichtet die Anlage punktuell, ohne deren landschaftliche Offenheit grundsätzlich in Frage zu stellen.

Städtebaulich reagiert Trakt A differenziert auf seine unmittelbare Umgebung. Während sich im Süden ein Weg entlang der Fassade mit anschliessendem, baumbestandenem Grünraum erstreckt, formuliert die Ostseite mit Velounterstand, Grünstreifen und angrenzendem Trottoir eine klare Kante zum Strassenraum. Die Westseite hingegen bleibt bewusst weich ausgebildet und lässt die Begrünung bis unmittelbar an die Fassade heranreichen.

Typologisch manifestiert sich das Aulagebäude als kompakter, vertikal organisierter Baukörper mit einem Untergeschoss, drei Vollgeschossen und einem Dachgeschoss. Diese Stapelung markiert einen bewussten Bruch mit der horizontalen Logik der bestehenden Pavillons und steht für eine zeitgenössische Verdichtung schulischer Programme. Im Inneren bildet die Aula mit zugehörigem Foyer und Regenerationsküche das zentrale, öffentlich wirksame Element im Erdgeschoss, während die oberen Geschosse Unterrichtsräume und ergänzende Nutzungen aufnehmen. Die Orientierung der Räume erfolgt primär nach Osten und Westen, wodurch eine ausgewogene Tageslichtversorgung gewährleistet wird. Die Erschliessung ist auf ein einziges, westseitig angeordnetes Treppenhaus konzentriert, was zu einer klaren Zirkulationslogik führt.

Die innere Organisation folgt einer funktionalen Schichtung: Klassenzimmer und Lehrerbereiche sind in den Regelgeschossen angeordnet, während Flure und hallenartige Zonen als informelle Aufenthalts- und Erschliessungsräume fungieren. Im Untergeschoss befinden sich ergänzende Nutzungen wie ein Malatelier und Lagerräume daneben WC-Anlagen, sowie Haustechnikräume. Das räumliche Gefüge wird durch eine sachliche Materialisierung und eine klare konstruktive Ordnung geprägt, die an die Tradition des Bestands anknüpft, ohne diesen zu imitieren.

Die Fassaden sind durch eine präzise Rasterung und eine differenzierte Fensterausbildung charakterisiert. Zum Einsatz kommen Holz-Metall-Fenster in den Klassenzimmern sowie Metallfenster mit dreifacher Isolierverglasung. Die Öffnungsmöglichkeiten sind funktional ausdifferenziert: In den Klassenzimmern und in der Halle ermöglichen Drehflügel sowie opake Dreh-Kippflügel mit Wetterschutzlamellen eine flexible natürliche Lüftung. im 3. Obergeschoss werden automatisierte Kippfenster mit Wetterschutzlamellen in Oberlichtern eingesetzt, insbesondere zur Nachtauskühlung. Ergänzt wird dieses System durch durchgängige Rafflamellen als Sonnenschutz, deren Steuerung an Präsenzmelder gekoppelt ist.

Im gebäudetechnischen Konzept zeigt sich eine Kombination aus einfachen, robusten Strategien und zentralisierten Anlagen. Die Lüftung erfolgt primär über manuelle Fensterlüftung, ergänzt durch automatisierte Oberlichter. In der Aula wird ein Nachtauskühlungsprogramm über die Lüftungsanlage eingesetzt, wobei Fassadenöffnungen aus Sicherheitsgründen nicht genutzt werden. Die Wärmeerzeugung erfolgt über Fernwärme, die Wärmeabgabe über Radiatoren. Einschränkungen bestehen punktuell in der Zugänglichkeit von Lüftungsflügeln, etwa im Treppenhaus, was die Nutzbarkeit der natürlichen Lüftungsstrategien partiell relativiert.

2.2.4. Wärmespeicherfähigkeit

Die Wärmespeicherfähigkeit des Raumes wird massgeblich durch die massiven Bauteile des Bodens und der Innenwände bestimmt (Abbildung 2). Die Betondecke verfügt grundsätzlich über ein hohes Wärmespeicherpotenzial. Dieses wird jedoch durch die angebrachten Akustikpaneele eingeschränkt, da der direkte Wärmeaustausch zwischen Raumluft und Betondecke reduziert wird. Auch die Einbauschränke entlang der Wand zur Halle schränken die effektiv nutzbare Speichermasse ein. Das massive Brüstungsband unterhalb der Fenster trägt hingegen zur Wärmespeicherung bei, während die Fenster selbst aufgrund ihrer geringen Wärmekapazität keinen wesentlichen Beitrag leisten.

Zusätzlich unterstützt die über Lüftungsklappen oberhalb der Klassenzimmertüren ermöglichte Luftzirkulation den thermischen Austausch zwischen den Klassenzimmern und den angrenzenden Erschliessungsbereichen. Dadurch kann die Speichermasse dieser Bereiche teilweise in den thermischen Ausgleich einbezogen werden, was die Nutzung der vorhandenen Wärmespeicherfähigkeit unterstützt.



Abbildung 2 Klassenzimmer (links) und Halle (rechts)

2.2.5. Passive Nachtauskühlung

Die passive Nachtauskühlung des Schulhauses Wasgenring, Trakt A, ist aufgrund der vorhandenen Gebäudestruktur und der gezielt ausgebildeten Lüftungselemente als sehr wirksam zu beurteilen. Dies zeigen Messergebnisse und wird durch die Nutzenden bestätigt.

Lüftungsflügel Fassade

Das Gebäude verfügt über witterungsgeschützte Lüftungsflügel in den Fassaden, die auch ausserhalb der Nutzungszeiten sicher offenstehen können und damit die Voraussetzungen für eine kontinuierliche nächtliche Durchlüftung schaffen. Alle Zimmer verfügen über einen oder zwei Flügel je nach Raumgrösse: 1.7 m^2 bei Raumgrösse 30 m^2, 3.4 m^2 bei Raumgrösse 60 m^2. Diese werden von den Nutzenden manuell geöffnet.

Lüftungsklappen über Türen

Die Aussenluftzufuhr erfolgt über die Fassadenöffnungen direkt in die Unterrichtsräume, während die Abluft über das automatisierte Oberlichtsystem im 3. Obergeschoss abgeführt wird. Die Grundrissorganisation des Gebäudes unterstützt dabei eine raumübergreifende Luftströmung. Insbesondere die Lüftungsklappen (freier Querschnitt 0.5 m^2 pro Raum) oberhalb der Klassenzimmertüren ermöglichen einen kontinuierlichen Luftaustausch zwischen den Schulräumen und der Halle, wodurch die einzelnen Räume in ein gesamtheitliches Lüftungskonzept eingebunden werden.

Türen zum Treppenhaus

Zusätzlich wird die Nachtauskühlung durch das Zusammenspiel von Fassadenöffnungen, dem zentralen Treppenhaus und den automatisch gesteuerten Kippfenstern im Oberlicht wesentlich verstärkt. Begünstigt durch das Brandschutzkonzept können die Türen zwischen Halle und Treppenhaus im Normalbetrieb offenstehen, wodurch ein zusammenhängender Strömungsweg von den Fassadenöffnungen bis zu den hochliegenden Abluftöffnungen entsteht. Der freie Querschnitt der Türöffnung beträgt 4.0 m^2 pro Geschoss.

Oberlicht

Die einströmende kühlere Aussenluft wird über die Unterrichtsräume und Erschliessungszonen geführt, während die erwärmte Luft infolge thermischer Auftriebskräfte über das Treppenhaus in die Halle des 3. Obergeschosses aufsteigt und über die automatisierten Fenster im Oberlicht (freier Querschnitt 9 m^2)

abgeführt wird. Die Kombination aus Querlüftung und thermischem Auftrieb (Kamineffekt) gewährleistet auch bei geringen Windgeschwindigkeiten einen hohen Luftaustausch und ermöglicht eine effiziente nächtliche Abfuhr der in der Gebäudemasse gespeicherten Wärme.

Steuerung

Die Fenster im Oberlicht des 3. Obergeschosses werden elektromotorisch betrieben. Gemäss Betriebsbeschrieb der Planenden öffnen sie zwischen 20 und 8 Uhr, sofern die Innentemperatur 25 °C über- und die Aussentemperatur 24 °C unterschreitet. Diese Temperatursteuerung sollte optimiert werden, da die Schalttemperaturen sehr hoch sind. Bei Sturm oder Regen schliessen sie und öffnen danach selbsttätig wieder. Eine manuelle Bedienung ist möglich. Die Lüftungsflügel in der Fassade und die Lüftungsklappen über den Türen werden dagegen von den Lehrpersonen geöffnet. Der Betriebsbeschrieb überlässt den Lehrpersonen die Entscheidung, ob sie die Flügel vor dem Verlassen des Raumes öffnen; die Auslegungssimulation der Planenden setzt voraus, dass dies in der warmen Jahreszeit jeden Nachmittag geschieht und die Flügel morgens wieder geschlossen werden. Da der Kamineffekt nur bei geöffnetem Oberlicht einsetzt, begrenzt die temperaturgeführte Steuerung eine unerwünschte Auskühlung, wenn Lüftungsflügel ohne Bedarf geöffnet bleiben. Das Konzept verbindet damit ein Minimum an Automatisierung mit einer klar zugewiesenen manuellen Bedienung.

Fazit

Insgesamt schafft das System aus ausreichend dimensionierten Fassadenöffnungen, internen Überströmwegen und hochliegenden Abluftöffnungen optimale Voraussetzungen für die nächtliche Regeneration der thermischen Speichermasse (Abbildung 3-5) und trägt wesentlich zur Begrenzung der Raumtemperaturen während sommerlicher Wärmeperioden bei.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Steuerung der Fenster im Oberlicht hinsichtlich einer temperaturabhängigen Regelung optimiert werden könnte. Als Grundlage für eine optimierte Steuerungslogik wird eine manuelle Freigabe durch die Hauswartung und/oder eine Freigabe bei einer über 48 Stunden gemittelten Aussenlufttemperatur von mehr als 22 °C vorgeschlagen, wobei dieser Schwellenwert einstellbar sein sollte. Die Öffnung der Fenster sollte anschliessend erfolgen, wenn die Raumlufttemperatur über der Aussenlufttemperatur liegt und gleichzeitig eine Raumlufttemperatur von mehr als 20 °C erreicht wird.



Abbildung 3 Grosser Lüftungsflügel mit Wetter-/Einbruchschutz (links), Lüftungsklappe über den Türen, um eine Querlüftung zu ermöglichen (Mitte), offene Türen zum Treppenhaus, die im Brandfall schliessen (rechts).



Abbildung 4 automatisieret Kippfenster im Oblicht, mit Wetter-/Einbruchschutz um Kamineffekt zu ermöglichen (links, rechts)

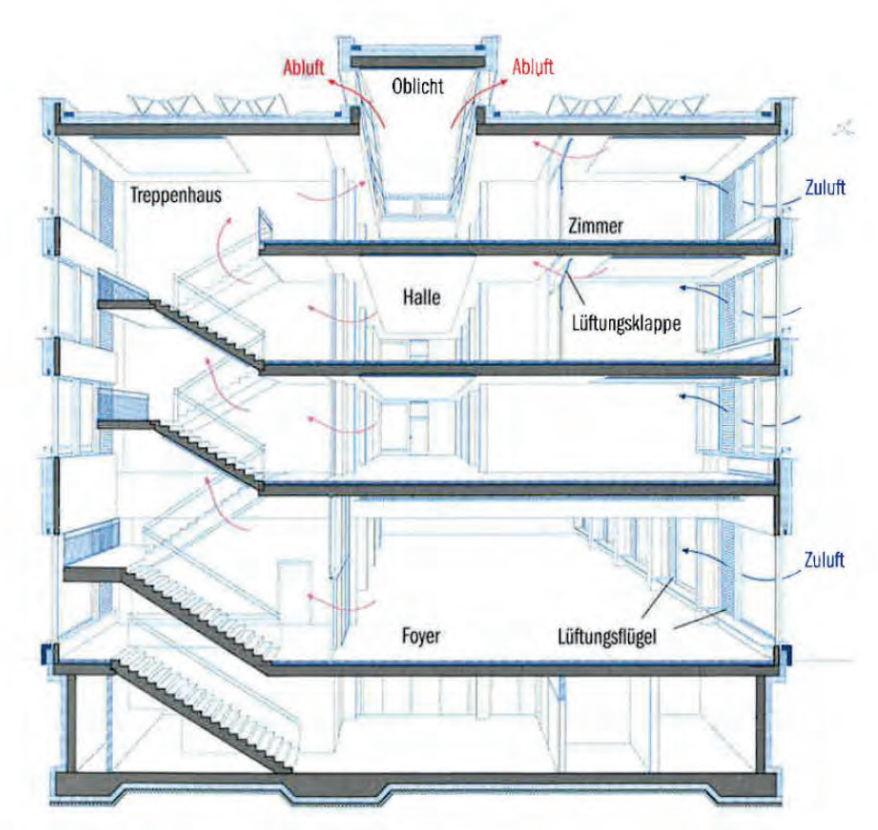


Abbildung 5 Lüftungsschema Wasgenring [3]

2.2.6. Fensterflächen

Die Fensterflächen des Schulhauses wurden hinsichtlich ihrer Eignung für den sommerlichen Wärmeschutz beurteilt (Abbildung 6). Gemäss SIA 180 beträgt die anrechenbare Fensterfläche eines Referenzklassenzimmers 18.8 m², wovon 5.4 m² auf witterungsgeschützte Lüftungsöffnungen entfallen. Die eigentliche Verglasungsfläche beträgt 13.4 m² beziehungsweise 49.2 % der Fassadenfläche und liegt damit innerhalb des empfohlenen Bereichs von 30–50 %.

Sämtliche Fensterflügel sind öffenbar und ermöglichen eine wirksame sowie nutzerfreundliche Stosslüftung während der Nutzungszeiten. Dadurch kann bei Bedarf innerhalb kurzer Zeit ein hoher Luftaustausch (stosslüften) erzielt werden, insbesondre tagsüber in den Pausen. Die öffenbaren Fenster ermöglichen zudem die Reinigung durch den Betrieb.

Das Oberlicht im 3. Obergeschoss ist als vertikale Verglasung mit festem Witterungsschutz ausgebildet. Aufgrund ihrer vertikalen Orientierung und Verschattung tragen sie nur in geringem Mass zu zusätzlichen solaren Wärmeeinträgen bei, unterstützen jedoch die natürliche Belichtung sowie das Nachtauskühlungskonzept.



Abbildung 6 Fensteröffnungen mit teilweise heruntergefahrene Rafflammellen (links), Stosslüften über sämtliche Fenster möglich. Die offenen Flügel behindern die Möblierung aufgrund der tiefen Brüstung nicht (rechts).

2.2.7. Variabler Sonnenschutz

Das Schulhaus verfügt über einen variablen Sonnenschutz in Form von automatisch gesteuerten Rafflamellenstoren. Diese sind an sämtlichen Fenstern des Gebäudes installiert. Eine Ausnahme bildet lediglich der Eingangsbereich, bei dem keine Rafflamellen vorhanden sind. Damit entspricht die Anlage grundsätzlich der Anforderung, Fensterflächen mit einem variablen Sonnenschutz auszustatten, um solare Wärmeeinträge zu begrenzen und den visuellen Komfort in den Unterrichtsräumen sicherzustellen.

Die Steuerung der Rafflamellen erfolgt automatisch und ist mit den Präsenzmeldern der jeweiligen Räume gekoppelt. Dadurch kann der Sonnenschutz nutzungsabhängig betrieben werden. Wird der Sonnenschutz durch die Nutzenden manuell übersteuert, bleibt diese Einstellung jedoch für zwei Stunden bestehen, bevor die automatische Regelung wieder aktiviert wird. Diese Zeitspanne gilt unabhängig davon, ob sich nach der Übersteuerung weiterhin Personen im Raum befinden oder nicht. Dadurch kann es vorkommen, dass die Rafflamellen während längerer Zeit in einer ungünstigen Stellung verbleiben und die Sonnenschutzwirkung zeitweise eingeschränkt ist. Insbesondere bei kurzfristigem Verlassen eines Raumes besteht die Gefahr unnötiger solarer Wärmeeinträge, bis die Automatik wieder übernimmt.

2.2.8. Bauliche Verschattung

Die bauliche Verschattung spielt beim Schulhaus Wasgenring, Trakt A, insgesamt eine untergeordnete Rolle. Eine gezielte bauliche Verschattung ist lediglich im Bereich des Haupteingangs vorhanden. Dieser Eingangsbereich ist gegenüber der Fassadenflucht zurückversetzt angeordnet und wird zusätzlich durch ein Vordach geschützt (Abbildung 7). Durch diese Gestaltung wird der Eingangsbereich vor direkter Sonneneinstrahlung sowie vor Witterungseinflüssen abgeschirmt, wodurch sowohl der thermische Komfort als auch die Nutzungsqualität verbessert werden.

An den übrigen Fassadenbereichen sind keine wesentlichen baulichen Verschattungselemente vorhanden. Die Fensterflächen der Unterrichts- und Nebenräume verfügen somit nicht über fest installierte architektonische Massnahmen wie auskragende Bauteile, Balkone oder Fassadenvorsprünge zur Reduktion der direkten Sonneneinstrahlung. Der Schutz vor solaren Wärmeeinträgen erfolgt daher primär über den vorhandenen variablen Sonnenschutz mit automatisch gesteuerten Rafflamellen.



Abbildung 7 Hauseingang in der Fassade zurückversetzt und durch ein Vordach verschattet

2.2.9.Best-Practice Beispiel Sekundarschulhaus Lochacker

2.2.10. Architektur

Die Schulanlage SEK I Reinach besteht aus den beiden Gebäudekomplexen Bachmatten und Lochacker (Abbildung 8). Der Gebäudekomplex Bachmatten umfasst ein Hauptgebäude mit Unterrichtsräumen und Schuladministration, eine Aula sowie das ehemalige Hauswartwohnhaus aus den 1960er-Jahren. Der Gebäudekomplex Lochacker besteht aus einem viergeschossigen Hochbau mit Sockel- und Untergeschoss sowie weiteren Unterrichtsräumen und einer angrenzenden Zweifachturnhalle (Abbildung 8). Beide Gebäudekomplexe wurden in den 1970er-Jahren erstellt. Im Jahr 2010 wurde die Gesamtanlage durch eine freistehende Doppelturnhalle ergänzt. Die insgesamt sechs Gebäudevolumen treten oberirdisch als freistehende Einzelbaukörper in Erscheinung und umschliessen ein quadratisches Rasenspielfeld. Im Norden der Parzelle befindet sich ein Allwettersportplatz. Das Schulhaus Bachmatten wird über die Egerterstrasse, das Schulhaus Lochacker über die Lochackerstrasse erschlossen. Beide Schulhäuser verfügen über einen eigenen Pausenplatz.



Abbildung 8 Sekundarschule Lochacker, links vor der und rechts nach der Gesamtsanierung, Quelle Bild rechts: Viswerk, Basel

Der Gebäudekomplex Lochacker wurde von 2022 bis 2024 gesamtsaniert und dabei wurde das Grundrisslayout des Klassen- und Spezialtraktes neu organisiert. Die bestehende Hauswartwohnung im ersten und zweiten Obergeschoss wurde rückgebaut; der dadurch frei gewordene Bereich wurde in den Sockelbau integriert. Damit verbunden waren konstruktive Anpassungen am bestehenden Gebäude.

Im Zuge der Gesamtsanierung wurden zudem die bestehenden Betonfassadenelemente beziehungsweise die Metall-/Glasfassaden, der Innenausbau, die nichttragenden Innenwände sowie sämtliche Leitungen und Installationen zurückgebaut.

Nach einem weitgehenden Rückbau auf den Rohbau wurde dieser Erbeben- und Durchstanzertüchtigt. Technische Installationen, der Innenausbau und die Einrichtungen wurden erneuert. Das Projekt wurde als Pilot im Hochbauamt SNBS (Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz) zertifiziert. Die SNBS-Zertifizierung wurde als SNBS Gold abgeschlossen.

Die Gebäudehülle des Schulhauses wurde im Rahmen der Sanierung entsprechend dem Minergie-Standard erneuert. Sie besteht aus einer vorgehängten Leichtbaufassade in Elementbauweise mit einer äusseren Bekleidung aus Klinkerplatten und Holz-Metall-Fenstern. Als aussenliegender Sonnenschutz wurden Lamellenstoren eingesetzt. Das Dach wurde gedämmt und extensiv begrünt. Die sanierte Gebäudehülle erfüllt die Anforderungen an die thermische Gebäudehülle gemäss den zum Zeitpunkt der Sanierung geltenden Minergie-Anforderungen. Das Farb- und Materialkonzept der Innenräume wurde auf eine reduzierte Anzahl an Materialien und Oberflächen abgestimmt. Im Eingangsbereich und in den Erschliessungszonen wurde als Fussbodenbelag Feinsteinzeug eingesetzt, während in den

Klassenzimmern Akustik-Linoleum zur Anwendung kam. Die Decken wurden mit gelochten Gipsplatten verkleidet und die neu erstellten Innenwände als Gipsständerwände ausgeführt.

Für die Lüftung wurden eine manuelle Fensterlüftung sowie eine automatisierte Nachtauskühlung realisiert. Gefangene Räume und die WC-Anlagen im Hochtrakt werden mechanisch belüftet. Die Beleuchtung sowie die Stark- und Schwachstrominstallationen wurden im Zuge der Sanierung vollständig erneuert.

Das Gebäude war bereits rund 11 Jahre vor der Gesamtsanierung an das Fernwärmenetz angeschlossen worden. Das Heizverteilsystem war zu diesem Zeitpunkt ebenfalls saniert worden und konnte im Rahmen der Gesamtsanierung mit geringfügigen Anpassungen weitergenutzt werden.

Im Untergeschoss des Schulgebäudes Lochacker befinden sich die Unterrichtsräume für Werken Metall/Holz, Textiles Gestalten, Hauswirtschaft und Musik. Zusätzlich sind dort Räume für die Bewirtschaftung sowie der Velokeller untergebracht. Ein Verbindungsgang stellt die Verbindung zur Turnhalle her.

Im Erdgeschoss befinden sich die naturwissenschaftlichen Unterrichtsräume, die Mediathek, der Aufenthalts- und Arbeitsbereich der Lehrpersonen, die Infrastruktur für den Mittagstisch sowie das Büro des Hauswarts.

Im ersten bis dritten Obergeschoss befinden sich die Klassenzimmer mit und ohne integrierte Gruppenräume, weitere Gruppenräume sowie die Räume für das bildnerische Gestalten.

Die Klassenzimmer sind nach Osten und Westen orientiert und werden durch eine zentrale Erschliessungshalle voneinander getrennt (Abbildung 9). Diese erstreckt sich in Nord-Süd-Richtung und grenzt sowohl an die Fassaden als auch an das zentrale Treppenhaus. Das Treppenhaus ist nach Westen über eine Fassade belichtet.

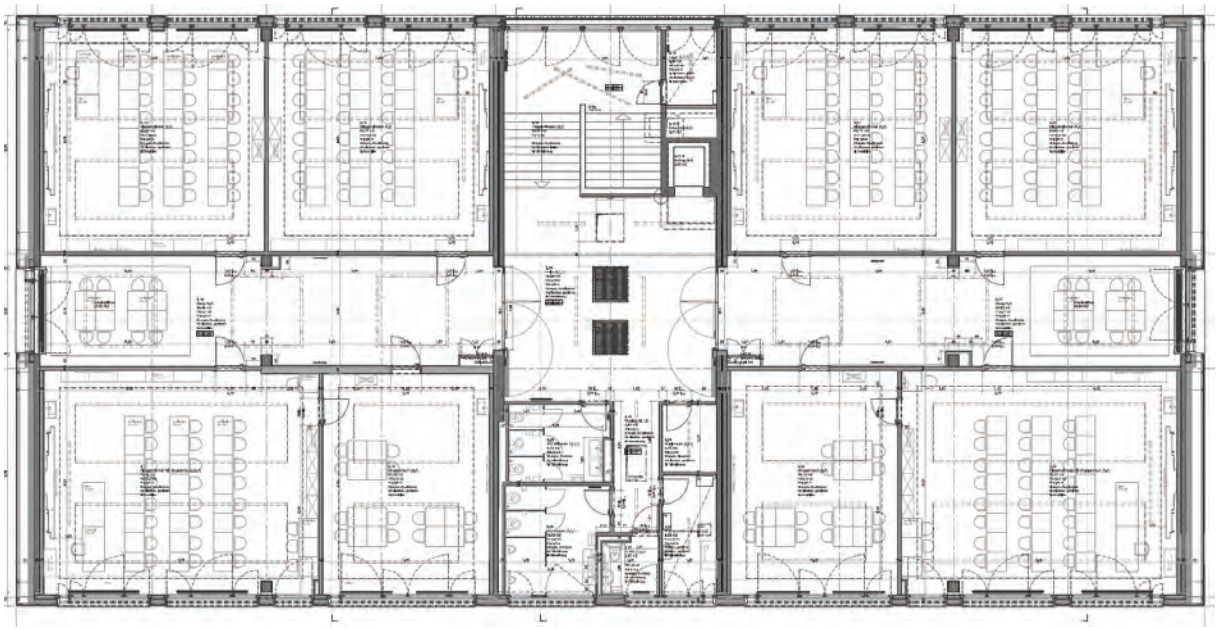


Abbildung 9 Grundriss Dachgeschoss

2.2.11. Wärmespeicherfähigkeit

Die Wärmespeicherfähigkeit des untersuchten Klassenzimmers wird insbesondere durch die Betondecken und den Unterlagsboden mit Linoleumbelag positiv beeinflusst. Demgegenüber reduzieren die an den Deckenflächen angebrachten Akustikpaneele die effektiv wirksame Speichermasse. Die in Leichtbauweise ausgeführten Innenwände, die Brüstung an der Aussenwand sowie die Fensterflächen tragen aufgrund ihrer geringen thermisch wirksamen Speichermasse hingegen nur in geringem Umfang zur Wärmespeicherfähigkeit des Raumes bei.

Insgesamt ist die Wärmespeicherfähigkeit des untersuchten Klassenzimmers als mittel bis gut einzustufen. Positiv wirkt sich zudem die über die Lüftungsflügelklappen oberhalb der Klassenzimmertüren ermöglichte Luftzirkulation zwischen den Klassenzimmern und den Erschliessungsbereichen aus. Der dadurch begünstigte Luftaustausch ermöglicht es, angrenzende Bereiche teilweise in den thermischen Ausgleich einzubeziehen, und unterstützt damit die Wirksamkeit der vorhandenen Wärmespeichermasse.



Abbildung 10 Klassenzimmer (links) und Halle (rechts)

2.2.12. Nachtauskühlung

Die Ebenen vom 1. bis 3. Obergeschoss des bestehenden Schulhaustrakts sowie das 1. Untergeschoss bis zum Erdgeschoss wurden mit einer automatisierten Nachtauskühlung ausgestattet. Die Auslegung der erforderlichen Luftmengen erfolgte gemäss SIA 180:2014 mit einem Ansatz von 10 $m^3/(h \cdot m^2)$. Dies entspricht einem etwa vierfachen Luftwechsel pro Stunde.

Die Nachtauskühlung wird über einen zentralen Abluftmonoblock auf dem Dach des jeweiligen Gebäudetrakts sowie über separate, elektrisch angetriebene Lüftungsflügel in den Klassenzimmern realisiert. Ergänzend sind elektrisch angetriebene Kippflügel in den Türoberlichtern zum Erschliessungsgang angeordnet. Dadurch wird eine definierte Luftführung zwischen den Unterrichtsräumen und den Erschliessungsbereichen ermöglicht.

Die Abluftmonoblöcke sind sowohl auf der Saug- als auch auf der Druckseite mit Schalldämpfern ausgestattet.

Für die Steuerung der Nachtauskühlung wurde keine separate stationäre Wetterstation installiert. Die erforderlichen Wetterdaten werden über das KNX-System an Inhouse Control übermittelt und für die Regelung verwendet. Die Nachtauskühlung wird über das KNX-System gesteuert. Die Lüftungsflügel werden bei Niederschlag oder zu hohen Windgeschwindigkeiten geschlossen. Ebenso erfolgt eine automatische Schliessung, sobald die definierte Soll-Raumtemperatur erreicht wird.

Quelle: Anlagebeschrieb von laubi innovent

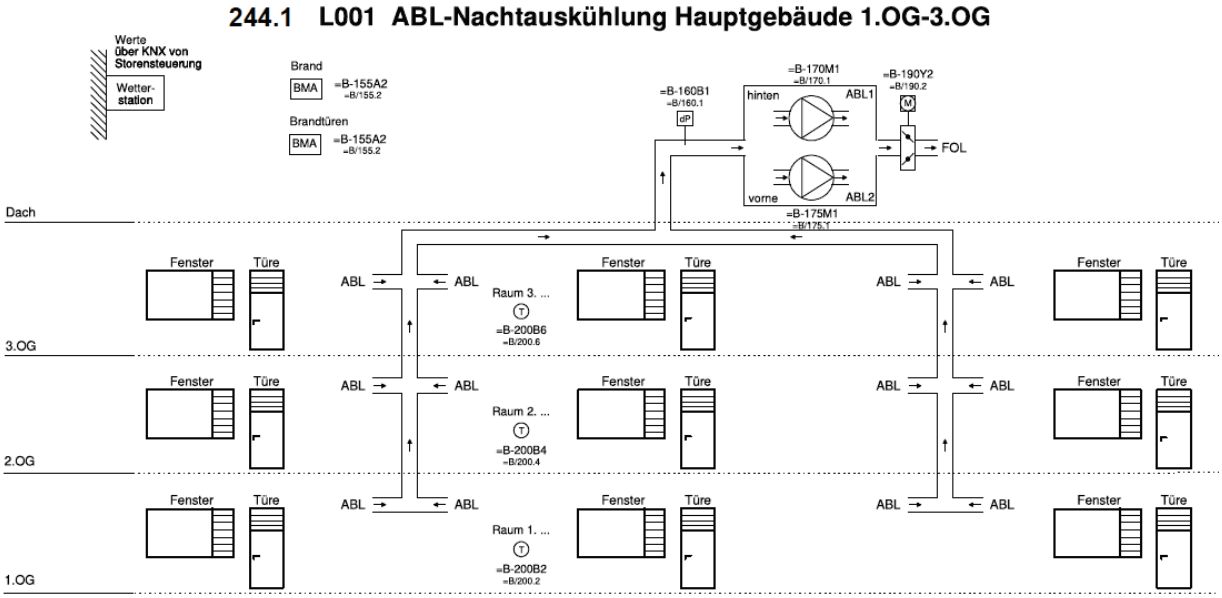


Abbildung 11 Prinzipschema Nachtauskühlung 1. OG-3. OG von laubi innovent

Lüftungsflügel Fassade

Das Gebäude verfügt über motorisierte Lüftungsflügel mit vorgelagerten Wetterschutzgittern in den Fassaden. Die Lüftungsflügel können auch ausserhalb der Nutzungszeiten sicher geöffnet bleiben und schaffen damit die Voraussetzungen für eine kontinuierliche nächtliche Durchlüftung. Jeder Unterrichtsraum verfügt über einen Lüftungsflügel Der freie Öffnungsquerschnitt beträgt bei einer Raumfläche von rund 64 m² und etwa 0.5 m², wobei der tatsächlich wirksame Querschnitt durch das vorgelagerte Wetterschutzgitter (freier Querschnitt x 50 % Annahme) reduziert wird. Dies entspricht einem freien Lüftungsquerschnitt von rund 0.25 % resp. 0.4 % der Bodenfläche.

Lüftungsklappen über Türen

Die mechanisch angetriebenen Kippflügel oberhalb der Zimmertüren mit einem freien Querschnitt von rund 0.27 m² pro Klassenzimmer (64 m² und 79 m²) und 0.21 m² pro Gruppenraume (48 m²) ermöglichen den Luftaustausch zwischen den Unterrichtsräumen und den Erschliessungshallen.

Türen zum Treppenhaus

Die Brandschutztüren bleiben gemäss Brandschutzkonzept im Normalbetrieb dauerhaft geöffnet. Eine Nutzung der Erschliessungsgänge als Gruppenräume während des Tages steht der Funktion der Nachtauskühlung nicht entgegen, da die jeweiligen Nutzungszeiten zeitlich voneinander getrennt sind. Der freie Querschnitt der Türöffnung beträgt 8.3 m² pro Geschoss.

Tabelle 2 Steuerung der Dachventilatoren

Anlage	Bezeichnung	Wert	Neuer Wert 2026
	L002 Lüftung Nachtauskühlung Räume SG-EG		
L002	Sollwert Raumtemperatur EG	21.0°C	
	L002 Lüftung Nachtauskühlung AUL Ein		
L002	Aussentemperatur einmal täglich >	25.0°C	
L002	Aussentemperatur < höchste Raumtemperatur (Differenz)	- 3.0°C	
L002	Aussentemperatur nachts >	12.0°C	
L002	Aussentemperatur nachts <	20.0°C	
L002	Istwert Raumtemp. (in einem Raum) > Sollwert Raumtemp.	21.0°C	
L002	Windgeschwindigkeit (ohne Regen) verzögert<	10m/s	
L002	Hysterese Wiedereinschalt. (ohne Regen) verzögert <	7m/s	
L002	Windgeschwindigkeit (mit Regen) verzögert<	6m/s	
L002	Hysterese Wiedereinschalt. (mit Regen) verzögert<	4m/s	
	L002 Lüftung Nachtauskühlung AUL Aus		
L002	Aussentemperatur < höchste Raumtemperatur (Differenz)	- 1.0°C	
L002	Raumtemp. (alle Räume) < Sollwert Raumtemp. minus	0.5°C	
L002	Aussentemperatur nachts <	12.0°C	
L002	Aussentemperatur nachts >	20.0°C	
L002	Windgeschwindigkeit (ohne Regen) verzögert>	10m/s	
L002	Windgeschwindigkeit (mit Regen) verzögert>	6m/s	
	L002 Zeitprogramm Nachtauskühl. EIN/AUS		
L002	Zeitprogramm Nachtausk. EIN Montag bis Sonntag	23:00	
L002	Zeitprogramm Nachtausk. AUS Montag bis Sonntag	06:00	
	L002 Freigabe Lüftung individuelle Auskühlung / Lüften		
L002	Windgeschwindigkeit (ohne Regen) verzögert<	7m/s	
L002	Windgeschwindigkeit (mit Regen) verzögert<	4m/s	
	L002 Sperren Lüftung individuelle Auskühlung / Lüften		
L002	Windgeschwindigkeit (ohne Regen) verzögert>	10m/s	
L002	Windgeschwindigkeit (mit Regen) verzögert>	6m/s	

Fazit

Die Nachtauskühlung des Schulhauses Lochacker ist als mechanisch unterstütztes Konzept ausgelegt. Die Abluftmonoblöcke auf den Dächern der Gebäudetrakte machen den Luftaustausch von Wind und thermischem Auftrieb unabhängig und gleicht die kleinen freien Querschnitte der Fassadenöffnungen aus. Die Auslegung folgt dem Volumenstromkriterium von 10 $m^3/(h \cdot m^2)$ nach SIA 180:2014. Lüftungsflügel, Überströmflügel und Ventilatoren werden über das KNX-System automatisch gesteuert, sodass die Nachtauskühlung nicht von der Bedienung durch Lehrpersonen oder Hausdienst abhängt. Ihre

Wirksamkeit hängt dafür von der Parametrierung ab. Die Anpassung der Einstellungen im Sommer 2026 zeigt, dass die Parameter im Betrieb überprüft und optimiert werden müssen.

Die in Tabelle 2 dokumentierten Freigabebedingungen setzen einen Tag mit mehr als 25 °C Aussentemperatur, eine um mindestens 3 K unter der höchsten Raumtemperatur liegende Aussentemperatur und nächtliche Aussentemperaturen zwischen 12 und 20 °C voraus. Das Zeitfenster reicht von 23 bis 6 Uhr. In Tropennächten, in denen die Aussentemperatur nicht unter 20 °C fällt, bleibt die Anlage ausser Betrieb. Hier besteht Optimierungspotential. Mit der erwarteten Zunahme solcher Nächte sinkt die Zahl der nutzbaren Auskühlnächte. Für die natürliche Nachtlüftung zeigt die Simulation, dass ein Beginn um 23 Uhr gegenüber 17 Uhr die Überhitzungsstunden nur geringfügig erhöht; ob dies für die mechanisch unterstützte Auskühlung ebenso gilt, wurde nicht untersucht.



Abbildung 12 Grosser Lüftungsflügel mit Wetter-/Einbruchschutz (links), Lüftungsklappe über den Türen, um eine Querlüftung zu ermöglichen (rechts)

2.2.13. Fensterflächen

Die Fensterflächen des Schulhauses wurden hinsichtlich ihrer Eignung für den sommerlichen Wärmeschutz beurteilt. Gemäss SIA 180 beträgt die anrechenbare Fensterfläche eines Referenzklassenzimmers 11.7 m² (mit Lüftungsklappe). Die eigentliche Verglasungsfläche beträgt ca. 9.3 m² beziehungsweise ca. 33.7 % der Fassadenfläche (27.6 m²). und liegt damit im unteren Bereich des empfohlenen Bereichs von 30–40 % nach Verfahren 1 des Nachweisverfahren für den sommerlichen Wärmeschutz SIA 180:2014.

Die Fenster im Referenzklassenzimmer bestehen aus vier öffenbaren Flügeln, zwei Putzflügeln und einer Lüftungsklappe. Die öffenbaren Flügel ermöglichen eine nutzerfreundliche Stosslüftung, insbesondere während der Pausen. Die grossformatigen Putzflügel dienen primär der Reinigung und sind aufgrund ihrer Grösse nur schwer bedienbar.



Abbildung 13 Fensteröffnungen in einem Klassenzimmer (links), Lüftungsflügel Nachtauskühlung (rechts).

2.2.14. Variabler Sonnenschutz

An sämtlichen Fenstern sind automatische, aussenliegende Rafflamellenstoren installiert. Ausgenommen ist die Fassade im Eingangsbereich. Der Sonnenschutz dient der Reduktion solarer Wärmeeinträge und der Sicherstellung des visuellen Komforts.

Die Steuerung erfolgt automatisch und ist mit der Präsenzdetektion gekoppelt. Eine manuelle Übersteuerung durch die Nutzenden ist möglich. Diese bleibt für 45 Minuten aktiv, bevor die Steuerung wieder in den Automatikbetrieb zurückkehrt.

Grundsätzlich stellt das System einen wirksamen Sonnenschutz sicher. Die bestehende Sperrzeit nach manueller Übersteuerung wird von den Nutzenden jedoch als zu kurz empfunden. Eine Sperrzeit von bis zu zwei Stunden wird als sinnvoll erachtet.

2.2.15. Bauliche Verschattung

Im Eingangsbereich sorgt die zurückversetzte Fassadenebene für eine gewisse Verschattung und reduziert die direkte Sonneneinstrahlung (Abbildung 14). Dadurch werden sowohl der thermische Komfort als auch der Witterungsschutz verbessert.

In den übrigen Fassadenbereichen bestehen keine wesentlichen baulichen Verschattungselemente. Auskragende Bauteile oder fest installierte architektonische Verschattungselemente sind nicht vorhanden. Die Begrenzung der solaren Wärmeeinträge wird daher überwiegend durch die aussenliegenden Rafflamellenstoren gewährleistet.



Abbildung 14 Erdgeschoss in der Fassade zurückversetzt, Quelle: Viswerk, Basel

2.2.16. Vergleichende Einordnung der Best-Practice-Beispiele

Beide Schulbauten beruhen auf ähnlichen Voraussetzungen des passiven Kühlkonzepts. Aussenliegender, automatisch gesteuerter Sonnenschutz an den Fenstern der Unterrichtsräume, Fassadenöffnungen, die ausserhalb der Nutzungszeit witterungs- und einbruchgeschützt offenstehen können, und einem durchgehenden Strömungsweg von der Fassade über Überströmöffnungen oberhalb der Klassenzimmertüren in die Erschliessungshalle. In beiden Gebäuden lässt das Brandschutzkonzept zu, dass die Türen zwischen Halle und Treppenhaus im Normalbetrieb offenstehen. Damit sind hier bauliche Lösungen umgesetzt, die in den Begehungen Basler Bestandsbauten die Nachtauskühlung verhinderten: fehlender Witterungs- und Einbruchschutz der Öffnungen sowie Brandschutzanforderungen, die eine Querlüftung über die Erschliessung ausschliessen.

Die Beispiele unterscheiden sich im Antrieb der Luftströmung und damit in der Abhängigkeit von Nutzenden und Technik. Im Trakt A Wasgenring erzeugt der thermische Auftrieb über das Treppenhaus und das temperaturgeführte Oberlicht den Luftaustausch. Lüftungsflügel und Überströmklappen werden von den Lehrpersonen geöffnet. Im Schulhaus Lochacker ist die Nachtauskühlung vollständig automatisiert und durch Abluftventilatoren unterstützt, sodass kleinere Öffnungsquerschnitte genügen. Das Konzept Lochacker ist damit weniger von der Bedienung, aber stärker von Parametrierung, Wartung und Antriebsenergie abhängig. Dieses Spannungsfeld entspricht den Aussagen der Interviews, nach denen eine automatisierte Nachtlüftung Nutzerabhängigkeiten verringert, aber technischen und betrieblichen Aufwand verursacht.

Bei beiden Beispielen bestimmt die Rückkehr des Sonnenschutzes in den Automatikbetrieb nach einer manuellen Übersteuerung die Wirksamkeit mit. Die Sperrzeiten sind unterschiedlich festgelegt und werden gegensätzlich beurteilt. Im Trakt A Wasgenring kann die Sperrzeit von zwei Stunden dazu führen, dass Lamellen nach dem Verlassen eines Raumes in ungünstiger Stellung verbleiben; im Schulhaus Lochacker empfinden die Nutzenden die Sperrzeit von 45 Minuten als zu kurz. Eine feste Sperrzeit wird damit keinem der beiden Nutzungsmuster gerecht. Zielführender wäre eine an die Präsenzerfassung gekoppelte Rückkehr in den Automatikbetrieb, welche die Nutzereinstellung bei Anwesenheit beibehält und bei Abwesenheit aufhebt.

Die Beispiele unterscheiden sich zudem im Glasanteil. Der Trakt A Wasgenring weist mit rund 49 % einen hohen Glasanteil auf; der sommerliche Wärmeschutz beruht damit primär auf dem beweglichen Sonnenschutz, der Speichermasse und der Nachtauskühlung, und der vereinfachte Nachweis nach SIA 180:2014, Verfahren 1, ist nicht anwendbar. Das Schulhaus Lochacker liegt mit 30.4 % knapp über dessen Grenzwert von 30 % bei mittlerer Wärmespeicherfähigkeit. In beiden Gebäuden verringern abgehängte Akustikdecken die thermisch wirksame Deckenmasse. Der Zielkonflikt zwischen Raumakustik und Speichermasse (Jahresbericht 2025, Kap. 7: Kap. 2.4.5) ist somit auch in den Best-Practice-Beispielen nicht aufgelöst.

2.3 Simulation eines Klassenzimmers im Bestand

Interviews und Best-Practice-Beispiele zeigen qualitativ, welche Massnahmen den sommerlichen Komfort bestimmen. Die dynamische Simulation quantifiziert deren Wirkung an einem Klassenzimmer im Bestand (AP3). Das Modell wurde im Jahresbericht 2025 (Kap. 7: Kap. 2.9, Kap. 6.1) beschrieben. Im Berichtsjahr wurden Kombinationen wirksamer Einzelmassnahmen untersucht und die Ergebnisse den Nachweisen nach SIA 180:2014 sowie den in der realen Schule gemessenen Überschreitungsstunden gegenübergestellt. Gegenüber dem Jahresbericht 2025 werden einzelne Parameter des Beispielklassenzimmers leicht angepasst und die Simulationen zur besseren Vergleichbarkeit mit dem neuen, aber aktuell inoffiziellen Normklimajahr BASSTA 2023 (DRY) wiederholt und mit weiteren Varianten ergänzt.

2.3.1. Basismodell

Das Basismodell besteht aus einem Klassenzimmer und dem Zugangsbereich basierend auf einer realen Schulsituation einer Sekundarschule (Abbildung 15). Das Klassenzimmer hat eine Nettogrundfläche von 60.3 m^2 und eine lichte Raumhöhe von 3 m. Es ist nach Südost ausgerichtet. Das Modell ist ein Massivbau mit 3-fach verglasten Fenstern. Im Klassenzimmer ist die Decke komplett mit Akustikpanelen ausgestattet. Der Lamellensonnenschutz wird geschlossen (Lamellenstellung 65°), wenn die Einstrahlung auf die Fassade 200 W/m^2 überschreitet. Nachts bleibt der Sonnenschutz in der gleichen geschlossenen Stellung (65°). Dieses Verhalten bildet den in den Schulbegehungen dokumentierten Fall ab, bei dem die Lamellen über Nacht nicht geöffnet oder horizontal gestellt werden. Die Lüftung erfolgt manuell über die Fenster. Es kann je Fenster ein Drittel der Fläche als Dreh-/Kippflügel geöffnet werden.

Während der Lektionen sind 18 Schülerinnen und Schüler und eine Lehrperson anwesend. An Schultagen ist die Klasse zwischen 7-17 Uhr belegt. Unterricht ist zwischen 8-15:45 Uhr. Es wird angenommen, dass eine Lehrperson zusätzlich von 7-8 Uhr und 15:45-17 Uhr für Vor- und Nachbereitung des Unterrichts anwesend ist. Am Vormittag gibt es fünf und am Nachmittag zwei Lektionen. Laut Stundenplänen sind die Klassenzimmer im Schulalltag nicht an allen Wochentagen während sieben Lektionen belegt. Die sieben Lektionen mit jeweils 19 Personen werden jedoch als Worst-Case-Szenario für die Simulation angenommen. Jede Lektion dauert 45 Minuten. Die Pausendauer ist 5 bzw. 10 Minuten und alterniert zwischen den Lektionen. Nach der letzten Lektion am Mittag und am Nachmittag wird jeweils 15 Minuten gelüftet. Die Wärmeeintragsleistung für Geräte und Beleuchtung (11 bzw. 8 W/m^2) entspricht den Standardwerten von [4]. Das Tagesprofil der Gerätenutzung wird an SIA 2024:2021 angelehnt. Es wird in den Randstunden leicht modifiziert, da die reale Belegung kürzer als die Normbelegung ist. Es wird kein Gerätestandby berücksichtigt. Das Tagesprofil für die Personenanwesenheit ist dem Stundenplan inkl. Pausen angepasst, wobei vereinfacht die Anwesenheit für jeden Schultag gleich angenommen ist. Die künstliche Beleuchtung wird adaptiv so geregelt, dass 500 lx während der Belegungszeit eingehalten ist. Im Winter wird mit einem idealen Heizelement auf 20 °C geheizt. Im Sommer ist die Heizung ab Anfang Mai bis Ende September ausgeschaltet. Es gibt keine maschinelle Kühlung. Weitere Angaben zum Modell sind im Anhang Kap. 6 zu finden.

Das Basismodell wird mit realen Messdaten validiert [5] jedoch für die bessere Nachvollziehbarkeit für diesen Bericht mit dem inoffiziellen Normklimajahr BASSTA 2023 (DRY) für die Basler Innenstadt [6] simuliert.

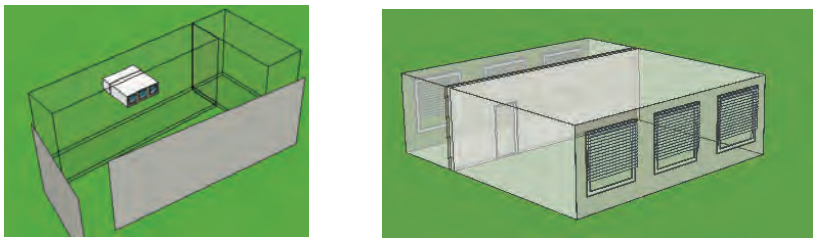


Abbildung 15: Ansicht des Basismodelles in IDA ICE.

2.3.2.Varianten

Um den Einfluss verschiedener Massnahmen und Klimaszenarien auf die Raumlufttemperatur des Klassenzimmers zu untersuchen, werden 26 verschiedene Varianten betrachtet (Tabelle 3). Die Varianten sind aufgeteilt in verschiedene Massnahmenpakete:

- **Betrieb Nachauskühlung und Sonnenschutz:** Verschiedene Betriebsweisen bei der natürlichen Auskühlung werden betrachtet. Dies sind Massnahmen, die z.T. recht schnell auch im Bestand umgesetzt werden können. Der Schaltpunkt zum Schliessen des Sonnenschutzes wird variiert.
- **Bauliche Massnahmen:** Diese Massnahmen betreffen die Wärmeabgabe von Beleuchtung und Geräten sowie den Anteil Speichermasse (Akustikdecke!) bzw. den g-Wert des Fensterglases. Dies sind Massnahmen, die auch im Bestand umgesetzt werden können, jedoch bauliche Anpassungen bedingen.
- **Belegung:** Die Belegung hängt zum einen vom Schultyp und zum anderen von der Anzahl der Personen im Klassenzimmer ab. Hier wurde der Schultyp von Sekundar- auf Primarschule geändert. Die Wärmeabgabe einer Primarschülerschaft ist geringere als die einer Sekundarschülerschaft. Diese Reduktion der Wärmeabgabe entspricht gleichzeitig einer Reduktion der Sekundarschülerschaft um ca. 33 %. Dies könnte mit einer zeitweisen Aufteilung in Teil-/Halbklassen umgesetzt werden. Da im realen Betrieb selten sieben Lektionen an einem Tag stattfinden wird eine Variante mit sechs Lektionen gerechnet. Dabei wird die letzte Lektion am Vormittag gestrichen.
- **Neubau:** Die lichte Raumhöhe, Fenstergrösse und Ausrichtung der Klassenzimmer können nur bei einem Neubau optimiert werden.
- **Klima:** Die Raumtemperaturen werden durch verschiedene Klimaszenarien unterschiedlich beeinflusst.

Tabelle 3 Beschreibung der untersuchten Varianten

Nr.	Variante	Beschreibung	Massnahme
0	Basismodell Sekundarschule (18 + 1 Pers.)	Taglüftung: Pausen- und temperaturabhängige Lüftung Nachtlüftung: 17-7 Uhr, 01.-27.06./11.08.-06.09., nur während der Schultage, Lamellen 65° geschlossen, Kippstellung Während der Taglüftung sind Drehflügel immer komplett geöffnet, der Sonnenschutz ist geschlossen, wenn dies aufgrund der Einstrahlung (> 200 W/m^2) gefordert ist	----
1	NL: 17-7 Uhr Drehflügel	Während der Nachtlüftung (NL) werdend die Drehflügel im Klassenzimmer und im Flur komplett geöffnet	Betrieb Nachtlüftung und Sonnenschutz
2	NL: 17-7 Uhr Drehflügel, Querlüftung	Wie #1 plus geöffnete Klassentüre	
3	NL: 17-7 Uhr Drehflügel, Querlüftung, Lam. Horiz.	Wie #2 plus die Lamellen des herabgefahrenen Sonnenschutzes sind auf horizontal gestellt	
4	NL: 17-7 Uhr Drehflügel, Lam. Horiz.	Wie #1 plus die Lamellen des herabgefahrenen Sonnenschutzes sind auf horizontal gestellt	
5	NL: 23-7 Uhr Drehflügel, Lam. Horiz.	Wie # 4 aber Start der Nachtlüftung erst um 23 Uhr	
6	NL: 6-7 Uhr Drehflügel, Lam. Horiz.	Wie # 4 aber Start der Nachtlüftung erst morgens um 6 Uhr	

7	Sonnenschutz (200 W/m^2 -> 150 W/m^2)	Der Sonnenschutz schliesst schon bei 150 W/m^2	
8	Zielwerte Beleuchtung (11 -> 7.2 W/m^2)	Die spezifische Leistung wird vom Standard- auf den Zielwert gesenkt (Norm SIA 2024:2021).	Bauliche Massnahmen
9	Zielwerte Geräte (8 -> 4 W/m^2)	Die spezifische Leistung wird vom Standard- auf den Zielwert gesenkt (Norm SIA 2024:2021).	
10	Zielwerte Beleuchtung und Geräte (11/8 -> 7.2/4 W/m^2)	Die spezifische Leistung wird vom Standard- auf den Zielwert gesenkt (Norm SIA 2024:2021).	
11	Akustikdecke (100% -> 30%)	Der Anteil der Akustikdecke an der Deckenfläche wird von 100 % auf 30 % gesenkt.	
12	Reduktion g-Wert (0.54 -> 0.26)	Der g-Wert des Fensterglases wird reduziert (z.B. Austausch der Gläser, Sonnenschutzfolien)	
13	Lektionen (7 LK -> 6 LK)	Es wird die letzte Lektion am Vormittag gestrichen	Belegung
14	Sekundar (19 Pers -> 25 Pers.)	Die Sekundarschülerschaft wird auf 25 Personen erhöht	
15	Primar (115 W -> 73 W)	Die Sekundarschülerschaft wird durch eine Primarschülerschaft ersetzt. Betrachtung eines anderen Schultyps. Es kann auch eine Aufteilung der Klassen bedeuten, so dass nur 12 Personen im Raum sind.	
16	Raumhöhe (3 m -> 4 m)	Die lichte Raumhöhe wird um einen Meter erhöht. Fensterfläche bleibt gleich	Neubau
17	Raumhöhe (3 m -> 4 m, Fensterfläche +50%)	Wie # 14, plus eine um 50 % vergrösserte Fensterfläche	
18	Orientierung (SO -> N)	Das Klassenzimmers ist nach Nord orientiert.	
19	Orientierung (SO -> NW)	Das Klassenzimmers ist nach Nordwest orientiert.	
20	Orientierung (SO -> W)	Das Klassenzimmers ist nach West orientiert.	
21	Orientierung (SO -> O)	Das Klassenzimmers ist nach Ost orientiert.	
22	Orientierung (SO -> S)	Das Klassenzimmers ist nach Süd orientiert.	
23	BASSTA 2023 (1in10)	Normklimajahr für einen besonders heissen Sommer in 10 Jahren	Klima
24	BKLI 2060 RCP 8.5 (DRY)	Zukunftsklima	
25	BKLI 2060 RCP 8.5 (1in10)	Zukunftsklima für einen besonders heissen Sommer in 10 Jahren	
26	Messdaten 2025	Eine Kombination aus Messdaten der Stationen Basel St. Johann (Aussenlufttemperatur) und Basel-Binningen (restl. Daten) für 2025	

Bei den meisten Varianten wird nur eine Einzelmassnahme untersucht, um den Effekt der Einzelmassnahmen aufzuzeigen. In der Praxis wirken Massnahmen meist kombiniert – beispielsweise Querlüftung (#2) zusammen mit reduziertem Akustikdeckenanteil (#11) und Nordorientierung (#18). Die systematische Kombination verschiedener Massnahmen erfolgt im folgenden Kapitel.

Als Synonym für die empfundene bzw. operative Temperatur wird der Begriff Raumlufttemperatur bzw. Temperatur als Kurzform verwendet.

2.3.3. Analyse

Für das Klassenzimmer werden die maximalen Raumlufttemperaturen und die Gesamtanzahl der Stunden, in denen die Raumlufttemperatur zwischen 26-28 °C, 28-30 °C bzw. über 30 °C liegen, bestimmt. Zusätzlich wird die Anzahl der Stunden als Gesamtsumme über 26 °C, sowie die Anzahl der Stunden, die oberhalb des Grenzwertes gemäss Norm SIA 180:2014 Figur 3 für Räume ohne mechanische Kühlung liegen, dargestellt. Die Ergebnisse basieren auf einer Jahressimulation. Die Werte gelten für die Belegungszeit von 7:00-17:00 Uhr an Schultagen. Die farbliche Markierung kennzeichnet bei den Temperaturen die jeweils tiefsten Werte je Rubrik in Grün und die jeweils höchsten Werte in Rot. Bei den Überschreitungsstunden des SIA 180:2014 Grenzwertes werden die tiefsten Werte in Hellrot und die höchsten Werte in Dunkelrot dargestellt (Tabelle 4).

Tabelle 4 Anzahl der Stunden der Raumlufttemperatur (θopr.) für verschiedene Temperaturbereiche und Anzahl der Stunden oberhalb Grenzwerte nach SIA 180:2014 für Gebäude ohne (> GW Fig. 3) während der Belegungszeit für verschiedene Varianten (Belegungszeit 1'504 h, Jahresbetrachtung). Basisklimadaten: BASSTA 2023 (DRY).

Nr.	Variante	θopr. max. °C	θopr. > 26 - ≤ 28 °C h	θopr. > 28 - ≤ 30 °C h	θopr. > 30 °C h	θopr. > 26 °C h	SIA 180 > GW Fig. 3 h	Massnahmenbereich
0	Basismodell	31.5	109	100	18	227	58	---
1	NL: 1 7 -7 Uhr, Drehflügel	31.0	107	82	9	198	34	Betrieb Nachtlüftung und Sonnenschutz
2	NL: 1 7 -7 Uhr, Drehflügel, Querlüftung	30.9	107	79	7	192	28	
3	NL: 17 - 7 Uhr, Drehfl., Querl., Lam. horiz.	30.4	108	54	2	165	14	
4	NL: 17 - 7 Uhr, Drehflügel, Lamellen horiz.	30.5	109	57	3	168	15	
5	NL: 23 - 7 Uhr, Drehflügel, Lamellen horiz.	30.4	109	61	3	173	16	
6	NL: 6 - 7 Uhr, Drehflügel, Lamellen horiz.	31.6	110	105	24	239	70	
7	Sonnenschutz (200 W/m2 -> 150 W/m2)	31.5	109	101	20	230	63	
8	Beleuchtung (11 W/m2 -> 7.2 W/m2)	31.3	109	94	12	215	44	bauliche Massnahmen
9	Geräte (8 W/m2 -> 4 W/m2)	31.1	109	92	10	212	39	
10	Beleuchtung/Geräte (11/8 -> 7.2/4 W/m2)	30.9	109	83	6	198	27	
11	Akustikdecke (100 % -> 30 %)	31.0	119	88	8	214	30	
12	Reduktion g-Wert (0.54 -> 0.26)	31.2	109	92	12	213	44	
13	Lektionen (7 LK -> 6 LK)	31.4	100	85	13	199	45	Belegung
14	Sekundar (19 Pers. -> 25 Pers.)	31.8	107	113	36	255	95	
15	Primar (115 W -> 73 W)	31.3	106	66	7	180	18	
16	Raumhöhe (3 m -> 4 m)	31.1	115	95	11	221	40	Neubau
17	Raumhöhe (3 m -> 4 m, Fensterfl. +50%)	31.0	91	61	6	158	14	
18	Orientierung (SO -> N)	30.7	84	40	3	127	6	
19	Orientierung (SO -> NW)	30.7	79	47	4	130	7	
20	Orientierung (SO -> W)	31.1	81	64	6	151	20	
21	Orientierung (SO -> O)	31.4	102	101	12	215	46	
22	Orientierung (SO -> S)	31.3	99	89	12	200	52	
23	BASSTA 2023 (1 in 10)	32.7	177	157	38	371	102	Klima
24	BKLI 2060 RCP 8.5 (DRY)	32.3	122	98	29	249	53	
25	BKLI 2060 RCP 8.5 (1 in 10)	32.8	102	84	52	238	51	
26	Messwerte 2025	32.7	96	69	63	228	74	

Betrieb der Nachtlüftung und Sonnenschutz

Wie erwartet zeigt sich, dass für eine effektive Nachtlüftung möglichst grosse und lichte Öffnungsflächen sowie lange Öffnungszeiten entscheidend sind. Der Aufwand, die Fenster erst um 23 Uhr zu öffnen, lohnt sich nicht. Eine kurze Stosslüftung am Morgen reicht nicht aus, um die Konstruktion auszukühlen. Sind die Drehflügel über Nacht bei horizontaler Lamellenstellung geöffnet, ist eine Querlüftung nicht mehr unbedingt notwendig, da die Öffnungsfläche im Klassenzimmer selbst für die Nachtauskühlung gross genug ist. In diesem Fall können Klassentüren geschlossen bleiben.

Das Schliessen des Sonnenschutzes schon bei einer geringeren Einstrahlung auf die Fassade führt zu einer längeren Schliessdauer des Sonnenschutzes. Die hat eine leicht erhöhte Anzahl an Stunden mit hohen Temperaturen zur Folge, da der Sonnenschutz den Lüftungsquerschnitt der Fenster für eine längere Zeitspanne reduziert.

Bauliche Massnahmen

Eine Reduktion der internen Lasten (Beleuchtung/Geräte), dem Anteil der Akustikdecken (sofern diese nicht frei abgehängt sind, und somit die thermische Speichermasse nicht entkoppeln) sowie des g-Wertes des Fensterglases (Sonnenschutzfolie, Glasersatz) führt jeweils zu einer verringerten Anzahl an Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen. Die Reduktion der internen Lasten und der Akustikdeckenfläche führen zu den tiefsten Werten in dieser Kategorie. Eine Reduktion der internen Lasten wirkt sich positiv auf die Temperaturen im Sommer und den Energiebedarf auf, führt im Winter aber zu einem höheren Heizwärmebedarf. Die Reduktion des g-Wertes führt zu geringeren solaren Wärmegewinnen was zu einer Erhöhung des Bedarfs für Heizwärme als auch für die Beleuchtung zur Folge hat.

Belegung

Der Schultyp bzw. die Belegungsdichte hat einen sehr hohen Einfluss auf die Raumlufttemperaturen. Die Belegung mit 25 Personen weist von allen Varianten mit demselben Klima (#0-22) überall die höchsten Werte auf. Bei hohen Temperaturen sollte die Belegungsdichte geprüft und ggf. reduziert werden. Eine Reduktion der Anzahl an Lektionen führt ebenfalls zu tieferen Temperaturen.

Neubau

Um den Vorteil einer hohen Raumhöhe zu quantifizieren, muss die Temperaturschichtung mitbetrachtet werden. Die angegebenen Raumtemperaturen sind Mitteltemperaturen über das gesamte Raumvolumen. In der Realität stellt sich eine Temperaturschichtung ein, mit tieferen Temperaturen im Aufenthaltsbereich und höheren Temperaturen an der Decke. Je höher der Raum, desto ausgeprägter wird die Temperaturschichtung. Dies wurde bislang nicht quantifiziert. Ostorientierte Klassenzimmer weisen für die betrachteten Orientierungen bei der angenommenen Belegungszeit die höchste Anzahl an Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen auf. Klassen mit nördlichen Orientierungen weisen die tiefsten Raumtemperaturen auf.

Klima

Das verwendete Klimaszenario hat einen grossen Einfluss auf die Raumlufttemperaturen. Das Klimaszenario 2023 mit dem Fokus auf einen extremen Sommer zeigt auf, wie sich schon heute die Raumlufttemperaturen entwickeln können. Bei den durchgeführten Untersuchungen führen die beiden Zukunftsszenarien 2060 nicht zu den höchsten Raumlufttemperaturen.

Eine nähere Analyse der Klimaszenarien zeigt, dass bei allen synthetischen Klimaszenarien (#0, #23-25) die Monatsmittelwerte für die Temperatur und Globalstrahlung im Juli, während der Sommerferien, am höchsten sind. Die Messdaten aus dem Jahr 2025 weisen für beide Parameter die höchsten Werte im Juni während der Schulzeit auf. Je nach verwendetem Klimaszenario, variiert nicht nur die Höhe und sondern auch der Jahresverlauf der Temperatur und Globalstrahlung und damit ihr Einfluss auf die Raumlufttemperaturen.

2.3.4. Kombination von Massnahmen

Im Folgenden werden kombinierte Massnahmen untersucht (Tabelle 5, Tabelle 6). Die Varianten #27-32 können im Bestand als auch im Neubau umgesetzt werden. Die Varianten #33-35 basieren auf einer Nordorientierung des Klassenzimmers, was nur im Neubau möglich ist.

Mit allen Massnahmenkombinationen können die Anzahl an Stunden > 28 °C deutlich gesenkt werden. Bei den Varianten #30 und # 33 gibt es keine Stunden oberhalb des Grenzwertes von SIA 180:2016 Fig. 3. Beide Massnahmenkombinationen bedingen jedoch eine konsequente Nachtlüftung.

Tabelle 5 Kombinierte Massnahmen. Die Nummern beziehen sich auf Tabelle 3

Nr.	Variante	#4 NL: 17 - 7 Uhr, Drehflügel, Lamellen horiz.	#10 Beleuchtung/Geräte (11/8 -> 7.2/4 W/m2)	#11 Akustikdecke (100 % -> 30 %)	#12 Reduktion g-Wert (0.54 -> 0.26)	#17 Raumhöhe (3 m -> 4 m, Fensterfl. +50%)	#18 Orientierung (SO -> N)
27	K1: Nr. 4+10	x	x				
28	K2: Nr. 4+10+11	x	x	x			
29	K3: Nr. 4+10+12	x	x		x		
30	K4: Nr. 4+10+11+12	x	x	x	x		
31	K5: Nr. 10+12		x		x		
32	K6: Nr. 10+11+12		x	x	x		
33	K7: Nr. 4+18	x					x
34	K8: Nr. 17+18					x	x
35	K9: Nr. 10+17+18		x			x	x

Tabelle 6 Kombinierte Massnahmen: Anzahl der Stunden der Raumlufttemperatur (θopr.) für verschiedene Temperaturbereiche und Anzahl der Stunden oberhalb der oberen Grenzwerte aus SIA 180:2014 für Gebäude ohne (> GW Fig. 3) während der Belegungszeit für verschiedene kombinierte Massnahmen (Belegungszeit 1'504 h, Jahresbetrachtung). Basisklimadaten: BASSTA 2023 (DRY).

Nr.	Variante	θopr. max. °C	θopr. > 26 - ≤ 28 °C h	θopr. > 28 - ≤ 30 °C h	θopr. > 30 °C h	θopr. > 26 °C h	SIA 180 > GW Fig. 3 h	Massnahmenbereich
0	Basismodell	31.5	109	100	18	227	58	---
27	K1: Nr. 4+10	30.0	101	40	0	142	3	Optim. Bestand/ Neubau
28	K2: Nr. 4+10+11	30.0	101	40	0	142	3	
29	K3: Nr. 4+10+12	29.7	96	29	0	125	1	
30	K4: Nr. 4+10+11+12	29.2	92	18	0	109	0	
31	K5: Nr. 10+12	30.5	106	70	4	180	18	
32	K6: Nr. 10+11+12	30.2	115	58	2	175	9	
33	K7: Nr. 4+18	30.0	77	23	0	100	0	Optim. Neubau
34	K8: Nr. 17+18	30.7	75	35	3	113	5	
35	K9: Nr. 10+17+18	30.4	78	29	1	108	1	

2.3.5. Bauliche Nachweis und Komfortnachweis nach SIA 180:2014-C1/C2

Simulation

Es wird der bauliche Nachweis für das Basismodell (#0) nach SIA 180:2014-Anhang C1 geführt (Abbildung 16). Dabei werden zwei Klimaszenarien betrachtet: das heutige Normaljahr von Basel-Binningen und das zukünftige Klima Klingenbergstrasse 2060 RCP 8.5 (DRY) für die Innenstadt. Für beide Klima wird der obere Grenzwert von Fig. 3 eingehalten.

Abbildung 17 zeigt den Nachweis für den sommerlichen Komfort nach SIA 180:2014-Anhang C2 für das Klassenzimmer. Dies wird ebenfalls für beide Klimaszenarien untersucht. In beiden Fällen wird der obere Grenzwert von Fig. 3 überschritten und es ist eine maschinelle Kühlung erforderlich. Dies deckt sich mit den simulierten Ergebnissen die, bis auf zwei Varianten, ebenfalls den oberen Grenzwert von Fig. 3 überschreiten.

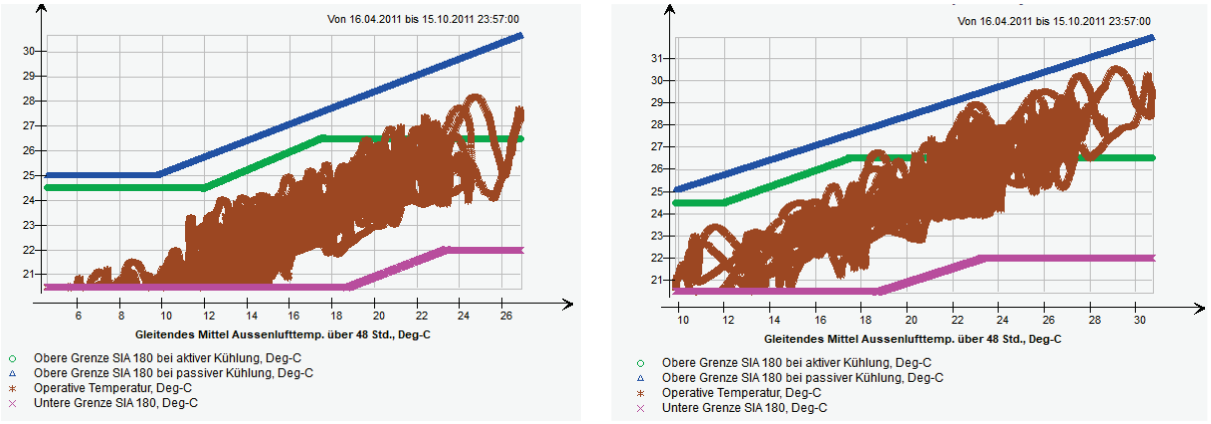


Abbildung 16 Baulicher Nachweis nach SIA 180:2014-Anhang C1 (links: Klima Basel-Binningen (normal), rechts: Klingenbergstrasse 2060 RCP 8.5 (DRY))

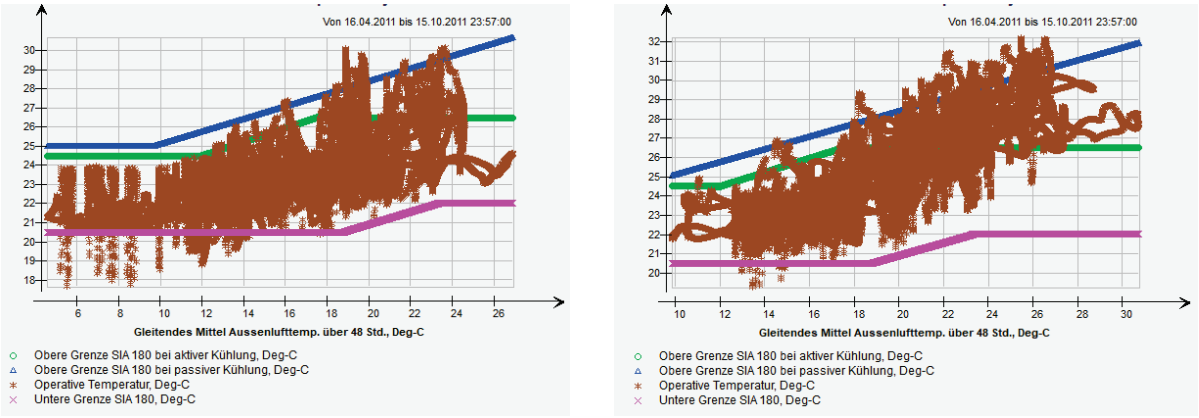


Abbildung 17 Nachweis des sommerlichen Komforts nach SIA 180:2014-Anhang C2 (links: Klima Basel-Binningen (normal), rechts: Basel Klingenbergstrasse 2060 RCP 8.5 (DRY))

Messwerte

Die Messauswertung der realen Klassen führt gegenüber der Simulation zu deutlich weniger Überschreitungsstunden der oberen Grenzwerte von Fig. 3 (Tabelle 7). Klasse 1 weist nur acht Stunden und Klasse 2 keine Überschreitung auf. Insgesamt werden in der Schule noch vier weitere Klassenzimmer, je zwei im ersten und vierten Obergeschoss, betrachtet. Von allen sechs Klassenzimmer überschreiten vier die obere Grenze gemäss Fig. 3, wobei nur zwischen 1-8 Überschreitungsstunden auftreten. Bevor eine maschinelle Kühlung umgesetzt wird, sollte geprüft werden, ob die geringe Anzahl an Überschreitungsstunden mit betrieblichen Massnahmen z.B. mit einer konsequenteren Lüftungsstrategie und Sonnenschutzbedienung reduziert werden kann [5].

Tabelle 7 Vergleich von realen Messwerten in zwei Klassenzimmern (#M1, #M2) aus dem 3. Obergeschoss und dem Basismodell (#0).

Nr.	Variante	θopr. max. °C	θopr. > 26 - ≤ 28 °C h	θopr. > 28 - ≤ 30 °C h	θopr. > 30 °C h	θopr. > 26 °C h	SIA 180 > GW Fig. 3 h
M1	Klasse 1 (Messwerte)	30.5	128	69	3	200	8
M2	Klasse 2 (Messwerte)	29.6	102	82	0	184	0
0	Basismodell	31.5	109	100	18	227	58

2.3.6. Fazit

Die Simulationen zeigen, dass mit Einzelvarianten gegenüber dem Basismodell die Raumlufttemperaturen gesenkt werden können. Die besten Einzelmassnahmen sind:

- konsequente Nachtlüftung mit grossen lichten Öffnungsflächen und langer Lüftungsdauer
- nördlich ausgerichtete Klassenzimmer und
- eine geringe Belegung (resp. grosszügige Zimmer)

Die Kombination aus verschiedensten Massnahmen führt zu einer weiteren deutlichen Reduktion der Raumlufttemperaturen. Zwei Massnahmenpakete, die jeweils eine konsequente Nachtlüftung mit grossen lichten Öffnungsflächen und langer Lüftungsdauer aufweisen, weisen keine Überschreitung der oberen Grenzwerte nach SIA 180:2014 Fig. 3 auf.

Die realen Messwerte der Klassenräume zeigen ein positiveres Bild, es gibt deutlich weniger Stunden mit Temperaturen > 30°C und nur sehr wenige Überschreitungsstunden von Fig. 3. An der Schule sollten daher erst betrieblichen Massnahmen konsequent umgesetzt werden, bevor eine mechanische Kühlung angedacht wird.

2.4 Behaglichkeit bei erhöhter Luftgeschwindigkeit

2.4.1. Theoretische Untersuchungen

Die Simulationen zeigen, dass passive Massnahmen Überschreitungen der oberen Grenzwerte nach SIA 180:2014 Fig. 3 nur in Kombination und bei konsequenter Nachtlüftung vollständig vermeiden. Wo dies nicht gelingt, kann eine erhöhte Luftgeschwindigkeit den Komfortbereich ohne Kühlung erweitern. Der Jahresbericht 2025 (Kap. 7: Kap. 2.5.3) stufte Deckenventilatoren als gering-investive Massnahme ein und schätzte die Komforterweiterung bei 0.6 - 0.8 m/s auf zwei bis drei Kelvin (Kap. 2.5.3 und Tabelle 9). Dieses Kapitel prüft die Einschätzung anhand von SN EN 16798-1 sowie PMV und PPD. Kapitel 2.4.2 dokumentiert erste Erfahrungen aus einer Testinstallation.

Obwohl die Behaglichkeit (thermischer Komfort) subjektiv ist, muss eine Form gefunden werden, wie die Behaglichkeit bewertet werden kann. Derjenige Raumzustand gilt als optimal, welcher von den meisten Nutzenden als komfortabel empfunden wird. Nach SIA 180:2014 wird gefordert, dass 90% der Benutzenden, unter der Voraussetzung einer für die Nutzung normalen Tätigkeit und saisongerechter Bekleidung, die Komfortbedingungen als behaglich empfinden. Im englischen Sprachraum wird dies unter dem Begriff **Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)** zusammengefasst. Das PPD beschreibt den voraussichtlichen Anteil unzufriedener Personen mit einer raumklimatischen Situation.

Mit dem **Predicted Mean Vote (PMV)** wird vorhergesagt, wie die durchschnittliche Beurteilung einer Gruppe von Personen auf eine raumklimatische Situation ausfällt. Das vorausgesagte mittlere PMV ist sowohl von den Einflüssen des Raumes (Luft- und Oberflächentemperaturen, Luftbewegung und Luftfeuchte) als auch des Menschen (körperliche Aktivität, Bekleidung) abhängig. Das PMV ist eine Zahl, die den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine grosse Personengruppe anhand einer 7-stufigen Klimabeurteilungsskala vorhersagt. Auch bei einem PMV-Index von 0 gibt es immer Personen, die unzufrieden sind.

Zusammenhang zwischen erwarteter durchschnittlicher Bewertung der Behaglichkeit und dem entsprechenden Prozentsatz unzufriedener Personen zeigt Abbildung 18. Man geht davon aus, dass auch im optimalen Raumzustand (PMV = 0) immer noch 5% der Personen (PPD = 5%) unzufrieden sind. SIA 180:2014 nennt Anforderungen für PMV und PPD.

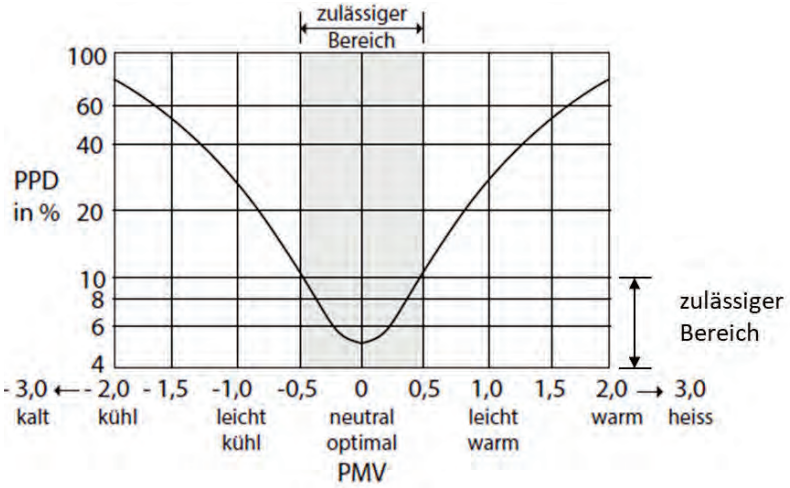


Abbildung 18 Zusammenhang zwischen PMV und PPD mit den Anforderungsbereichen für PMV zwischen -0.5 und +0.5 und PPD kleiner 10 % aus SIA 180:2014 (ergänzte Abbildung aus dem Arbeitsgesetz[1]).

[1] Arbeitsgesetz ArGV3_art16, www.seco.admin.ch

Bei hohen Lufttemperaturen beginnen Personen zu Schwitzen (Verdunstung über die Haut), um eine Überhitzung zu vermeiden. Mit einer erhöhten Luftzirkulation verbessert sich der Wärmeaustausch durch Konvektion und der Verdunstung zwischen den Personen der Umgebung und damit die Behaglichkeit. Es ist möglich, diesen Zusammenhang auch in Räumen zu nutzen, um höhere Raumlufttemperaturen noch als behaglich zu empfinden. Im Sommer kann die Behaglichkeit bei Raumlufttemperaturen > 25 °C mit einer künstlichen erhöhten Luftgeschwindigkeit, z.B. mit einem Ventilator, erhöht werden. Gemäss Tabelle 8 wird z.B. eine um 1.2 K erhöhte Raumlufttemperatur akzeptiert, wenn die mittlere Luftgeschwindigkeit 0.6 m/s beträgt. In der Anwendung bedeutet dies, dass z.B. eine Raumlufttemperatur von 28 °C gleich warm empfunden wird wie 26.8 °C.

Tabelle 8 Korrektur der Raumlufttemperatur für Räume, die mit Ventilatoren ausgerüstet sind und diese von den Personen beeinflusst werden können (SN EN 16788-1:12019).

Mittlere Luftgeschwindigkeit 0.6 m/s	Mittlere Luftgeschwindigkeit 0.9 m/s	Mittlere Luftgeschwindigkeit 1.2 m/s
1.2 K	1.8 K	2.2 K

Mit einem Excel-Tool[2] können PMV und PPD in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern berechnet werden. Es wird 1.2 met (leichte sitzende Tätigkeit) und 0.5 clo (angepasste Kleidung im Sommer) gemäss SIA 180:2014 für die Personen in einem Klassenzimmer angenommen. Untersucht werden die Wertepaare von Raumlufttemperatur und relativer Luftfeuchte gemäss[1]: 26 °C / 55 %, 28 °C / 50 % und 30 °C / 50 %. Die Strahlungstemperatur der Raumoberflächen wird gleich der Raumlufttemperatur gesetzt. Neben den genannten Luftgeschwindigkeiten aus Tabelle 8 wird zum Vergleich die Luftgeschwindigkeit von 0.18 m/s untersucht, welches die maximale Luftgeschwindigkeit bei mechanischer Lüftung und der Empfindlichkeitsstufe «mittel» entspricht[1]. Für natürlich belüftete Räume sind jedoch höhere Geschwindigkeiten erlaubt.

Aus den oben genannten Parametern und bei den jeweiligen Luftgeschwindigkeiten gemäss Tabelle 8 werden PMV und PPD für die erlaubte Raumlufttemperaturerhöhung berechnet. In Abbildung 19 ist der Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und PMV bzw. PPD in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit ohne bzw. mit Berücksichtigung eines Ventilators dargestellt. Ohne Ventilator bedeutet hier, dass die Personen keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit haben, z.B. bei geöffnetem Fenster.

Es zeigt sich, dass die Anforderungen gemäss SIA 180:2014 mit höheren Raumlufttemperaturen eingehalten werden, wenn eine erhöhte Luftgeschwindigkeit anliegt. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 1.2 m/s kann die Raumlufttemperatur 30.8 °C betragen und liegt noch innerhalb der Anforderung vom PMV bzw. 30.5 °C bei der Anforderung für PPD.

[2] https://www.academia.edu/4803866/SPREADSHEETS_FOR_THE_CALCULATION_OF_THERMAL_COMFORT_INDICES_PMV_AND_PPD

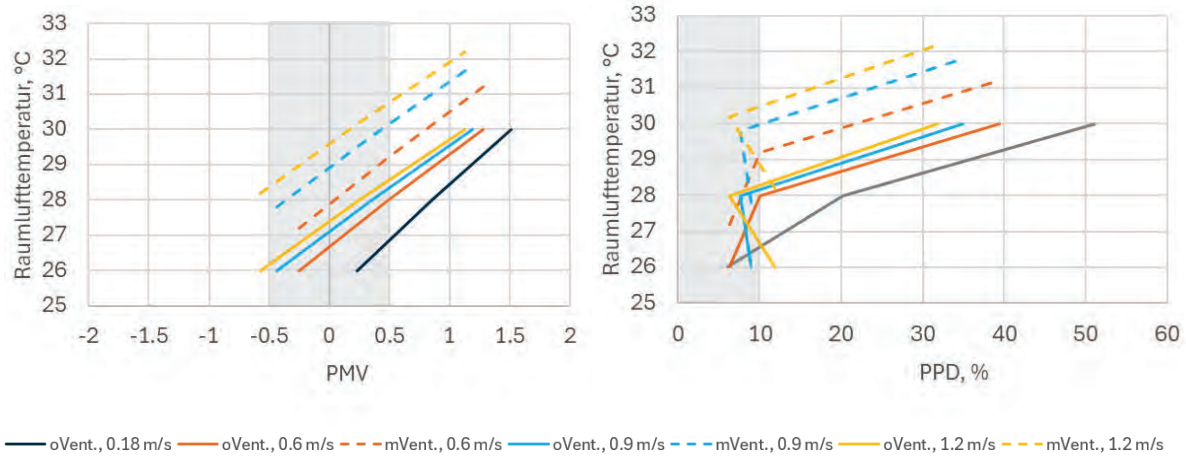


Abbildung 19 Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und PMV (links) bzw. PPD (rechts) in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit ohne Ventilator (durchgezogene Linien) und mit Ventilator (gestrichelte Linien) für 1.2 met und 0.5 clo. Grau eingezeichnet sind die Anforderungen gemäss SIA 180:2014.

Die zulässige Erhöhung der Raumtemperatur liegt bei 0.6 m/s mit 1.2 K unter der im Jahresbericht 2025 angenommenen Komforterweiterung von zwei bis drei Kelvin. Die untere Grenze dieses Bereichs wird erst bei Luftgeschwindigkeiten über 1 m/s erreicht (2.2 K bei 1.2 m/s, Tabelle 8). Für die Planung von Deckenventilatoren sind deshalb die am Sitzplatz erreichbare Luftgeschwindigkeit und die Geräuschanforderungen nach SIA 181:2020 gemeinsam nachzuweisen (Jahresbericht 2025, Kap. 7: Kap. 2.5.3). Die Einstufung der Deckenventilatoren im Massnahmenkatalog für Bestandsbauten wird entsprechend angepasst.

2.4.2.Praxiserfahrungen mit Deckenventilatoren

Im einem Basler Schulhaus wurden während der Sommerferien 2026 in vier Schulräumen testweise Deckenventilatoren installiert, um erste Erfahrungen mit dem Betrieb und vor allem der tatsächlichen Wirkung für die Nutzenden zu sammeln.

Die schriftlichen Rückmeldungen (mit Bewertung) der Nutzenden (Lehrpersonen und Schüler:innen) sind aktuell noch ausstehend.

Bei der Produktauswahl stehen vor allem die Kriterien zur Effizienz, Lärmbelastung und Gebrauchstauglichkeit im Vordergrund. Zudem sind weitere Punkte beim Thema der Montage wichtig, welche im Vorherein berücksichtigt werden müssen. Bei der Positionierung sind unter anderem die Art der Beleuchtung (linear, punktuell) und zusätzlicher Installationen (Beamer etc.) zu beachten. Eine reibungslose Funktion der elektrischen Geräte muss dabei gewährleistet sowie eine Störung des Unterrichts, beispielsweise durch flackerndes Licht, ausgeschlossen werden. Zur Montage im Bereich einer abgehängten Decke kann beim hier verwendeten Modell optional eine Teleskop-Unterkonstruktion ergänzt werden.

Pro Raum wird ein Deckenventilator Nordik Eco 180/70 Weiss mit einem Durchmesser von 1'800 mm eingesetzt (Abbildung 20).



Abbildung 20 Deckenventilator Nordik Eco 180/70, Durchmesser 1800 mm

Die Ventilatoren werden über einen fest installierten Schalter mit stufenlosem Geschwindigkeitsregler (POT R Potentiometer 0-10V) betrieben. Nebst der Drehrichtung sind verschiedene Geschwindigkeitsstufen wählbar.

Die Rückmeldungen der Lehrpersonen und der Schülerinnen und Schüler werden im Schlussbericht insbesondere hinsichtlich des wahrgenommenen Luftzugs, der Geräuschwahrnehmung und der Akzeptanz im Unterricht ausgewertet.

2.5 Varianten und THGE/Kosten

Kapitel 2.3 bis 2.4.2 bewerten die untersuchten Konzepte hinsichtlich des sommerlichen Komforts auf Ebene des einzelnen Klassenzimmers. Treibhausgasemissionen und Kosten werden dagegen auf Gebäudeebene und über den Lebenszyklus betrachtet, da insbesondere Raumhöhe, Lüftungszentrale, Steigschächte und Wärmeerzeugung das Gesamtgebäude betreffen.

Die Arbeitspakete AP 6 und AP 7 übertragen die untersuchten Lüftungs- und Kühlkonzepte auf das ganze Gebäude. AP 6 verwendet ein idealisiertes Modell des in Kapitel 2.2 beschriebenen Trakts A der Primarschule Wasgenring. Die Varianten umfassen neben dem Low-Tech-Konzept mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, unterschiedliche Konzepte der Nachtauskühlung, Teilklimatisierung sowie Geocooling. Die Varianten und Fassaden sind mit der Kostenanalyse abgestimmt; die verwendeten Gebäudegeometrien unterscheiden sich jedoch geringfügig.

2.5.1. Untersuchte Varianten

In den Arbeitspaketen 6 (Treibhausgasemissionen) und 7 (Kosten) werden dieselben Varianten für Lüftung, Nachtauskühlung und Kühlung von Klassenzimmern untersucht (Tabelle 9). Sie umfassen Fensterlüftung mit Lüftungsflügeln als Low-Tech-Konzept, mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung und unterschiedlichen Konzepten der Nachtauskühlung sowie eine Teilklimatisierung mit reversibler Wärmepumpe.

Alle Varianten weisen eine vergleichbare Verglasungsfläche von rund 20 % der Bodenfläche beziehungsweise 12.0 m² je Klassenzimmer, einen aussenliegenden Sonnenschutz mit witterungsgestützter Steuerung und eine Wärmeabgabe über Fussbodenheizung auf. Die Wärmeversorgung erfolgt analog zur Kostenanalyse primär über eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Erdwärmesonden. Für V1 und V2a wird zusätzlich eine Versorgung mit Fernwärme bilanziert.

Tabelle 9: Untersuchte Varianten

Variante	Lüftung	Nachtauskühlung	Kühlung	Wärmeerzeugung	Raumhöhe
V1 Low-Tech	Fensterlüftung, Lüftungsflügel (wirksamer Querschnitt 5 % der Bodenfläche), CO_2-Ampel	Lüftungsflügel, manuell	keine	WP oder FW	4.0 m (3.5 m)
V2a	zentral mit WRG, 29 m³/(h·P); Fenster mit Kipp-Oberlichtern	Oberlichter motorisch, Abluft über die Anlage	keine; Variante: Geocooling über Erdsonden	WP oder FW	3.0 m
V2b	zentral mit WRG, 29 m³/(h·P)	über die Lüftungsanlage (Zu- und Abluft)	keine	WP	3.0 m
V2c	zentral mit WRG, 29 m³/(h·P), zusätzlich Lüftungsflügel	Lüftungsflügel, manuell	keine	WP	3.5 m
V3 Teilklima	Teilklimaanlage mit WRG, Lufterhitzer und Luftkühler, 29 m³/(h·P); Fenster mit Kipp-Oberlichtern	über die Lüftungsanlage und die Fussbodenkühlung	reversible WP (70 % Geocooling), Luftkühler und Fussbodenkühlung	WP	3.0 m

Die Lüftungsflügel sind opake, gedämmte Fassadenöffnungen mit aussenliegendem Wetterschutzgitter. Sie sind so dimensioniert, dass die wirksame Öffnungsfläche für die natürliche Auskühlung 5 % der Bodenfläche beträgt [7]. Bei einem Klassenzimmer mit 60 m² Bodenfläche entspricht dies rund 3.0 m².

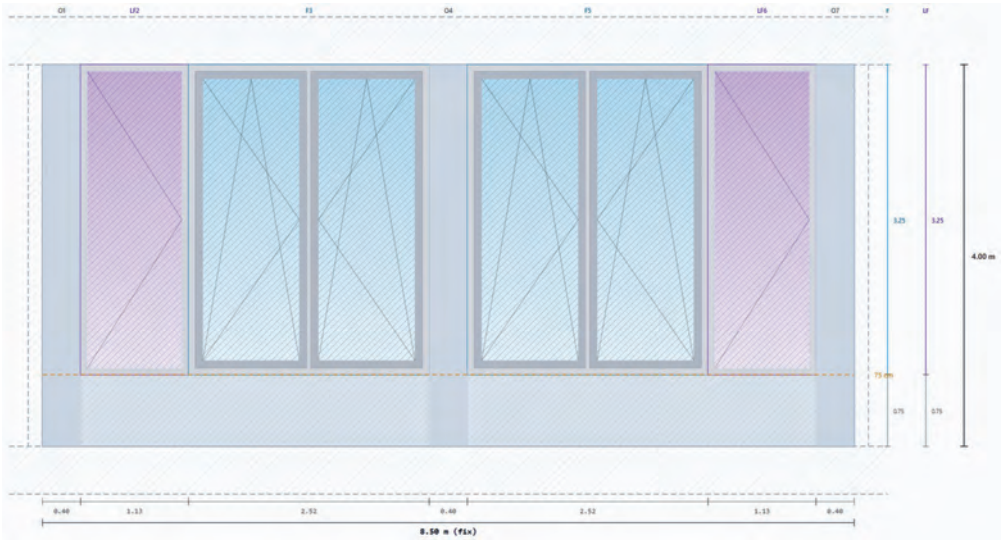
Bei einer Verglasungsfläche von rund 20 % der Bodenfläche lässt sich die erforderliche Öffnungsfläche neben den Fenstern einer 8.5 m breiten Fassade erst ab einer lichten Raumhöhe von etwa 3.5 m unterbringen. Für V1 werden 4.0 m angesetzt. Das grössere Raumvolumen von 240 gegenüber 210 m³ bei 3.5 m Raumhöhe verlangsamt bei Fensterlüftung den Anstieg der CO_2-Konzentration zwischen den Lüftungsintervallen. Eine Raumhöhe von 3.5 m wird deshalb zusätzlich als Variante untersucht. V2c mit Lüftungsflügeln wird mit 3.5 m, V2a, V2b und V3 ohne Lüftungsflügel werden mit 3.0 m Raumhöhe bilanziert.

Bei V2a und V3 umfasst die Fassade zusätzlich insgesamt sechs Kipp-Oberlichter über den Dreh-Kipp- und Festflügeln. Deren wirksame Öffnungsfläche beträgt rund 0.6 m² je Klassenzimmer beziehungsweise etwa 1 % der Bodenfläche und reicht allein nicht für die Nachtauskühlung aus.

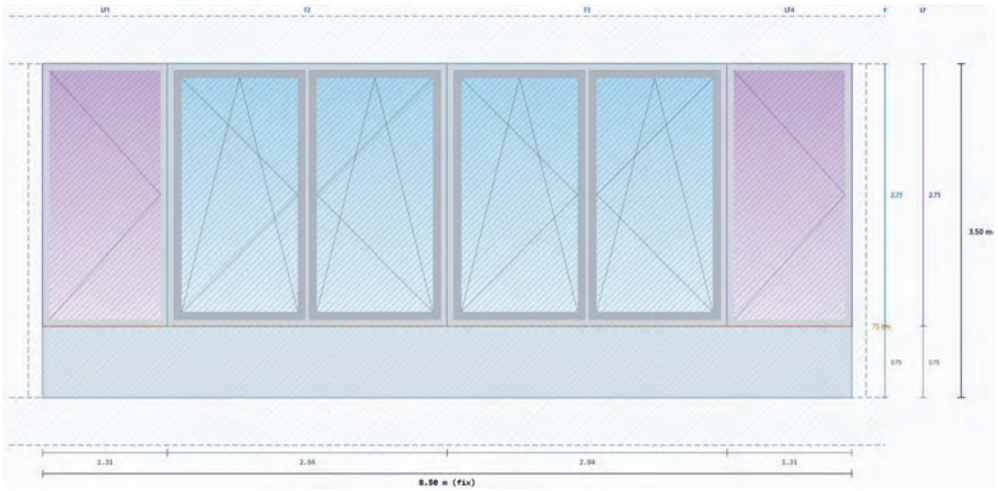
Bei V2a werden deshalb die sechs Oberlichter sowie ein Tür-Oberlicht motorisch geöffnet; gleichzeitig führt die Lüftungsanlage Abluft ab. V2b nutzt nachts die mechanische Zu- und Abluftanlage. Bei V3 erfolgt die nächtliche Wärmeabfuhr über die Lüftungsanlage und die Fussbodenkühlung; die Oberlichter sind manuell bedienbar.

Durch die Oberlichter vergrössert sich die gesamte Fensteröffnung gegenüber V2b von 17.1 auf 19.1 m² je Klassenzimmer, während die Verglasungsfläche nahezu unverändert bleibt. Der Glasanteil innerhalb der Fensterfläche sinkt dadurch von 71 auf 63 %. Abbildung 21 zeigt die untersuchten Fassadenvarianten.

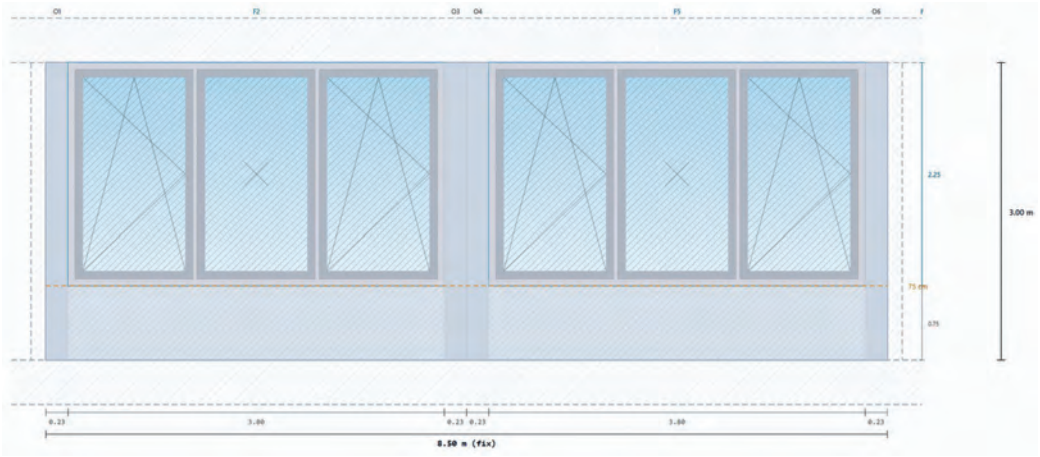
a) V1 Low-Tech, Raumhöhe 4.00 m, Lüftungsflügel



b) V1 Low-Tech und V2c WRG, Raumhöhe 3.50 m, Lüftungsflügel



c) V2b WRG, Raumhöhe 3.00 m, ohne Oberlichter



d) V2a WRG und V3, Raumhöhe 3.00 m, Kipp-Oberlichter

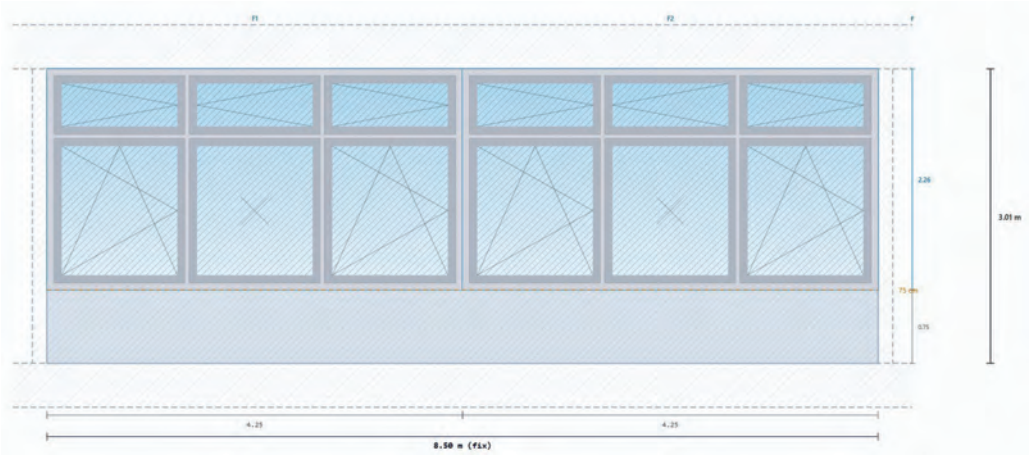


Abbildung 21 Fassadenausschnitt eines Klassenzimmers (Breite 8.50 m) in Innenansicht, a) V1 Low-Tech, lichte Raumhöhe 4.0 m; b) V1 V2c mit 3.5 m, c) V2b, 3.0 m; d) V2a und V3, 3.0 m mit Kipp-Oberlichtern. Blau: Fenster mit Dreh-Kipp-, Fest- und Kippflügeln; violett: opake Lüftungsflügel mit Wetterschutzgitter; Brüstungshöhe 0.75 m. Verglasung jeweils rund 12.0 m² (20 % der Bodenfläche), wirksame Öffnungsfläche der Lüftungsflügel 3.1 m² (5 %). Fassadenkonfigurator PCSchool V2.8.1, eigene Darstellung.

Die Treibhausgasbilanz basiert auf einem idealisierten Gebäudemodell des Trakts A der Primarschule Wasgenring in Basel. Das Modell umfasst eine Grundfläche von 35.5 × 23.0 m, ein Untergeschoss und vier oberirdische Geschosse sowie 32 Klassenzimmer mit jeweils 8.5 × 7.1 m, die um eine Mittelhalle angeordnet sind. Die Energiebezugsfläche beträgt 3'946 m².

Die Variation der lichten Raumhöhe wird auf das gesamte Gebäude übertragen. Bei Varianten ohne mechanische Lüftung entfallen Lüftungszentrale und Steigschächte. Das Untergeschoss kann entsprechend kleiner dimensioniert werden. Als Standardbauweise wird eine Holz-Hybrid-Konstruktion über einem Untergeschoss aus Stahlbeton angesetzt. Eine vollständige Stahlbetonbauweise wird als Sensitivität untersucht.

Varianten und Fassaden entsprechen der Kostenanalyse. Die Gebäudegeometrien von AP 6 und AP 7 sind nicht identisch und werden im weiteren Projektverlauf angeglichen. Die THGE-Bilanz leitet die

Mengen aus der idealisierten Geometrie des Trakts A ab. Je nach Raumhöhe ergeben sich rund 3'620 bis 3'710 m² Nettogeschossfläche, Fassadenflächen von rund 2'190 m² bei 4.0 m beziehungsweise 1'720 m² bei 3.0 m Raumhöhe sowie Innenwandflächen von rund 2'570 beziehungsweise 2'030 m². Die Unterschiede zwischen den Varianten werden innerhalb der beiden Arbeitspakete jeweils konsistent abgebildet. Absolute Mengen und Flächen von AP 6 und AP 7 sind jedoch nicht unmittelbar vergleichbar.

2.5.2. Treibhausgasemissionen

Im Arbeitspaket 6 werden die Treibhausgasemissionen der Varianten für Erstellung und Betrieb über eine Betrachtungszeit von 60 Jahren gemäss SIA 390/1:2025 [8] und SIA 2032:2020 [9]. Als Datengrundlage dienen die KBOB-Ökobilanzdaten im Baubereich, Version 9.0 [10].

Hierfür wurde im Projekt ein Excel-basierter THG-Rechner entwickelt. Er bilanziert ein Klassenzimmer einschliesslich Fassade, Lüftungsflügeln, Innenausbau und Gebäudetechnik und ergänzt die übrigen Gebäudeflächen wie Halle, Treppenräume, Nebenräume und Untergeschoss. Die Ergebnisse werden in kg CO_2-eq/(m² EBF·a) angegeben. Die Berechnungslogik wurde mit der Rechenhilfe zur SIA 390/1 verglichen.

Die Erstellungsbilanz umfasst Baukonstruktion, Lüftungsflügel, Gebäudetechnik mit Lüftung, Wärmeerzeugung und -verteilung, Kälteanlagen, Elektro- und Sanitäranlagen sowie Gebäudeautomation und Photovoltaikanlage. Für den Betrieb werden Heizwärme, Warmwasser, Lüftungsstrom, Kühlung, Beleuchtung und Geräte bilanziert.

Der Heizwärmebedarf wird mit einer vereinfachten Monatsbilanz nach SIA 380/1:2016[11] berechnet. Fenster- und Verglasungsflächen werden aus dem Fassadenkonfigurator übernommen. Für Wärmebrücken wird ein Zuschlag von 20 % auf die Transmissionsverluste angesetzt. Für den Betrieb werden ein THG-Emissionsfaktor des Schweizer Strom-Verbrauchermixes von 0.125 kg CO_2-eq/kWh, eine Jahresarbeitszahl der Sole/Wasser-Wärmepumpe von 4.3 und für die Fernwärme Basel ein Faktor von 0.092 kg CO_2-eq/kWh für den IWB-Mix 2024 [12] angesetzt.

Die mechanische Lüftung ist gemäss SIA 2024:2021 auf einen Aussenluftvolumenstrom von 29 m³/(h·Person) ausgelegt [13].

Bei der angenommenen Belegung von 3 m² Nettogeschossfläche pro Person ergibt sich für ein 60-m²-Klassenzimmer ein Volumenstrom von 580 m³/h. Der Wärmerückgewinnungsgrad wird mit 75 % angesetzt.

Im Nachweisfall gilt für Fenster- und mechanische Lüftung der Standardnutzungswert nach SIA 380/1:2016 von 0.7 m³/(h·m² EBF). Bei mechanischer Lüftung wird die Wärmerückgewinnung auf diesen Aussenluftanteil angerechnet, nicht jedoch auf die Infiltration von 0.15 m³/(h·m²). Daraus resultiert eine thermisch wirksame Aussenluftmenge von 0.33 m³/(h·m²). Der Standardnutzungswert stellt einen Mittelwert über das gesamte Gebäude und alle Stunden des Jahres dar. Bei 1'600 Belegungsstunden pro Jahr, ausschliesslicher Infiltration ausserhalb der Belegung und 0.5 m³/(h·m²) Aussenluft für die übrigen Flächen während der Belegung entspricht er in den Klassenzimmern rund 18 m³/(h·Person). Bei 1'460 Belegungsstunden oder ohne Aussenluftansatz für die übrigen Flächen ergeben sich rund 20 m³/(h·Person).

CO_2-Messungen in zwei Klassenzimmern des Schulhauses Wasgenring mit überwiegend 1'500 bis 2'000 ppm im Sommer und bis zu 2'500 ppm im Winter entsprechen nach einer stationären CO_2-Bilanz mit 15 bis 19 l/h CO_2 pro Person und 420 ppm Aussenluft einem geschätzten Aussenluftvolumenstrom von rund 10 bis 15 m³/(h·Person). Im Winter liegt er zeitweise darunter. Da weder Belegung noch Fensterstellung erfasst wurden, sind diese Werte als Abschätzung zu interpretieren.

Neben dem Nachweis werden zwei weitere Fälle ausgewertet. Für den «realen Betrieb» wird die mechanische Lüftung mit ihrer Auslegungsluftmenge von 580 m³/h je Klassenzimmer angesetzt, während

für die Fensterlüftung der Standardnutzungswert verwendet wird. Im Vergleichsfall «gleiche Aussenluftrate» werden für beide Lüftungsarten 29 m³/(h·Person) angesetzt. Eine gleiche Raumluftqualität wird damit nur näherungsweise abgebildet, da Fensterlüftung intermittierend erfolgt und damit höhere CO_2-Spitzen auftreten können. Zudem ist ein mittlerer Volumenstrom von 29 m³/(h·Person) über Fenster insbesondere im Winter nur eingeschränkt erreichbar.

Der Aufwand für die Nachtauskühlung wird in der THGE-Bilanz berücksichtigt. Bei V1 und V2c betrifft dies die Lüftungsflügel. Bei V2a werden sechs motorisierte Kipp-Oberlichter und ein motorisiertes Tür-Oberlicht je Klassenzimmer sowie der Strombedarf des Abluftbetriebs der Lüftungsanlage während 480 h/a mit rund halber Ventilatorleistung bilanziert. V2b nutzt während 480 h/a Zu- und Abluft. Bei V3 ist der Nachtbetrieb in den 1'800 jährlichen Betriebsstunden der Lüftungsanlage enthalten.

Die Kühlung der Varianten V2a mit Geocooling und V3 wird sowohl in der Erstellung als auch im Betrieb berücksichtigt. Da die KBOB-Liste keine spezifischen Datensätze für Kälteanlagen enthält, werden die relevanten Komponenten überschläglich bilanziert. Für Geocooling sind dies Plattenwärmetauscher, Umwälzpumpe, Umschaltventile und Regelung. Bei V3 kommen die zusätzliche Kältemittelfüllung der reversiblen Wärmepumpe sowie Luftkühler- und Lufterhitzerregister hinzu.

Die Kälteabgabe erfolgt über die Fussbodenheizung beziehungsweise Fussbodenkühlung, deren Erstellung bereits in der Wärmeverteilung enthalten ist. Wärmepumpe und Erdwärmesonden werden entsprechend der Kostenanalyse auf die Heizleistung dimensioniert.

Für den Betrieb wird ein Klimakältebedarf der Klassenzimmer von 5.9 kWh/(m²·a) angesetzt. Für Geocooling wird eine Arbeitszahl von 15, für aktive Kühlung mit der reversiblen Wärmepumpe eine Arbeitszahl von 4 verwendet. Bei V3 werden 70 % des Kältebedarfs durch Geocooling gedeckt. Zusätzlich werden Kältemittelverluste von 2 % pro Jahr berücksichtigt. Entsprechend der Kostenanalyse werden nur die Klassenzimmer gekühlt. Erstellung und Betrieb der Kühlung verursachen auf Gebäudeebene zusammen rund 0.05 kg CO_2-eq/(m²·a) bei Geocooling und 0.09 kg CO_2-eq/(m²·a) bei V3.

Die Gebäudetechnik wird mit einem Komponentenmodell überschläglich bilanziert. Die Anlagen werden je Klassenzimmer dimensioniert. Die Umweltkennwerte stammen aus der KBOB-Liste, Umweltproduktdeklarationen und der Literatur. Die Ergebnisse werden zusätzlich mit KBOB-Pauschalen verglichen.

Da für Elektro- und Sanitäranlagen keine schulbezogenen Datensätze vorliegen, werden entsprechend Minergie-Eco [14] die Pauschalen verwendet. Die Gebäudeautomation umfasst Wetterstation und Sonnenschutzsteuerung, bei Fensterlüftung zusätzlich CO_2-Ampeln sowie bei V2a die Steuerung der Oberlichter. Diese Komponenten sind in den verwendeten KBOB-Pauschalen nicht enthalten und werden anhand von EPD ergänzt. Ihr Beitrag liegt unter 0.01 kg CO_2-eq/(m²·a).

Die Kennwerte der Lüftungsanlage wurden anhand von Literaturdaten plausibilisiert. Aus den Daten von Bionda et al. [15] und der mit zunehmender Anlagengrösse abnehmenden spezifischen Gerätemasse gemäss EPD von Lüftungsgeräten [16] ergibt sich für das Komponentenmodell ein Wert von rund 1.7 kg CO_2-eq/(m²·a), bezogen auf die EBF des Klassenzimmers. Die auf 8.7 m³/(h·m²) extrapolierte KBOB-Pauschale beträgt rund 1.8 kg CO_2-eq/(m²·a). Auf Gebäudeebene unterscheiden sich Komponentenmodell und Pauschale um höchstens 0.09 kg CO_2-eq/(m²·a).

Ergebnisse

Die untersuchten Varianten weisen Treibhausgasemissionen von 9.4 bis 11.2 kg CO_2-eq/(m²·a) auf Abbildung 22, Tabelle 10). Bei gleicher Wärmeerzeugung unterscheiden sich die Varianten vergleichsweise wenig. Mit Wärmepumpe liegen die Treibhausgasemissionen von V1 Low-Tech um 0.8 kg CO_2-eq/(m²·a) unter V2b mit Nachtauskühlung über die Lüftungsanlage, um jeweils rund 1.1 unter V2a mit Oberlichtern und V2c mit Lüftungsflügeln sowie um 1.0 unter V3 mit Teilklimatisierung. Geocooling erhöht die THGE von V2a um rund 0.05 kg CO_2-eq/(m²·a).

Bei Fernwärme liegen die THGE von V1 um rund 0.5 kg CO_2-eq/(m²·a) unter V2a. Eine Reduktion der Raumhöhe von V1 von 4.0 auf 3.5 m vermindert die THGE um rund 0.2 kg CO_2-eq/(m²·a).

Unter den mechanisch belüfteten Varianten weist V2b die niedrigsten THGE auf. V3 liegt trotz zusätzlicher Kühlung rund 0.1 kg CO_2-eq/(m²·a) unter V2a. Ursache sind vor allem die motorischen

Oberlichtantriebe von V2a mit einem Beitrag von rund 0.15 kg CO_2-eq/(m²·a), während die Kühlung von V3 insgesamt nur rund 0.09 kg CO_2-eq/(m²·a) beiträgt.

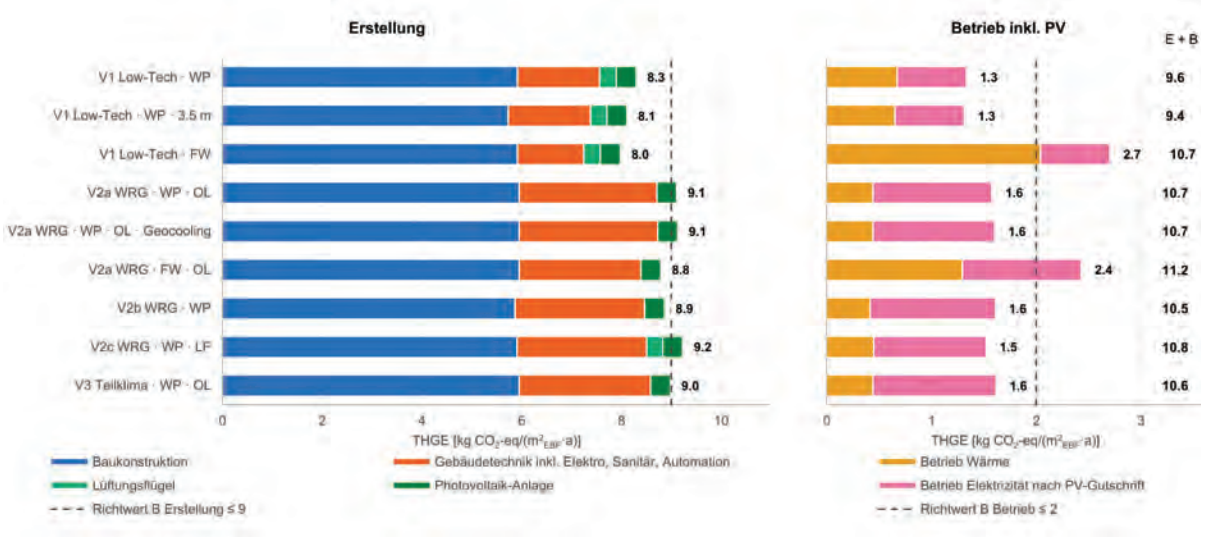


Abbildung 22: Treibhausgasemissionen der Varianten im Schulhaus (Holz-Hybrid, Fernwärme IWB-Mix 2024). Erstellung und Betrieb mit den Richtwerten B der SIA 390/1:2025, rechts die Summe Erstellung + Betrieb, in kg CO_2-eq je m² A_E und Jahr.

Tabelle 10: Treibhausgasemissionen der Varianten im Schulhaus in kg CO_2-eq je m² A_E und Jahr (Holz-Hybrid, Fernwärme IWB-Mix 2024, PV 44 kWp); Erstellung und Betrieb im Nachweis, im realen Betrieb und in Stahlbetonbauweise

Variante	Raumhöhe	Erstellung	Betrieb	E + B	E + B realer Betrieb	E + B gleiche Aussenluftrate	E + B Stahlbeton
		[kgCO_2-eq/(m²a)]					
V1 Low-Tech · WP	4.0 m	8.3	1.3	**9.6**	9.6	9.8	11.1
V1 Low-Tech · WP · 3.5 m	3.5 m	8.1	1.3	**9.4**	9.4	9.6	10.8
V1 Low-Tech · FW	4.0 m	8.0	2.7	**10.7**	10.7	11.3	12.3
V2a WRG · WP · OL	3.0 m	9.1	1.6	**10.7**	10.7	10.7	12.0
V2a WRG · WP · OL · Geocooling	3.0 m	9.1	1.6	**10.7**	10.7	10.7	12.1
V2a WRG · FW · OL	3.0 m	8.8	2.4	**11.2**	11.3	11.3	12.6
V2b WRG · WP	3.0 m	8.9	1.6	**10.5**	10.5	10.5	11.8
V2c WRG · WP · LF	3.5 m	9.2	1.5	**10.7**	10.8	10.8	12.1
V3 Teilklima · WP · OL	3.0 m	9.0	1.6	**10.6**	10.6	10.6	11.9

– **Erstellung:** Die Erstellung verursacht je nach Variante 75 bis 86 % der gesamten THGE. Die Baukonstruktion liegt mit 5.7 bis 6.0 kg CO_2-eq/(m²·a) in allen Varianten in einem vergleichsweise engen Bereich. Die zusätzlichen Fassaden- und Innenwandflächen der höheren Low-Tech-Räume kompensieren den konstruktiven Mehraufwand für Lüftungszentrale und Steigschächte der mechanisch belüfteten Varianten weitgehend.

  Die grösseren Fensterflächen der Oberlichtfassaden erhöhen die Erstellung von V2a und V3 geringfügig. Die Lüftungsflügel verursachen 0.33 kg CO_2-eq/(m²·a), die mechanische

Lüftungsanlage rund 0.95 kg CO_2-eq/(m²·a). Bei V2a steigt dieser Wert einschliesslich der Antriebe der Oberlichter auf rund 1.10 kg CO_2-eq/(m²·a).

– **Betrieb:** V1 Low-Tech weist einen 1.9- bis 2.2-mal höheren Heizwärmebedarf als die Varianten mit mechanischer Lüftung und Wärmerückgewinnung auf. Der Heizwärmebedarf beträgt 16.3 kWh/(m²·a) gegenüber 7.4 bis 8.6 kWh/(m²·a). Die Oberlichtfassade liegt aufgrund ihrer grösseren Fensterfläche mit 8.3 kWh/(m²·a) über V2b mit 7.4 kWh/(m²·a).

  Dem geringeren Heizwärmebedarf der mechanisch belüfteten Varianten steht deren Ventilatorstrom gegenüber. Bei Wärmepumpenversorgung liegen die betriebsbedingten THGE der untersuchten Varianten zwischen 1.3 und 1.6 kg CO_2-eq/(m²·a). Bei Fernwärme betragen sie 2.4 bis 2.7 kg CO_2-eq/(m²·a); der Wärmebedarf bestimmt hier den grössten Anteil.

– **Bauweise:** Die Stahlbetonbauweise erhöht die gesamten THGE gegenüber der Holz-Hybrid-Bauweise je nach Variante um 1.3 bis 1.6 kg CO_2-eq/(m²·a). Der Unterschied entsteht überwiegend in der Erstellung und ist insbesondere auf Decken und Fassaden zurückzuführen.

Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Wirkung ausgewählter Einzelparameter auf die gesamten THGE gegenüber dem jeweiligen Basisfall (Tabelle 11).

Tabelle 11: Wirkung ausgewählter Parameter auf die Treibhausgasemissionen des Schulhauses gegenüber der Basisvariante, in kg CO_2-eq je m² A_E und Jahr

Parameter	V1 Low-Tech · WP	V2a WRG · WP · OL
	[kgCO_2-eq/(m²a)]	
Basis (E + B, Nachweis)	9.63	10.68
Realer Betrieb (Anlage mit 29 m³/(h·P))	–	+0.01
Fensterlüftung wie gemessen 12 / 15 m³/(h·P)	−0.09 / −0.05	–
Gleiche Aussenluftrate (auch Fensterlüftung 29 m³/(h·P))	+0.20	+0.01
Stahlbeton statt Holz-Hybrid	+1.50	+1.34
Fernwärme IWB-Mix 2024 (0.092) statt Wärmepumpe	+1.05	+0.53
Fernwärme IWB-Pfad, Mittel über 60 a (0.025) statt Wärmepumpe	−0.34	−0.31
Strom 0.020 kg CO_2-eq/kWh (Zielwert 2050)	−1.12	−1.32
Raumhöhe 3.5 m statt 4.0 m	−0.21	–
Wärmebrückenzuschlag 10 / 30 % (statt 20 %)	−0.05 / +0.05	−0.04 / +0.04
Nachtauskühlung V2a nur über Oberlichter / mit Zu- und Abluft	–	−0.06 / +0.06
Geocooling (Klimakältebedarf 5.9 kWh/(m²·a))	–	+0.05
Belegung nach SIA 2024 (rund 15 statt 20 Personen, 422 m³/h)	–	−0.34
Ventilatoren SFP 1.0 / 2.0 kW/(m³/s)	–	−0.16 / +0.16
Material der Lüftungsflügel (Füllung, Gitter)	−0.15 bis +0.17	–

Luftmenge

Im Vergleich die THGE von V1 Low-Tech mit Wärmepumpe gegenüber V2a je nach angesetzter Fensterlüftung um rund 1.1 kg CO_2-eq/(m²·a) bei Standardnutzung und um rund 1.2 kg CO_2-eq/(m²·a) bei der aus den Messungen abgeleiteten Luftmenge niedriger. Bei Fernwärme beträgt die Differenz rund 0.6 bis 0.9 kg CO_2-eq/(m²·a).

Wird für die Fensterlüftung dieselbe Aussenluftrate von 29 m³/(h·Person) wie für die mechanische Lüftung angesetzt, steigt der Heizwärmebedarf von V1 auf rund 23 kWh/(m²·a). Mit Wärmepumpe bleiben die THGE von V1 dennoch rund 0.9 kg CO_2-eq/(m²·a) unter V2a.

Bei Fernwärme mit dem IWB-Mix 2024 kehrt sich das Verhältnis dagegen um. V1 erreicht bei gleicher Aussenluftrate 11.3 gegenüber 11.3 kg CO_2-eq/(m²·a) für V2a und liegt damit rund 0.1 kg CO_2-eq/(m²·a)

höher. Unterhalb eines Fernwärmefaktors von rund 0.085 kg CO_2-eq/kWh weist V1 wieder niedrigere THGE auf.

Aufgrund der Wärmerückgewinnung reagieren die THGE der mechanischen Lüftung nur schwach auf Änderungen der Aussenluftmenge. Bei Fernwärme wird der Vergleich zwischen Low-Tech und mechanischer Lüftung deshalb wesentlich durch die für die Fensterlüftung angesetzte Aussenluftrate bestimmt. Bei Wärmepumpenversorgung ist der Einfluss deutlich geringer.

Energieversorgung und Bauweise

Mit dem heute angesetzten IWB-Fernwärmemix weist die Wärmepumpe in beiden direkt vergleichbaren Varianten niedrigere THGE auf. Der Unterschied beträgt bei V1 rund 1.0 kg CO_2-eq/(m²·a) und bei V2a rund 0.5 kg CO_2-eq/(m²·a). Aufgrund des höheren Heizwärmebedarfs reagiert V1 stärker auf den THG-Faktor der Wärmeversorgung.

Für den IWB-Absenkpfad mit 100 % erneuerbarer Fernwärme ab 2036 ergibt sich über die Betrachtungszeit von 60 Jahren ein mittlerer THG-Faktor von 0.025 kg CO_2-eq/kWh. Unter dieser Annahme liegen die THGE der Fernwärmevarianten sowohl bei V1 als auch bei V2a rund 0.3 kg CO_2-eq/(m²·a) unter den entsprechenden Wärmepumpenvarianten.

Ein sinkender Strom-THG-Faktor reduziert insbesondere die Emissionen der Varianten mit Wärmepumpe und mechanischer Lüftung. Die Wahl der Bauweise wirkt sich bei allen Konzepten in ähnlicher Grössenordnung aus. Änderungen am Material der Lüftungsflügel, an der Gebäudeautomation oder am Rechenansatz für die Lüftungsanlage beeinflussen das Gesamtergebnis deutlich weniger.

Zwischenfazit und weiteres Vorgehen

Bei gleicher Wärmeerzeugung beträgt die Spannweite zwischen V1 Low-Tech und den untersuchten mechanisch belüfteten Varianten 0.8 bis 1.1 kg CO_2-eq/(m²·a). Der Einfluss der Bauweise ist mit 1.3 bis 1.6 kg CO_2-eq/(m²·a) grösser. Auch die Wahl und der zukünftige THG-Faktor der Energieversorgung beeinflussen den Variantenvergleich wesentlich.

Bei gleicher Wärmeerzeugung weist V1 Low-Tech mit Standardluftwechselraten und unter den angesetzten Bedingungen des realen Betriebs die niedrigsten THGE der untersuchten Varianten auf. Unter den mechanisch belüfteten Varianten weist V2b mit Nachtauskühlung über die Lüftungsanlage die niedrigsten THGE auf. Die Oberlichtfassade von V2a und die Lüftungsflügel von V2c erhöhen die Emissionen gegenüber V2b durch zusätzliche Fensterflächen und Antriebe beziehungsweise durch die grössere Raumhöhe und die Lüftungsflügel.

Wird bei Fernwärme für die Fensterlüftung dieselbe Aussenluftrate wie für die mechanische Lüftung angesetzt, liegen die THGE von V1 dagegen geringfügig über V2a. Die funktionale Vergleichsbasis für die Luftqualität ist deshalb insbesondere für den Vergleich der fernwärmeversorgten Varianten relevant.

In Holz-Hybrid-Bauweise erfüllen alle untersuchten Varianten mit Ausnahme von V2a mit Fernwärme die Zusatzanforderung B nach SIA 390/1:2025.

Im weiteren Projektverlauf werden

- die funktionale Vergleichsbasis für die Raumluftqualität beziehungsweise Aussenluftrate der Fensterlüftung festgelegt und mit den Simulationen abgeglichen,
- die Bezugsgrössen von AP 6 und AP 7, insbesondere Gebäudeflächen, Raumhöhen und Heizwärmebedarf der Varianten, weiter harmonisiert,
- Varianten für Bestandsgebäude definiert und bilanziert und
- die Ergebnisse in die Planungshilfe des AP 8 überführt.

2.5.3.Kostenanalyse

Im Rahmen des Arbeitspakets 7 werden die untersuchten Varianten hinsichtlich ihrer Kosten vergleichend bewertet. Ziel ist nicht die Erstellung eines projektbezogenen Kostenvoranschlags, sondern eine Gegenüberstellung der für den Variantenentscheid relevanten Investitions- und Betriebskosten. Die Kostenbetrachtung ergänzt damit die energetische und ökologische Bewertung und bildet eine Grundlage für die spätere Gesamtbewertung der Varianten.

Für die Kostenbetrachtung wird ein Referenzschulhaus mit einem Referenzklassenzimmer als gemeinsame Bezugsgrösse definiert. Die Dimensionierung zentraler gebäudetechnischer Anlagen erfolgt auf Ebene des Referenzschulhauses. Für die vergleichende Darstellung werden die entsprechenden Kosten zusätzlich anteilig auf ein Referenzklassenzimmer umgelegt. Damit können die Kostenauswirkungen der unterschiedlichen technischen Konzepte auf einer einheitlichen Bezugsgrösse dargestellt werden.

Die Systemgrenze umfasst die für den Variantenvergleich relevanten gebäudetechnischen Anlagen. Berücksichtigt werden insbesondere Wärme- und Kälteerzeugung, Wärme- und Kälteverteilung und -abgabe, Lüftung sowie Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Ergänzend werden Bauteile wie Lüftungsflügel berücksichtigt, sofern sich aus der jeweiligen Variante wesentliche kostenrelevante Unterschiede ergeben.

Zudem werden die Mehrkosten berücksichtigt, die sich bei Variante 1 aus der Erhöhung der Raumhöhe von 3 m auf 4 m ergeben. Ein möglicher Einfluss der grösseren Raumhöhe auf die Anzahl realisierbarer Geschosse bzw. auf die Nutzfläche wird im Rahmen der Kostenbetrachtung hingegen nicht berücksichtigt. Kostenpositionen, die bei allen Varianten in vergleichbarer Höhe anfallen, stehen ebenfalls nicht im Fokus der Untersuchung.

Die Investitionskosten werden anhand verfügbarer Kostenkennwerte aus Studien ([17], [18], [19], [20], [21] und Referenzwerten sowie ergänzender Erfahrungs- und Arbeitsannahmen abgeschätzt. Die Kostenermittlung ist entsprechend dem aktuellen Planungsstand als vergleichende Kostenschätzung zu verstehen. Einzelne Kennwerte und Annahmen werden im weiteren Projektverlauf weiter plausibilisiert und für die abschliessende Bewertung konsolidiert.

Referenzschulhaus und Referenzklassenzimmer

Für die Kostenanalyse wird ein vereinfachtes Referenzschulhaus (Tabelle 12) definiert. Dieses dient als einheitliche Bezugsgrösse für die Dimensionierung und Kostenermittlung der untersuchten Varianten. Die Geometrie orientiert sich an den im Projekt untersuchten Schulbauten und wurde für die vergleichende Kostenbetrachtung vereinfacht.

Als kleinere Bezugsgrösse wird zusätzlich ein Referenzklassenzimmer (Tabelle 13) mit einer Nettogrundfläche von 60 m² verwendet. Diese Grössenordnung entspricht dem im Projekt verwendeten Simulationsmodell eines Klassenzimmers. Dadurch können die Ergebnisse der Kostenanalyse auf eine für die weitere Variantenbewertung gut vergleichbare Einheit bezogen werden.

Tabelle 12: Kenngrössen des Referenzschulhauses

Referenzschulhaus	**in Anlehnung an Wasgenring**	
Anzahl Geschosse	5	
Nettogeschossfläche	4’300	m^2
Raumhöhe V1	4	m
Raumhöhe V2, V3	3	m
Volumen V1	17’200	m^3
Volumen V2, V3	12’900	m^3
Fassadenfläche (Variante 1)	2’100	m^2
Fassadenfläche (Varianten 2 & 3)	1’600	m^2
Innenwandfläche (Variante 1)	2’200	m^2
Innenwandfläche (Varianten 2 & 3)	1’700	m^2
Flächenanteil Schulzimmer	45	%
Fläche Schulzimmer	1’935	m^2
Anzahl Schulzimmer	32	Stk.
Fläche pro Schulzimmer	60	m^2
Flächenanteil nicht Schulzimmer	55	%
Fläche nicht Schulzimmer	2’365	m^2

Tabelle 13: Kenngrössen des Referenzklassenzimmers

Referenzklassenzimmer		
Geometrie		
Länge	6	m
Breite	10	m
Nettogeschossfläche (NGF)	60	m^2
Raumhöhe (Variante 1)	4.0	m
Raumhöhe (Varianten 2 & 3)	3.0	m
Raumvolumen (Variante 1)	240	m^3
Raumvolumen (Varianten 2 & 3)	180	m^3
Fassadenfläche (Variante 1)	66	m^2
Fassadenfläche (Varianten 2 & 3)	50	m^2
Innenwandfläche (Variante 1)	69	m^2
Innenwandfläche (Varianten 2 & 3)	53	m^2
Nutzung & Lüftung		
NGF / Person	3.0	m^2/P
Personen	20.0	P
Aussenluft-Volumenstrom pro Person	29.0	m³/(h·P)
Aussenluft-Volumenstrom	580	m³/h
Heizung & Kälte		
spez. Klimakälteleistung	43.9	W/m²
Klimakälteleistung	2.6	kW
spez. jährlicher Klimakältebedarf	5.9	kWh/(m²·a)
Jährlicher Klimakältebedarf	354	kWh/a
spez. Normheizlast	14.5	W/m²
Normheizlast	0.9	kW
spez. jährlicher Heizwärmebedarf	11.4	kWh/(m²·a)
Jährlicher Heizwärmebedarf	684	kWh/a
spez. jährlicher Wärmebedarf Warmwasser	4.0	kWh/(m²·a)
Jährlicher Wärmebedarf Warmwasser	240	kWh/a

Investitionskosten der Varianten

Auf Basis des Referenzschulhauses wurden die Investitionskosten der untersuchten Varianten abgeschätzt. Die Kostenermittlung berücksichtigt die jeweils erforderlichen gebäudetechnischen Anlagen sowie variantenspezifische bauliche Mehrkosten. Die Ergebnisse werden sowohl für das gesamte Referenzschulhaus als auch anteilig pro Referenzklassenzimmer ausgewiesen. Dadurch können die unterschiedlichen technischen Konzepte auf einer einheitlichen Bezugsgrösse miteinander verglichen werden.

Investitionskosten der Gebäudetechnik

In einem ersten Schritt werden die Investitionskosten der gebäudetechnischen Anlagen gegenübergestellt (Abbildung 23). Die Darstellung umfasst Wärme- und Kälteerzeugung und Wärmequelle, Wärme- und Kälteverteilung und -abgabe, Lüftung sowie Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Bauliche Mehrkosten infolge der unterschiedlichen Raumhöhen sind in dieser Darstellung noch nicht enthalten und werden separat betrachtet.

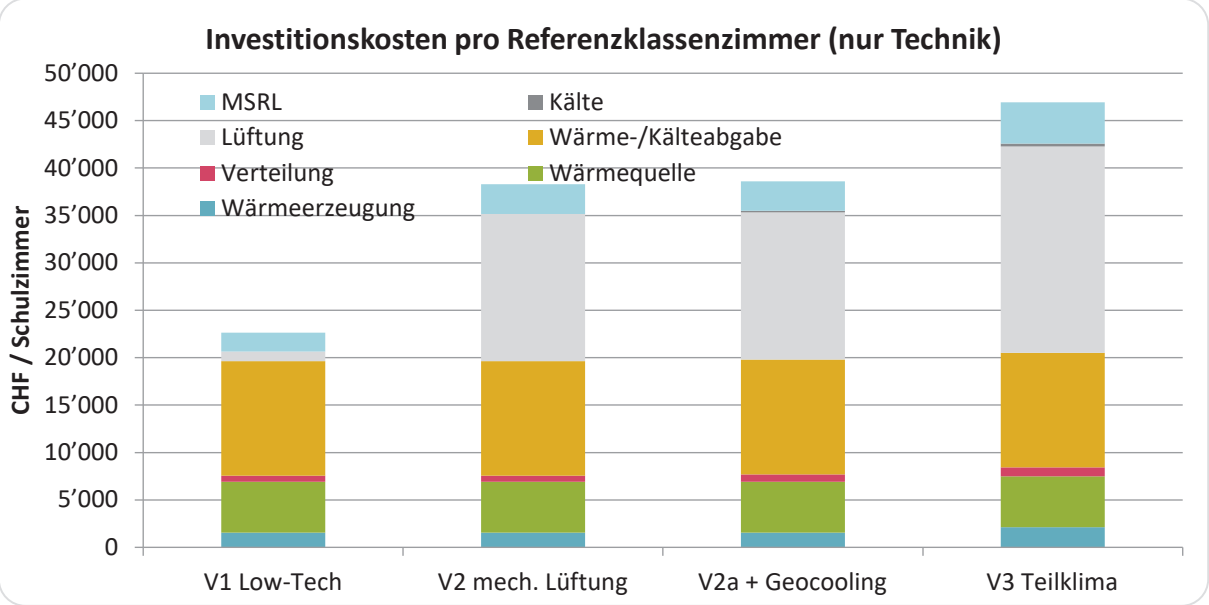


Abbildung 23: Investitionskosten der Gebäudetechnik pro Referenzklassenzimmer, [18], [19], [20], [21]

Bauliche Mehrkosten der erhöhten Raumhöhe

Bei Variante 1 wird gegenüber den übrigen Varianten eine erhöhte Raumhöhe von 4 m anstelle von 3 m angenommen. Die grössere Raumhöhe führt neben dem erhöhten Gebäudevolumen auch zu zusätzlichen baulichen Flächen und damit zu Mehrkosten. Für die Kostenbetrachtung sind insbesondere die zusätzlichen Fassaden- und Innenwandflächen relevant.

Die baulichen Mehrkosten werden separat von den Investitionskosten der Gebäudetechnik betrachtet. Dadurch wird sichtbar, welcher Anteil der Kostenunterschiede auf das gebäudetechnische Konzept und welcher auf die erhöhte Raumhöhe der Variante 1 (Low-Tech) zurückzuführen ist.

Die Betrachtung erfolgt bei gleichbleibender Anzahl Geschosse und gleichbleibender Nutzfläche des Referenzschulhauses. Ein möglicher Verlust eines Geschosses bzw. von Nutzfläche infolge der grösseren Gebäudehöhe wird nicht berücksichtigt. Die ausgewiesenen baulichen Mehrkosten bilden somit ausschliesslich die unmittelbar aus der erhöhten Raumhöhe resultierenden zusätzlichen Bauteilflächen ab.

Die zugrunde gelegten Fassaden- und Innenwandflächen sowie die entsprechenden Kostenkennwerte werden im weiteren Projektverlauf verifiziert. Die baulichen Mehrkosten werden deshalb im vorliegenden Bearbeitungsstand noch nicht ausgewiesen.

Betriebskosten der Varianten

Neben den Investitionskosten werden die laufenden Betriebskosten der untersuchten Varianten betrachtet. Im aktuellen Bearbeitungsstand liegt der Fokus auf den Energiekosten der gebäudetechnischen Anlagen. Berücksichtigt werden die für den Variantenvergleich relevanten Energiebedarfe für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Kühlung. Nicht variantenspezifische Energieverbräuche, beispielsweise für Beleuchtung oder Geräte, werden nicht berücksichtigt.

Der jährliche Heizwärme- und Warmwasserbedarf wird auf Basis des Referenzschulhauses bestimmt und über die angenommene Jahresarbeitszahl der Wärmeerzeugung in einen elektrischen Energiebedarf umgerechnet. Bei Varianten mit mechanischer Lüftung wird zusätzlich der Strombedarf der Ventilatoren berücksichtigt. Für Varianten mit Geocooling beziehungsweise aktiver Kühlung wird der jeweilige elektrische Energiebedarf der Kühlung ergänzt. Die resultierenden Energiebedarfe werden mit einem einheitlichen Energiepreis bewertet, siehe dazu auch Tabelle 14.

Die Berechnung dient der vergleichenden Bewertung der Varianten und stellt keine detaillierte Betriebsenergiebetrachtung des gesamten Schulhauses dar. Für alle Varianten werden soweit möglich identische Randbedingungen verwendet. Die verwendeten Kennwerte und Annahmen werden im weiteren Projektverlauf mit den Ergebnissen der energetischen Variantenuntersuchungen abgeglichen und für die abschliessende Kostenanalyse konsolidiert.

Tabelle 14: Zentrale Annahmen für die Ermittlung der jährlichen Energiekosten

Arbeitsannahmen		
Parameter	**Wert**	**Einheit**
Strompreis	0.29	CHF/kWh
JAZ Wärmepumpe Sole/Wasser	4.00	-
JAZ Warmwasser Sole/Wasser	3.20	-
SFP mechanische Lüftung	1.50	kW/(m³/s)
Äquivalente Lüftungszeit V1 (Fensterlüftung)	1600	h/a
Betriebsstunden mech. Lüftung V2/V2a	1600	h/a
Betriebsstunden Teilklima V3	1800	h/a
WRG-Temperaturwirkungsgrad	80%	%
Raumtemperatur Heizperiode	22	°C
mittlere Aussentemperatur Heiz-/Lüftungsbetrieb	5.00	°C
Luft-Wärmekapazitätsfaktor	0.34	Wh/(m³·K)
EER Geocooling	15.00	-
EER aktive Kühlung reversible WP	4.00	-
Anteil aktive Kühlung V3	30%	%

Werte aus dem Referenzschulhaus		
Kenngrösse	**Wert**	**Einheit**
Jährlicher Heizwärmebedarf	49’020	kWh/a
Jährlicher Wärmebedarf Warmwasser	17’200	kWh/a
Jährlicher Klimakältebedarf Schulzimmer	11’417	kWh/a
Aussenluft-Volumenstrom total	19’888	m³/h
Anzahl Schulzimmer	32	Stk.

Auf Basis dieser Annahmen werden für jede Variante die jährlichen Energiebedarfe der relevanten gebäudetechnischen Anlagen ermittelt und mit dem angesetzten Energiepreis bewertet. Die daraus resultierenden jährlichen Energiekosten werden auf das Referenzklassenzimmer umgelegt und in Abbildung 24 vergleichend gegenübergestellt.

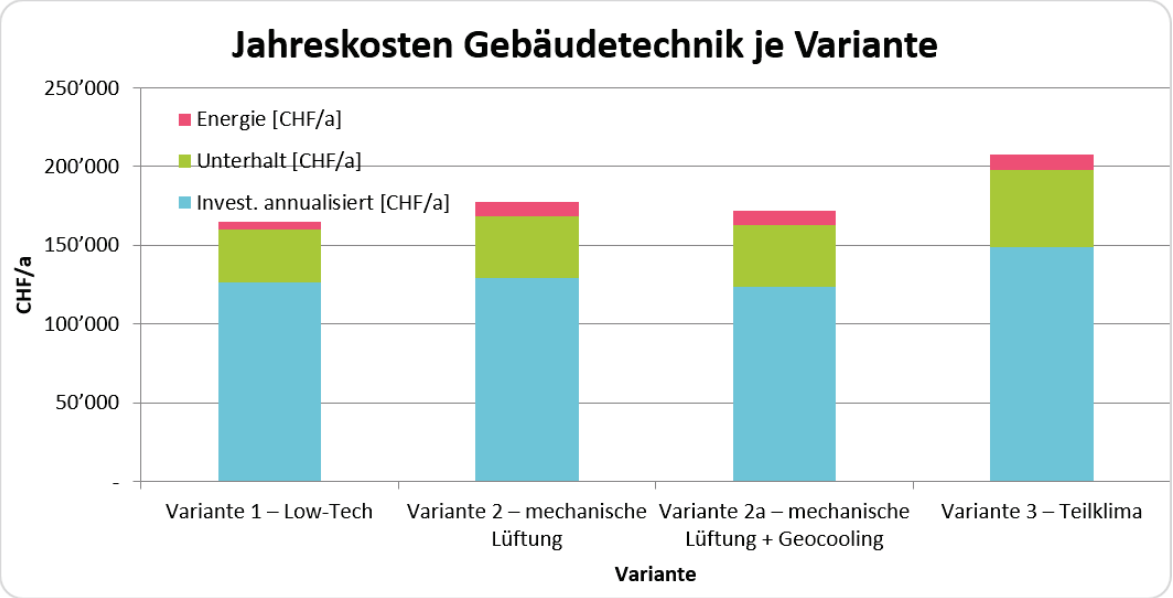


Abbildung 24: Jährliche Energiekosten der Gebäudetechnik nach Verwendungszweck pro Referenzklassenzimmer

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die abgeschätzten jährlichen Energiekosten der Varianten insgesamt in einer ähnlichen Grössenordnung liegen. Bei Variante 1 werden zusätzlich die Lüftungswärmeverluste infolge der natürlichen Fensterlüftung berücksichtigt, wodurch sich gegenüber den Varianten mit mechanischer Lüftung und Wärmerückgewinnung ein zusätzlicher Heizwärmebedarf ergibt. Bei den technisch stärker ausgerüsteten Varianten entstehen demgegenüber zusätzliche Strombedarfe für die mechanische Lüftung beziehungsweise die Kühlung.

Die dargestellten Energiebedarfe und Energiekosten basieren auf vereinfachten Berechnungen und sind als erste Abschätzung zu verstehen. Im weiteren Projektverlauf werden diese mit den Ergebnissen der dynamischen Gebäudesimulationen abgeglichen und bei Bedarf angepasst.

Lebenszykluskosten der Varianten

Ergänzend zu den Investitions- und jährlichen Energiekosten sollen die Varianten über den gesamten Lebenszyklus wirtschaftlich miteinander verglichen werden. Hierzu werden neben den anfänglichen Investitionskosten auch die laufenden Energie- und Instandhaltungskosten berücksichtigt [21]

Die Lebenszykluskostenberechnung befindet sich zum Zeitpunkt des vorliegenden Zwischenberichts noch in Bearbeitung. Insbesondere die angesetzten Nutzungsdauern, Instandhaltungskosten und wirtschaftlichen Randbedingungen werden im weiteren Projektverlauf überprüft und konsolidiert. Die nachfolgend (Tabelle 15) dargestellten Annahmen und ersten Berechnungen sind deshalb als Zwischenstand zu verstehen und dienen in erster Linie der vergleichenden Einordnung der Varianten.

Tabelle 15: Zentrale Annahmen für die Lebenszykluskostenbetrachtung (in Anlehnung an SIA 480:2016)

Allgemeine Annahmen		
Betrachtungsweise	Äquivalente Jahreskosten	
Kalkulationszinssatz	2.25%	%
Strompreis	0.29	CHF/kWh
Anzahl Schulzimmer	32	Stk.

Nutzungsdauern und Unterhaltsfaktoren		
Anlageteil	**Nutzungsdauer [a]**	**Unterhalt [% Invest./a]**
Wärmepumpe	20	2.0%
Erdwärmesonden	50	0.2%
Wärme-/Kälteverteilung	30	1.0%
Fussbodenheizung/-kühlung	30	0.5%
Mechanische Lüftung	30	2.5%
Teilklimaanlage / Luftaufber	20	3.0%
Kältehydraulik / Wärmetaus	25	2.0%
MSRL / Gebäudeautomatio	15	2.0%
Fassade	50	1.0%

Die Lebenszykluskostenberechnung befindet sich zum Zeitpunkt des vorliegenden Zwischenberichts noch in Bearbeitung. Im weiteren Projektverlauf werden die zugrunde gelegten Kostenkennwerte, Nutzungsdauern, Instandhaltungsansätze und wirtschaftlichen Randbedingungen weiter plausibilisiert und mit den Ergebnissen der übrigen Arbeitspakete abgestimmt. Anschliessend erfolgt die abschliessende vergleichende Bewertung der Varianten.

2.6 Fassadenkonfigurator

Für die projektinterne Dimensionierung und Beurteilung von Klassenzimmerfassaden wurde ein browserbasierter Fassadenkonfigurator entwickelt. Die Fassade wird aus Fenstern, Lüftungsflügeln und opaken Elementen aufgebaut. Aus Raum- und Fassadengeometrie, Fensteraufteilung und Öffnungsarten berechnet das Werkzeug unter anderem Fensteröffnungs- und Verglasungsflächen sowie wirksame Lüftungsflächen für Tag- und Nachtbetrieb (Abbildung 25). Damit lassen sich die unterschiedlichen Flächenanforderungen an Verglasung, natürliche Lüftung und sommerlichen Wärmeschutz bereits in einer frühen Planungsphase gegenüberstellen. Für Bestandsgebäude können bestehende und angepasste Fassadenkonfigurationen miteinander verglichen werden.

Für die Bewertung ist die eindeutige Definition der Bezugsflächen wesentlich. Der Konfigurator unterscheidet deshalb zwischen Fensteröffnung im Rohbau, Netto-Verglasungsfläche, öffenbarer Fläche und wirksamer Lüftungsfläche sowie zwischen Boden- und Fassadenfläche als Bezugsgrössen. Die Lüftungsflächen werden getrennt für den Schulbetrieb und die Nachtauskühlung ausgewiesen. Das Werkzeug enthält vereinfachte Prüfungen ausgewählter Anforderungen und Richtwerte, unter anderem aus SIA 180:2014 zum sommerlichen Wärmeschutz und zur natürlichen Nachtauskühlung, aus Art. 17 ArGV 4 sowie zur Verglasungsfläche für die Tageslichtversorgung. Diese Prüfungen dienen der Variantenbeurteilung und ersetzen weder einen vollständigen normativen Nachweis noch eine dynamische Simulation nach Verfahren 3 der SIA 180.

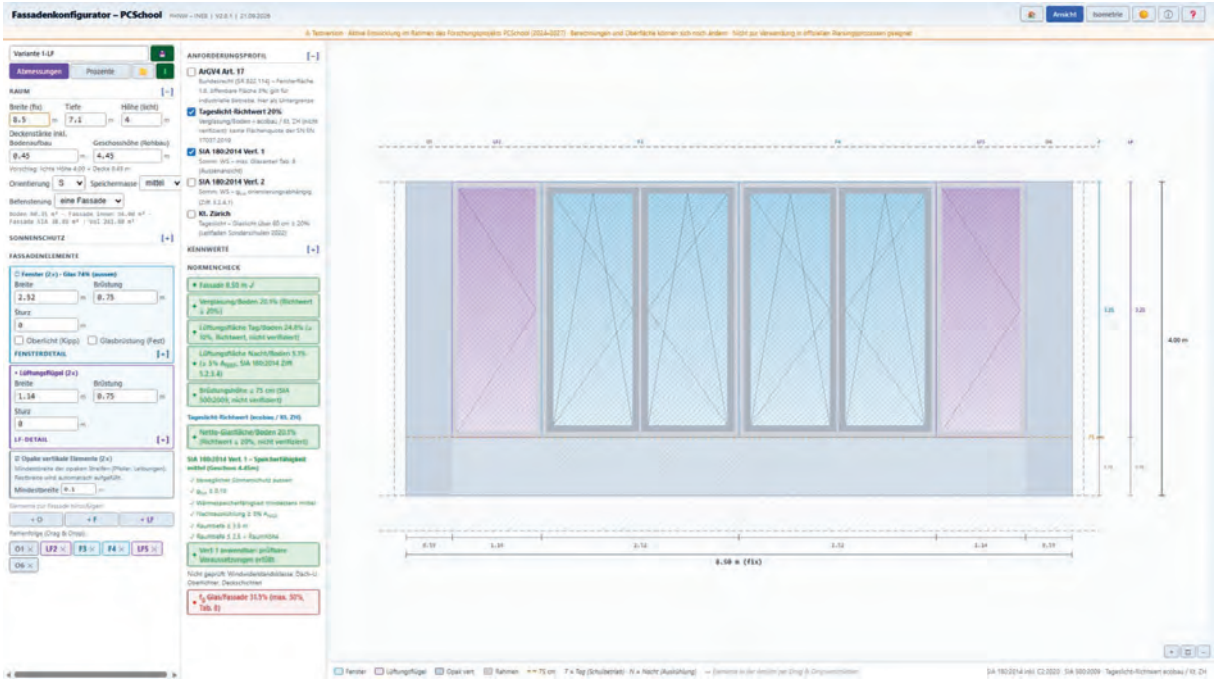


Abbildung 25: Fassadenkonfigurator mit Fassadenansicht, Kennwerten und vereinfachter Prüfung ausgewählter Anforderungen. Eigene Darstellung.

Im Projekt wurde der Fassadenkonfigurator zur Dimensionierung der in AP 6 untersuchten Fassadenvarianten eingesetzt (Abbildung 21). Für das untersuchte Klassenzimmer mit einer Fassadenbreite von 8.5 m zeigte sich, dass eine Netto-Verglasungsfläche von rund 20 % der Bodenfläche und Lüftungsflügel mit einer wirksamen Öffnungsfläche von 5 % der Bodenfläche erst ab einer lichten Raumhöhe von etwa 3.5 bis 3.6 m gleichzeitig in der Fassade untergebracht werden können. Die erforderliche Fläche der Lüftungsflügel beeinflusst damit unmittelbar die Fassadengeometrie und die erforderliche Raumhöhe. Daraus ergeben sich Folgewirkungen auf Gebäudevolumen, Materialmengen, Treibhausgasemissionen der Erstellung und Kosten. Die Ergebnisse zur Wahl der Bezugsgrössen, zum Flächenbedarf der Lüftungsflügel und zu den Grenzen vereinfachter Nachweise werden in der Entscheidungshilfe des AP 8 berücksichtigt.

Eine Erweiterung des Konfigurators um die Berechnung des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1, die Treibhausgasbilanz auf Grundlage des in AP 6 entwickelten THG-Rechners sowie eine Betrachtung auf Gebäudeebene ist vorgesehen. Ob und in welcher Form der Konfigurator nach Projektabschluss über die projektinterne Anwendung hinaus zur Verfügung gestellt wird, ist noch offen.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

3.1 Zentrale Erkenntnisse

Die Arbeiten des Jahres 2026 bestätigen die im Jahresbericht 2025 abgeleiteten Wirkprinzipien und quantifizieren sie auf Raum- und Gebäudeebene. Eine einheitliche Definition von Low-Tech existiert nach Aussage der Interviewten nicht. Überwiegend wird darunter ein Konzept ohne aktive Kühlung und mit reduziertem Einsatz von Gebäudetechnik verstanden. Effizienter aussenliegender Sonnenschutz, wirksame Speichermasse und effektive Nachauskühlung gelten als Grundlage robuster Schulbauten. Die Mitwirkung der Nutzenden wird dagegen als nicht verlässlich planbar eingeschätzt. Eine Nachtauskühlung gilt mehrheitlich nur in automatisierter Form als zuverlässig, wobei Aufwand und Störanfälligkeit automatisierter Fenster kritisch beurteilt werden. Die Best-Practice-Beispiele Wasgenring und Lochacker zeigen, dass passive und hybride Kühlkonzepte funktionieren, wenn witterungs- und einbruchgeschützte Öffnungen, brandschutzkonforme Überströmwege und eine definierte Steuerung zusammenwirken. Sie zeigen zugleich, dass die Sonnenschutzsteuerung und die Betriebsoptimierung nach der Inbetriebnahme überwacht und optimiert werden müssen. Ihre reibungslose Funktionsfähigkeit ist über die Wirksamkeit mitentscheiden.

Die Simulationen des Klassenzimmers im Bestand bestätigen die konsequente Nachtlüftung mit grossen freien Öffnungsflächen und langer Öffnungsdauer als wirksamste im Bestand umsetzbare Einzelmassnahme. Eine kurze Stosslüftung am Morgen reicht nicht aus. Im Neubau führt die Nordorientierung zu den geringsten Überschreitungen. Zwei Massnahmenkombinationen vermeiden Überschreitungen der oberen Grenzwerte nach SIA 180:2014 Fig. 3 vollständig. Die Nachtlüftung bei horizontal gestellten Lamellen zusammen mit reduzierten internen Lasten, reduziertem Akustikdeckenanteil und reduziertem g-Wert sowie dieselbe Nachtlüftung bei Nordorientierung. Beide setzen eine konsequente Nachtlüftung voraus. Die Belegungsdichte beeinflusst die Raumtemperaturen stark. Das Extremjahr im heutigen Klima (BASSTA 2023, 1 in 10) führt zu den meisten Stunden über 26 °C und über dem Grenzwert nach SIA 180:2014 Fig. 3. Die Zukunftsszenarien 2060 weisen höhere Maximaltemperaturen und mehr Stunden über 30°C auf als die entsprechenden heutigen Datensätze. Die Überschreitungen des adaptiven Grenzwerts nehmen dagegen nicht zu, da dieser mit der gleitenden Aussentemperatur ansteigt. Für die Beurteilung der Klimaanpassung sind deshalb neben dem Grenzwert nach SIA 180:2014 Fig. 3 auch absolute Temperaturschwellen heranzuziehen. Massgebend ist zudem die zeitliche Lage der Hitzeperioden relativ zu den Schulferien. In der realen Schule liegen die gemessenen Überschreitungsstunden deutlich unter den simulierten Werten. Vor einer maschinellen Kühlung sind deshalb betriebliche Massnahmen auszuschöpfen. Erhöhte Luftgeschwindigkeiten von 0.6 bis 1.2 m/s erweitern den Komfortbereich nach SN EN 16798-1 um 1.2 bis 2.2 K; die im Jahresbericht 2025 angenommenen zwei bis drei Kelvin setzen Luftgeschwindigkeiten über 1 m/s voraus.

Die Treibhausgasbilanz auf Gebäudeebene zeigt, dass die Wahl des Lüftungskonzepts die Gesamtemissionen des Referenzschulhauses bei gleicher Wärmeerzeugung um 0.3 bis 1.1 kg CO_2-eq/(m²·a) verändert und damit weniger als die Bauweise (1.4 bis 1.6 kg CO_2-eq/(m²·a)). Die Erstellung trägt 76 bis 87 % zu den Emissionen bei. Bei gleicher Wärmeerzeugung weist das Low-Tech-Konzept im Nachweis und im realen Betrieb die niedrigsten Emissionen auf. Bei Fernwärme hängt dieser Vorteil jedoch wesentlich von der angesetzten Aussenluftrate der Fensterlüftung ab. Bei gleicher Aussenluftrate besteht er nur mit Wärmepumpe oder stärker dekarbonisierter Fernwärme. Die Frage, welche Luftmenge der Fensterlüftung als gleichwertig gelten kann, ist damit zugleich eine Frage der Raumluftqualität und des Klimaschutzes. Die jährlichen Energiekosten der Varianten liegen in ähnlicher Grössenordnung. Die Bewertung über den Lebenszyklus steht noch aus.

Die Dimensionierung der Fassadenausschnitte mit dem Fassadenkonfigurator zeigt, dass Konzepte mit Lüftungsflügeln bei einer Fassadenbreite von 8.5 m eine lichte Raumhöhe von rund 3.5 bis 3.6 m erfordern, wenn zugleich eine Glasfläche von 20 % der Bodenfläche erreicht werden soll. Die im Jahresbericht 2025 formulierten Planungsrichtwerte und Systemgrenzen werden im Schlussbericht anhand dieser Ergebnisse überprüft.

3.2 Projektfortschritt

Die Experteninterviews (AP 2) wurden mit Ausnahme des Themenbereichs «Wohlbefinden Kinder» durchgeführt und ausgewertet. Zudem wurden zwei Best-Practice-Beispiele analysiert. Im erweiterten Projektumfeld untersuchte die Waldhauser + Hermann AG Schulbauten im Kanton Basel-Landschaft und erarbeitete Massnahmenvorschläge. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden im Projekt berücksichtigt.

In AP 3 wurde das Simulationsmodell eines Klassenzimmers um Massnahmenkombinationen und Klimaszenarien für 2060 erweitert. Die Simulationsergebnisse wurden mit den in einer realen Schule gemessenen Überschreitungsstunden verglichen. Ergänzend wurde die Wirkung erhöhter Luftgeschwindigkeiten untersucht und eine Testinstallation von Deckenventilatoren begleitet (Kap. 2.3 bis 2.5). Die Arbeiten in AP 5 laufen.

In AP 6 wurde ein THG-Rechner entwickelt, mit der Rechenhilfe zur SIA 390/1 geprüft und auf die untersuchten Neubauvarianten angewendet. Für die Lüftungsflügel, für die keine geeigneten Ökobilanzdaten vorliegen, wurde ein eigenes Bauteilmodul erstellt. In AP 7 wurden die Investitions- und Energiekosten abgeschätzt; die Lebenszykluskosten werden derzeit ermittelt. Die Ergebnisse von AP 6 und AP 7 stellen einen Zwischenstand dar und werden bis zum Schlussbericht weiter überprüft und ergänzt.

Für die projektinterne Dimensionierung und Beurteilung von Klassenzimmerfassaden wurde ein Fassadenkonfigurator entwickelt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fliessen in die Entscheidungshilfe des AP 8 ein.

3.3 Ausblick

Bis zum Projektabschluss im März 2027 werden die noch offenen Arbeiten abgeschlossen. Die Auswertung der Experteninterviews wird um den Themenbereich «Wohlbefinden Kinder» ergänzt. Die Simulationen in AP 4 werden fortgeführt. Die Ergebnisse fliessen in die Treibhausgasbilanz (AP 6), die Kostenanalyse (AP 7) und die Entscheidungshilfe (AP 8) ein.

In AP 4, AP 6 und AP 7 werden neben Neubauten auch Bestandsgebäude untersucht. Die Berechnungsgrundlagen und Bezugsgrössen von AP 6 und AP 7 werden weiter aufeinander abgestimmt. In AP 5 werden Entwurfsprinzipien für die Integration von Low-Tech-Konzepten abgeleitet.

In AP 8 werden die Ergebnisse zu thermischem Komfort, Treibhausgasemissionen und Kosten in einer Entscheidungshilfe zusammengeführt. Diese soll Planende und Bauherrschaften bei der Auswahl geeigneter Konzepte für Neubau und Bestand unterstützen. In diesem Zusammenhang werden auch die im Jahresbericht 2025 formulierten Planungsrichtwerte überprüft.

Die Projektergebnisse werden im Schlussbericht dokumentiert und für die Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift aufbereitet.

4 Publikationen und andere Kommunikation

- Die Simulationen basieren auf den Klimadaten des Jahres 2025 wurden an der BauSIM, 9-11 September 2026, in Zürich vorgestellt

  M. Hall, G. Steinke: Sommerlicher Komfort in Schulen mit manueller Fensterlüftung und ohne maschinelle Kühlung. BauSIM, 9-11 September 2026, Zürich (wird hier veröffentlich werden: Konferenzen – IBPSA-DACH (Germany, Austria and Switzerland)

- Vorstellung des Projektstands am DACH-Treffen in Rosenheim (Sep. 2026), C. Hauri
- R. Bieri: Bestandsaufnahme: Hitzesommer in Basler Schulen, FHNW HS25, EUT (im Rahmen des Studiengangs Energie und Umwelttechnik, Projektarbeit, 5. Semester), nicht öffentlich

– 2026 fanden zwei Begleitgruppentreffen statt, an denen der Projektstand vorgestellt wurde.

5 Literaturverzeichnis

[1] T. Kessler, “Wegleitung Sommerlicher Wärmeschutz bei Bauvorhaben der Stadt Zürich,” Zürich, 2023. Accessed: May 27, 2026. [Online]. Available: https://www.stadt-zuerich.ch/artikel/de/nachhaltigkeitsbericht-immo-2025/thermischer-komfort.html

[2] SIA 180, “Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden,” 2014.

[3] P. Knüsel, “Planen im Hitzestress,” *Faktorverlag Kühlen*, no. 66, pp. 9–13, 2025.

[4] SIA 2024, “Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik (Merkblatt SIA 2024:2021),” 2021, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich*.

[5] M. Hall and G. Steinke, “Sommerlicher Komfort in Schulen mit manueller Fensterlüftung und ohne maschinelle Kühlung,” in *11. BauSIM*, Zürich: IBPSA-DACH, 2026, pp. 1–8.

[6] G. Zweifel, “Neue Klimadaten für SIA-Normen in der Vernehmlassung.” Accessed: May 12, 2026. [Online]. Available: https://www.espazium.ch/de/aktuelles/neue-klimadaten-sia

[7] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, “SIA 180:2014 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden,” Zürich, 2014.

[8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, “SIA 390/1:2025 Klimapfad – Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus von Gebäuden,” Zürich, 2025.

[9] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, “SIA 2032:2020 Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden,” Zürich, 2020.

[10] KBOB, ecobau, and IPB, “Ökobilanzdaten im Baubereich, Version 9.0,” Bern, Jul. 2026. [Online]. Available: https://www.kbob.admin.ch/de/oekobilanzdaten-im-baubereich

[11] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, “SIA 380/1:2016 Heizwärmebedarf,” Zürich, 2016.

[12] IWB Industrielle Werke Basel, “Produktkennzeichnung 2024 – IWB Fernwärme Mix,” Basel, 2025.

[13] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, “SIA 2024:2021 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik,” Zürich, 2021.

[14] Minergie Schweiz, “Berechnung der Grauen Energie und der Treibhausgasemissionen beim Zusatz ECO,” Basel, Nov. 2024. [Online]. Available: https://www.minergie.ch/de/zertifizieren/eco/

[15] D. Bionda, G. Settembrini, S. Domingo, H. Zeifang, R. Itten, and M. Stucki, “SYGREN – Systemkennwerte Graue Energie Gebäudetechnik,” Bern, Jan. 2021. [Online]. Available: https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=67175&Load=true

[16] Swegon Group AB, “Environmental Product Declaration: GOLD RX 011/012 – SILVER C RX 011/012,” Jun. 2025. [Online]. Available: https://www.swegon.com/siteassets/_product-documents/air-handling-units/gold-version-f/epd/epd-goldrx11-12.pdf

[17] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), “SIA 480 Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau,” 2016.

[18] M. L. Ménard Martin, “Erhöhung der Quellentemperatur von Wärmepumpen, Auswirkungen auf Jahresarbeitszahl und Wirtschaftlichkeit,” Zürich, 2011.

[19] S. M. Ménard Martin, “Dekarbonisierung Wohnsiedlungen Netto-Null – auf dem Weg zur CO2-neutralen Wärmeversorgung,” Zürich, 2021.

[20] G. F. Koschenz Markus Berger Roman, “Raumklima Sommer – Massnahmen Aktiv SupCosts4Cooling,” Zürich, 2026.

[21] EnergieSchweiz, “Bohrung für Wärmepumpen mit Erdsonden.” [Online]. Available: https://www.energieschweiz.ch/wohnen/heizungssysteme/erdsondenbohrung/

---

6 Anhang

6.1 Grundlagen Simulationsmodell: Analyse Klassenzimmer im Bestand

Geometrie	
Nettogrundfläche	60.3 m^2 (Klassenzimmer), 24.9 m^2 (Flur)
Breite	9.0 m
Tiefe	6.7 m (Klassenzimmer), 2.8 m (Flur)
Höhe	3.0 m
Fenstermasse pro Fenster	2.05 m x 2.05 m, nur 1/3 ist öffenbar (Dreh-/Kippflügel)
Bauweise	
Aussenwand	Beton, Dämmung, U-Wert: 0.25 W/(m^2 K)
Innenwände	Gipskartonplatten, Dämmung
Zwischendecke	Beton, Akustikeinsatz 100 %
Fenster	3-fach verglast, Holzrahmen, U_g-Wert: 0.61 W/(m^2 K), g-Wert: 54 %, Rahmenanteil: 10 %, U_f-Wert: 1.4 W/(m^2 K)
Luftdichtheit	q_{50} = 1.0 m^3/(h m^2), geschlossenen Ortschaft
Nutzung	
Raumbelegung	– 19 Personen (115 W, 18.7 l/h CO_2, Sekundarschule) – Belegungszeit: 7 – 17 Uhr an Schultagen – Geräte, Beleuchtung: Leistung gemäss SIA 2024:2021 Standard, Profil leicht angepasst
Sonnenschutz	– Steuerung nach Einstrahlung (> 200 W/m^2) – Geschlossener Sonnenschutz: Lamellenwinkel: 65 ° – Sonnenschutz ist generell nachts, am Wochenende und in den Ferien geschlossen (Lamellenstellung 65°)
Lüftung „manuelle Fensterlüftung“	– Pausenlüftung in den Klassen: 3 Fensterflügel ganz offen (nur Klasse) – Taglüftung in Klasse/Flur nach Temperatur: je 3 Fensterflügel ganz offen, wenn Aussenlufttemperatur unter Raumlufttemperatur und die Raumlufttemperatur zwischen 21 – 24 °C liegt – Pausenlüftung/Taglüftung bei geschlossenem Sonnenschutz: 30 % der lichten Öffnungsfläche nutzbar – Nachtlüftung (17-7 Uhr) in Klasse/Flur: Sonnenschutz geschlossen: 10% der lichten Öffnungsfläche nutzbar (Kippstellung) – Nachtlüftung: 01.-28.06. und 11.08.-06.09. (nur an Schultagen) – Variante „Lamelle horizontal“: Lamellen auf horizontal und Fensterflügel ganz offen: 90 % der lichten Öffnungsfläche nutzbar
Türe	– Geschlossen, ausser bei Varianten mit Querlüftung
Randbedingungen	
Klima	– BASSTA 2023 DRY – Variante „Messwerte 2025“: Basel-Binningen von 2025 ergänzt mit Temperaturmesswerten von 2025 der Klimastation Basel St. Johann

Id. Heizung	20 °C, Heizperiode: Okt – April, Heizung aus: Mai-Sep.
Id. Kühlung	keine
Simulationszeitraum	01.01.-31.12.2025

Ferien

	Start	Ende
Fasnacht	01.03.2025	16.03.2025
Frühling	12.04.2025	27.04.2025
Sommer	28.06.2025	10.08.2025
Herbst	27.09.2025	12.10.2025
Weihnachten	20.12.2025	05.01.2026

Konstruktionen

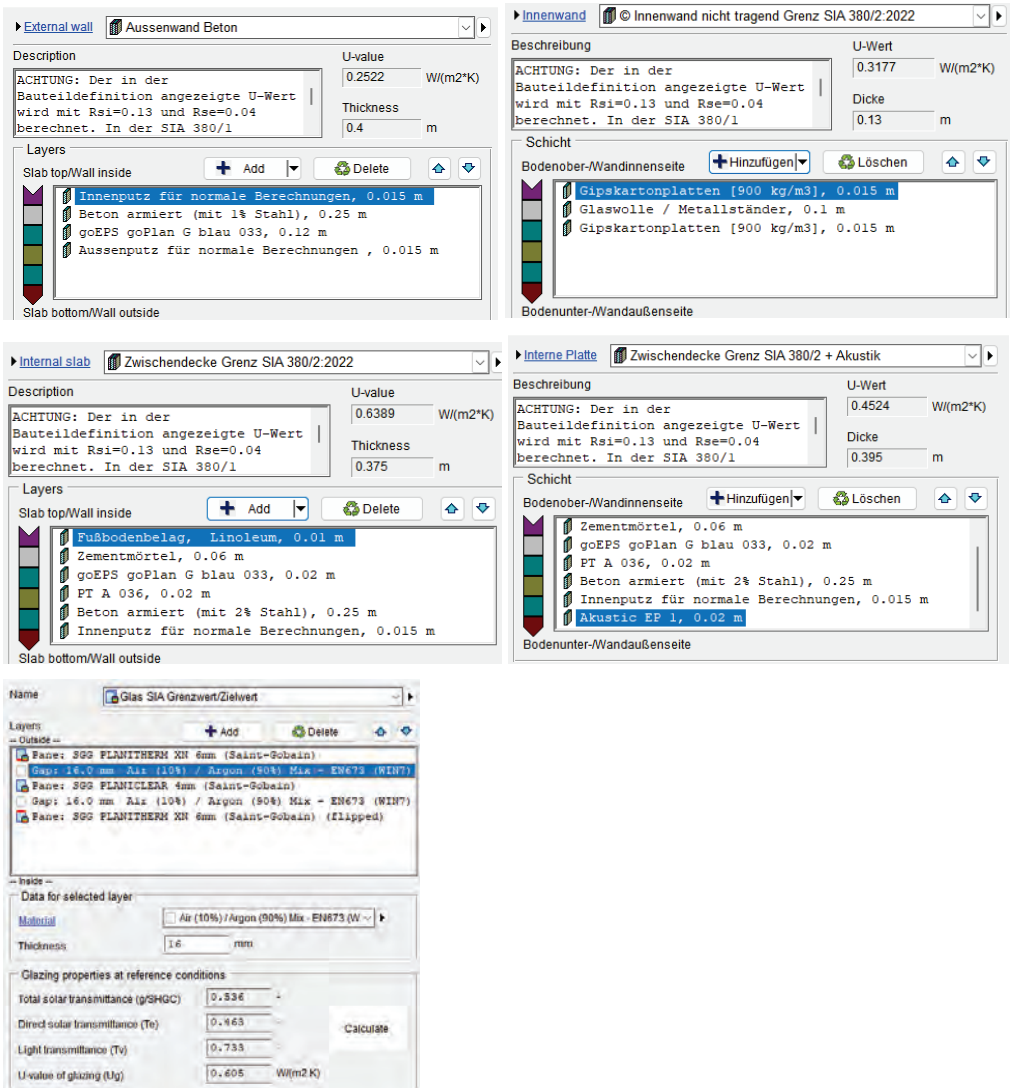


Abbildung 26: Konstruktionen des Basismodelles in IDA ICE.

Lüftung

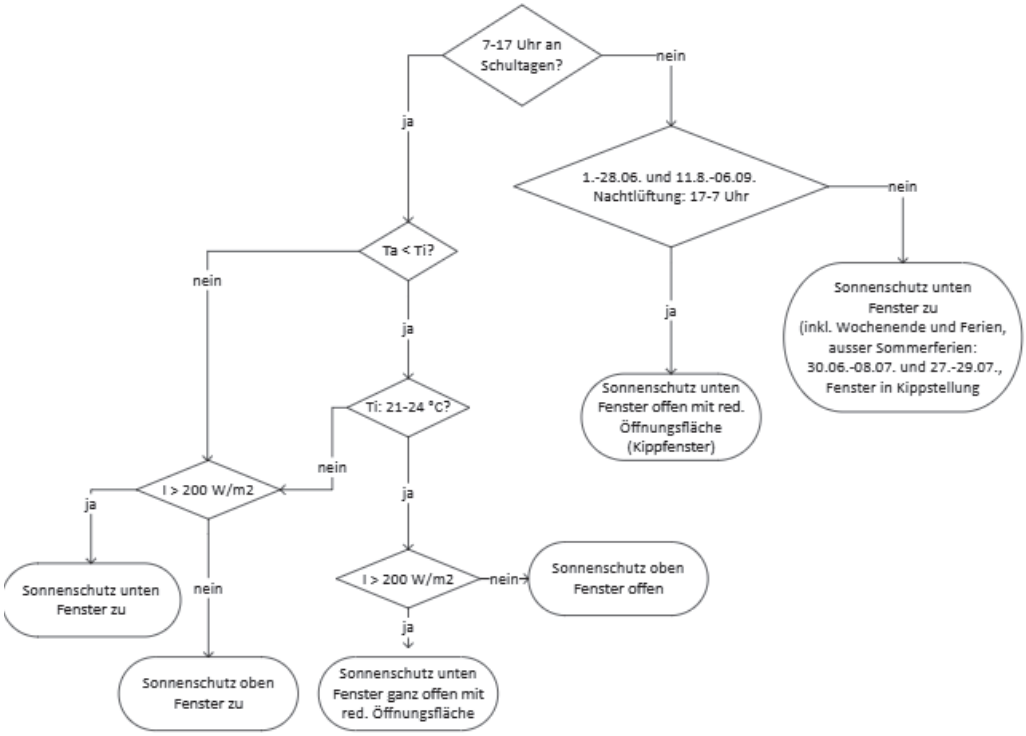


Abbildung 27: Schema der Lüftungsstrategie gemäss Temperatur (Taglüftung: Fensterlüftung nach «Temperaturempfinden») und Zeitplan für Nachtlüftung (Fenster werden abends geöffnet und sind die gesamte Nacht offen).

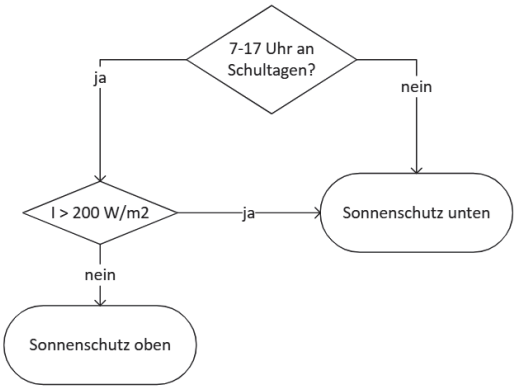


Abbildung 28: Schema der automatischen Steuerung für den Sonnenschutz (Gebäudeleittechnik).



Abbildung 29: Pausenlüftungsplan während der Schultage. Der letzte Lüftungsblock erfolgt nach dem Unterricht, damit morgens die CO_2-Konzentration der Aussenkonzentration entspricht.

Personen, Geräte und Beleuchtung

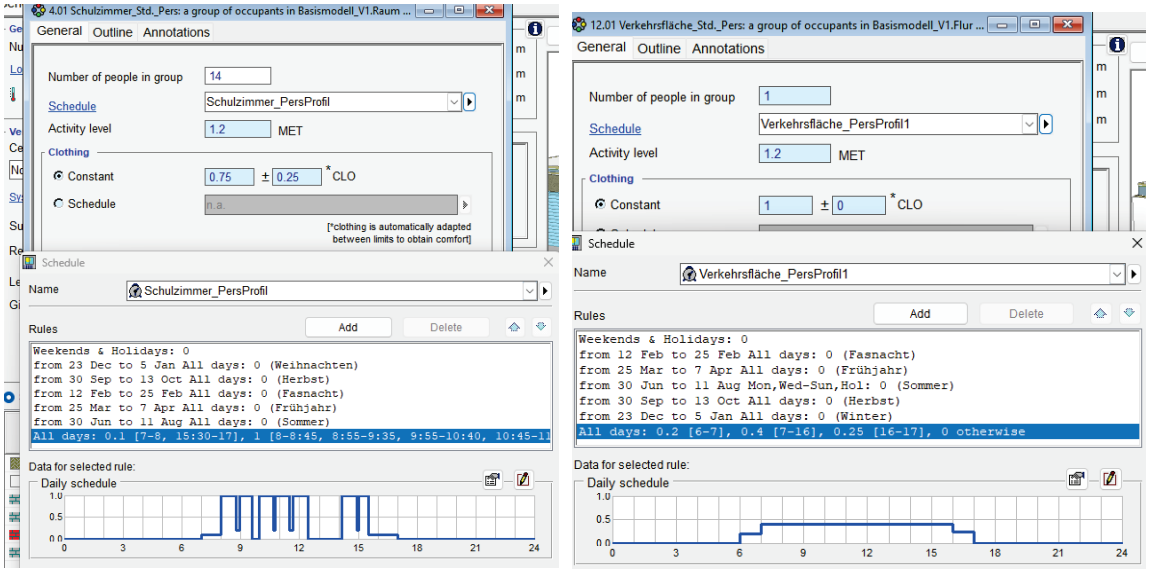


Abbildung 30: Personenanwesenheit Klassenzimmer (links), Flur (rechts).

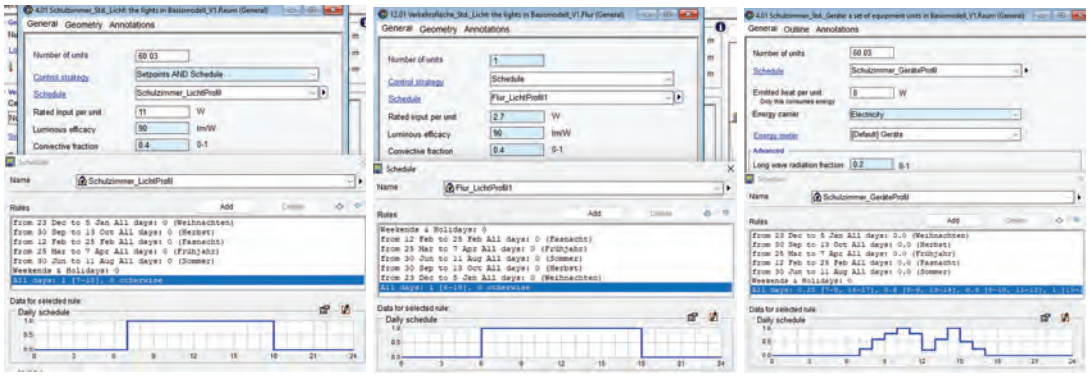


Abbildung 31: Lichtprofil im Klassenzimmer (links) und Flur (Mitte), Geräteprofil Klassenzimmer (rechts).

6.2 Klimadaten

Monatsmittelwerte der Aussenlufttemperatur und der Globalstrahlung von verschiedene Klimaszenarien zeigt Abbildung 32. Es werden die Messwerte von 2025 mit den synthetischen Klimaszenarien verglei-chen. St. Johan ist eine Messstation in der Basler Innenstadt.

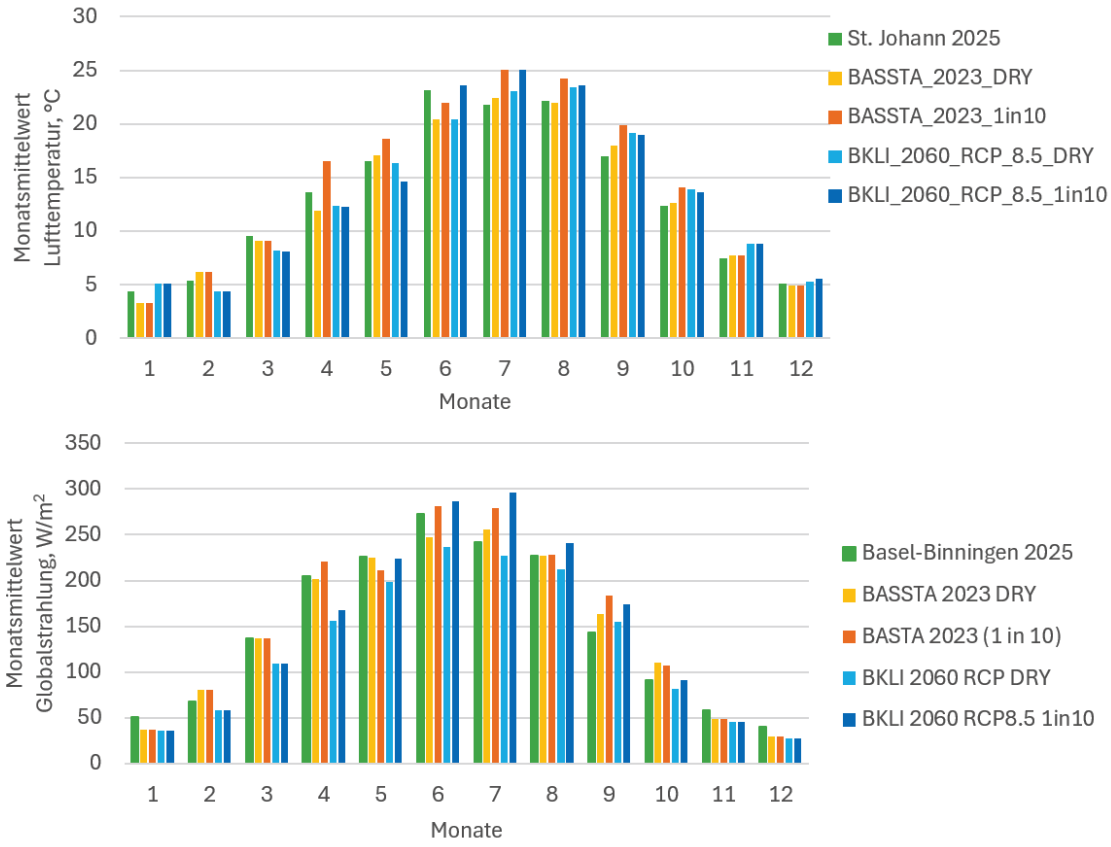


Abbildung 32: Vergleich verschiedener Klimafiles. Messdaten: St. Johann und Basel-Binningen 2025

6.3 Daten zu Treibhausgasemissionen (AP6)

Die Tabellen enthalten die Daten zu Abbildung 22 und Tabelle 10 sowie die wichtigsten Rechengrundlagen. Abkürzungen: V1 = Low-Tech mit Lüftungsflügeln, V2a = mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung und Kipp-Oberlichtern, V2b = mechanische Lüftung mit Nachtauskühlung über die Anlage, V2c = mechanische Lüftung mit Lüftungsflügeln, Geo = Geocooling, V3 = Teilklima; FW = Fernwärme, WP = Sole/Wasser-Wärmepumpe. Werte gerundet, Summen mit Rundungsdifferenzen.

Tabelle 16: Daten zu Treibhausgasemissionen (THGE) der Varianten nach Bereich

THGE [kg CO_2-eq/(m²EBF·a)]	V1 WP	V1 WP 3.5 m	V1 FW	V2a WP	V2a WP Geo	V2a FW	V2b WP	V2c WP	V3 WP
Raumhöhe [m]	4.0	3.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.5	3.0
Heizwärmebedarf Q_H [kWh/(m²·a)]	16.3	15.6	16.3	8.3	8.3	8.3	7.4	8.6	8.3
Baukonstruktion	5.92	5.73	5.92	5.95	5.95	5.95	5.87	5.91	5.95
Gebäudetechnik inkl. Elektro, Sanitär, Automation	1.65	1.65	1.33	2.76	2.78	2.44	2.60	2.60	2.63
Lüftungsflügel	0.33	0.33	0.33	–	–	–	–	0.33	–
Photovoltaik-Anlage	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Erstellung E	**8.30**	**8.11**	**7.98**	**9.11**	**9.13**	**8.79**	**8.86**	**9.23**	**8.98**
Betrieb Wärme	0.67	0.65	2.04	0.44	0.44	1.30	0.41	0.45	0.44
Betrieb Elektrizität ohne PV	2.00	2.00	2.00	2.47	2.50	2.47	2.53	2.41	2.51
PV-Gutschrift	−1.34	−1.34	−1.34	−1.34	−1.34	−1.34	−1.34	−1.34	−1.34
Betrieb B	**1.34**	**1.31**	**2.70**	**1.58**	**1.60**	**2.43**	**1.61**	**1.52**	**1.62**
E + B	**9.63**	**9.42**	**10.68**	**10.68**	**10.73**	**11.22**	**10.47**	**10.75**	**10.60**

Tabelle 17: THGE der Varianten je Rechenweise der Luftmenge, Bauweise, Lüftungsanlage und Energiefaktoren

THGE [kg CO_2-eq/(m²EBF·a)]	V1 WP	V1 WP 3.5 m	V1 FW	V2a WP	V2a WP Geo	V2a FW	V2b WP	V2c WP	V3 WP
E + B Nachweis (Standardnutzung SIA 380/1)	**9.63**	**9.42**	**10.68**	**10.68**	**10.73**	**11.22**	**10.47**	**10.75**	**10.60**
E + B realer Betrieb	9.63	9.42	10.68	10.70	10.74	11.26	10.48	10.76	10.61
E + B gleiche Aussenluftrate	9.83	9.62	11.34	10.70	10.74	11.26	10.48	10.76	10.61
Q_H realer Betrieb [kWh/(m²·a)]	16.3	15.6	16.3	8.7	8.7	8.7	7.8	9.0	8.7
Q_H gleiche Aussenluftrate [kWh/(m²·a)]	23.3	22.5	23.3	8.7	8.7	8.7	7.8	9.0	8.7
E + B, Lüftungsanlage als KBOB-Pauschale	9.63	9.42	10.68	10.60	10.65	11.13	10.54	10.82	10.67
E + B Stahlbeton	11.13	10.84	12.27	12.02	12.07	12.62	11.84	12.13	11.94
E + B Wärmebrückenzuschlag 10 %	9.58	9.37	10.51	10.64	10.69	11.09	10.44	10.71	10.56
E + B Wärmebrückenzuschlag 30 %	9.68	9.47	10.85	10.73	10.77	11.35	10.51	10.79	10.64
E + B Fernwärme IWB-Pfad, Mittel 60 a (0.025)	–	–	9.29	–	–	10.37	–	–	–
E + B Strom 0.020 kg CO_2-eq/kWh	8.51	8.32	10.02	9.36	9.38	10.16	9.12	9.47	9.24

Tabelle 18: Rechengrundlagen der Treibhausgasbilanz

Grösse	Wert	Quelle
Betrachtungszeit, Methode	60 a; Jahreswert = Menge × (Herstellung + Entsorgung) / Amortisationszeit	SIA 390/1:2025, SIA 2032:2020
Ökobilanzdaten	KBOB-Liste Version 9.0	KBOB
Gebäude	Trakt A Wasgenring idealisiert: 32 Klassenzimmer, EBF 3'946 m²; je Zimmer 66.6 m² EBF (60.35 m² NGF), 20 Personen	Gebäudemodell AP 6
Bauweise	Holz-Hybrid über Untergeschoss aus Beton; Stahlbeton als Sensitivität	Bauteilkatalog Anhang D 2032 + eigene Bauteile
Fassaden je Zimmer	Fenster / Verglasung / Lüftungsflügel [m²]: V1 4.0 m 16.38 / 12.11 / 7.41; 3.5 m mit LF 16.06 / 12.11 / 7.32; V2b 17.10 / 12.13 / –; mit Oberlichtern (V2a, V3) 19.13 / 12.03 / –	Fassadenkonfigurator V2.8.1
U-Werte	Fassade 0.112, Dach 0.119, Fenster U_w 1.0 (g 0.5, g_tot mit Storen 0.07), Lüftungsflügel 0.45 W/(m²·K)	eigene Bauteile
Wärmebrücken	Zuschlag 20 % auf die Transmission (Sensitivität 10 / 30 %)	Annahme
Heizwärmebedarf	Monatsbilanz, Klima Basel-Binningen, Standardnutzung Schulen, Gebäudekorrektur	SIA 380/1:2016
Aussenluft	Standardnutzung 0.7 m³/(h·m²); Anlage 29 m³/(h·Person) = 580 m³/h je Zimmer, übrige Flächen 0.5 m³/(h·m²), 1'600 h/a, Wärmerückgewinnung 75 %, SFP 1.5 kW/(m³/s), Infiltration 0.15 m³/(h·m²)	SIA 380/1:2016, SIA 2024:2021, AP 7
Nachtauskühlung	V2a: 6 Kipp-Oberlichter und 1 Tür-Oberlicht motorisch, Abluft 480 h/a mit halber Ventilatorleistung; V2b: Zu- und Abluft 480 h/a; V3: 1'800 h/a Lüftung inkl. Nachtbetrieb	Annahme, AP 7
Warmwasser, Beleuchtung, Geräte	4 / 9 / 7 kWh/(m²·a)	AP 7, SIA 390/1:2025
Kühlung (V2a Geocooling, V3)	Klimakältebedarf der Klassenzimmer 5.9 kWh/(m²·a); Arbeitszahl Geocooling 15, aktive Kühlung 4; V3 70 % Geocooling; Kältemittel R32, Leckage 2 %/a	AP 7, Rechenhilfe SIA 390/1
Energieträger	Strom 0.125 kg CO_2-eq/kWh; Wärmepumpe JAZ 4.3; Fernwärme Basel 0.092 kg CO_2-eq/kWh (IWB-Mix 2024, statisch)	KBOB 2026, IWB 2025
Photovoltaik	44 kWp, 960 kWh/kWp; Gutschrift bis zum Strombedarf des Gebäudes (Jahresbilanz)	SIA 390/1:2025
Heizleistung	14.5 W/m² EBF	AP 7
Lüftungsanlage	Komponentenmodell 1.68 kg CO_2-eq je m² EBF des Zimmers und Jahr (Gerät 0.194 kg je m³/h, Kanalnetz)	[15] [16]
Elektro- und Sanitäranlagen	KBOB-Pauschalen «Wohnen»: 0.43 bzw. 0.42 kg CO_2-eq/(m²·a)	[14]

7 Jahresbericht 2025

Da im aktuellen Jahresbericht 2026 mehrmals auf den Jahresbericht 2025 verwiesen wird, ist dieser hier angehängt.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Zwischenbericht vom 13. März 2026

PassiveClimateSchool

Klimaangepasster Schulraum für morgen – Einfluss auf Treibhausgasemissionen, Behaglichkeit und Architektur



Quelle: Microsoft 365

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Ko-Finanzierung:
Kanton Basel-Stadt
Bau- und Verkehrsdepartement - Fachstelle umweltgerechtes Planen und Bauen
CH-4051 Basel
www.bs.ch

Subventionsempfänger/innen:
Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau INEB
Institut Architektur IARCH
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch

Waldhauser + Hermann AG
CH-4142 Münchenstein
www.waldhauser-hermann.ch

Hochschule Luzern HSLU
Institut für Gebäudetechnik IGE
CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autor/in:
Gregor Steinke, FHNW INEB, gregor.steinke@fhnw.ch
Monika Hall, FHNW INEB, monika.hall@fhnw.ch

BFE-Projektbegleitung:
Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, mendard@lowteclab.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502870-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt PassiveClimateSchool untersucht die Potenziale und Grenzen von Low-Tech-Konzepten für Fassaden, natürliche Lüftung und natürliche Auskühlung in Schulbauten. Zentral ist der Vergleich mit konventionellen Systemen (mechanische Lüftung, aktive Kühlung) hinsichtlich Treibhausgasemissionen in Erstellung und Betrieb, thermischem Komfort, Raumluftqualität und Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel. Daraus wird eine Entscheidungshilfe für Planende und Bauherrschaften entwickelt. Die methodische Herangehensweise kombiniert eine Literaturrecherche mit der Auswertung von Messungen und dynamischen Gebäudesimulationen. In einer Messkampagne des Kantons Basel-Stadt werden seit Sommer 2024 kontinuierlich Raumlufttemperaturen, relative Feuchten und CO_2-Konzentrationen in sieben Schulgebäuden verschiedener Bauepochen erfasst. Ergänzend wurden Gebäudebegehungen durchgeführt und ein Simulationsmodell eines Referenzklassenzimmers aufgebaut, mit dem der Einfluss verschiedener Massnahmen untersucht wird.

Die bisherigen Arbeiten bestätigen, dass funktionierende passive Kühlkonzepte auf einem effektiven aussenliegenden Sonnenschutz und der konsequenten Regeneration der Speichermasse durch nächtliche Lüftung beruhen. Die Variantenstudien in der Simulation zeigen, dass organisatorische Massnahmen ein grosses Reduktionspotenzial aufweisen. Die horizontale Stellung der Sonnenschutzlamellen während der Nachtlüftung reduziert die Überhitzungsstunden um rund 30 %. Ergänzt mit einer Querlüftung über die Erschliessung, führt dies zu den geringsten Überhitzungswerten aller untersuchten Varianten. Die Gebäudebegehungen dokumentieren jedoch eine Diskrepanz zwischen Planungsannahmen und realem Betrieb, da geschlossene Lamellen die natürliche Auskühlung blockieren und Verantwortlichkeiten für die Lüftung häufig nicht definiert sind. Die Erkenntnisse fliessen in einen Katalog von Massnahmen für Bestandsbauten ein und bilden die Grundlage für die weiteren Arbeitspakete zur Treibhausgas-Bilanzierung, Kostenanalyse und Entwicklung der Entscheidungshilfe.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ... **3**
Inhaltsverzeichnis ... **4**
Abkürzungsverzeichnis ... **6**
1 Einleitung ... **7**
1.1 Kontext und Motivation ... 7
1.2 Projektziel ... 7
2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion ... **8**
2.1 Grundlagen, Begriffsdefinitionen und Systemabgrenzungen ... 8
2.1.1. Low-Tech-Konzepte und konventionelle Referenzsysteme ... 8
2.1.2. Neubau und Bestandssanierung ... 10
2.1.3. Charakterisierung nach Schulstufen ... 11
2.2 Klimatische und normative Rahmenbedingungen ... 11
2.2.1. Thermischer Komfort ... 11
2.2.2. Raumluftqualität und CO_2-Pegel ... 13
2.2.3. Lüftungsöffnungen und Volumenströme für natürliche und mechanische Lüftung ... 15
2.2.4. Treibhausgasemissionen und Lebenszyklusbetrachtung ... 16
2.2.5. Wirtschaftliche Bewertung ... 16
2.2.6. Akustik, Lärmschutz und weitere Anforderungen ... 17
2.2.7. Zusammenfassung normative Werte und Empfehlungen ... 17
2.3 Klimaszenarien CH2018 und Auswirkungen auf passive Kühlkonzepte ... 18
2.4 Bauphysikalische und architektonische Einflussfaktoren ... 19
2.4.1. Gebäudeausrichtung und solare Einstrahlung ... 19
2.4.2. Fensterflächenanteil ... 20
2.4.3. Verschattung ... 21
2.4.4. Raumgeometrie ... 23
2.4.5. Thermische Speichermasse und Zielkonflikt Akustik ... 23
2.5 Lüftungsstrategien ... 24
2.5.1. Vergleich Lüftungssysteme ... 24
2.5.2. Natürliche Auskühlung ... 25
2.5.3. Ergänzende Komfortmassnahmen durch Deckenventilatoren ... 27
2.6 Systemgrenzen und Einschränkungen ... 28
2.6.1. Lärmschutz ... 28
2.6.2. Nutzerverhalten und Performance Gap ... 28
2.6.3. Grenzen der Anwendbarkeit ... 29
2.6.4. Implementierung und Nachrüstung im Bestand ... 29
2.7 Planungsrichtwerte für Low-Tech-Konzepte ... 30

2.8 Fallbeispiele und Sofortmassnahmen sommerlicher Wärmeschutz 31
2.8.1. Spezifische Erkenntnisse aus den Schulbegehungen 31
2.8.2. Massnahmenübersicht und Priorisierung 33
2.9 Simulation eines Klassenzimmers 34
2.9.1. Basismodell 34
2.9.2. Varianten 34
2.9.3. Analyse 36
2.9.4. Fazit 38
3 Schlussfolgerungen und Ausblick 39
3.1 Zentrale Erkenntnisse 39
3.2 Projektfortschritt 40
3.3 Ausblick 40
4 Publikationen und andere Kommunikation 40
5 Literaturverzeichnis 41
6 Anhang 43
6.1 Grundlagen Simulation 44

Abkürzungsverzeichnis

A_E	Energiebezugsfläche
AP	Arbeitspaket
BAG	Bundesamt für Gesundheit
BFE	Bundesamt für Energie
CH2018	Klimaszenarien Schweiz 2018
CO_2	Kohlendioxid
F_c	Abminderungsfaktor Sonnenschutz
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
GLT	Gebäudeleittechnik
g_{tot}	Gesamtenergiedurchlassgrad mit Sonnenschutz
IDA	Raumluftqualitätskategorie (nach SIA 382/1)
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
LCC	Lebenszykluskosten
LSV	Lärmschutzverordnung
NGF	Nettogrundfläche
NL	Nachtlüftung
ppm	parts per million
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenario)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
THGE	Treibhausgasemissionen
Topr.	Operative Temperatur
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
WRG	Wärmerückgewinnung
WWR	Window-to-Wall-Ratio

1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Der Bedarf an neuem oder angepasstem Schulraum ist in den nächsten Jahren gross, während zunehmende Hitzeperioden den sommerlichen Wärmeschutz vor neue Herausforderungen stellen. Das Projekt evaluiert Low-Tech-Fassaden sowie passive Lüftungs- und Kühlkonzepte für Schulräume im Kontext der Netto-Null-Ziele.

Eine FHNW-interne Vorstudie hat Erkenntnisse zum Einfluss natürlicher Lüftung und feststehender Verschattung erarbeitet. Darauf aufbauend werden verschiedene Low-Tech-Konzepte hinsichtlich Treibhausgasemissionen, thermischer Behaglichkeit und Raumluftqualität bewertet und konventionellen Systemen gegenübergestellt. Dynamische Simulationen prüfen die Leistungsfähigkeit unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen. Die Untersuchungen umfassen Neubauten und die Nachrüstung bestehender Bauten.

1.2 Projektziel

Das Projekt zielt auf den systematischen Vergleich von Low-Tech- und konventionellen Konzepten für Schulbauten. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Analyse von Fallbeispielen aus dem Kanton Basel-Stadt. Die Erkenntnisse fliessen in eine praxisorientierte Entscheidungshilfe ein, die Planende und Bauherrschaften bei der Wahl geeigneter Konzepte unterstützt.

Das Projekt gliedert sich in acht Arbeitspakete:

AP 1: Projektmanagement und Koordination

AP 2: Literaturrecherche, Experteninterviews, Best-Practice

AP 3: Fallbeispiele – Analyse und Simulation von Optimierungsmassnahmen

AP 4: Definition, Simulation und Analyse weiterer Parameter

AP 5: Einfluss auf Gestaltung und Materialisierung

AP 6: THGE-Bilanzierung für Erstellung und Betrieb

AP 7: Kostenanalyse

AP 8: Entscheidungshilfe, Wissensvermittlung und Dissemination

2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchung analysiert bauphysikalische, normative und klimatische Rahmenbedingungen sowie deren Wechselwirkungen. Das methodische Vorgehen kombiniert die Recherche des Stands der Technik und der normativen Grundlagen, die Analyse von Fallbeispielen aus dem Kanton Basel-Stadt und dynamische Gebäudesimulationen zur Untersuchung verschiedener Massnahmen.

Die Abschnitte 2.1 bis 2.3 erläutern Begriffsdefinitionen, Systemabgrenzungen sowie klimatische und normative Anforderungen. Die Abschnitte 2.4 bis 2.6 behandeln bauphysikalische Einflussgrössen, Lüftungsstrategien sowie Systemgrenzen. Die Abschnitte 2.7 bis 2.9 fassen die Grundlagen zu Planungsrichtwerten zusammen, zeigen aus Fallbeispielen abgeleitete Sofortmassnahmen auf und diskutieren erste Simulationsergebnisse für ein Referenzklassenzimmer.

2.1 Grundlagen, Begriffsdefinitionen und Systemabgrenzungen

Dieser Abschnitt fasst den aktuellen Stand der Technik, Normung und Forschung zusammen. Er bildet die Basis für den weiteren Projektverlauf.

2.1.1. Low-Tech-Konzepte und konventionelle Referenzsysteme

Das Projekt PassiveClimateSchool untersucht die Potenziale und Grenzen von Low-Tech-Konzepten im Vergleich zu konventionellen Lösungen. Das Leitprinzip lautet «so viel Technik wie sinnvoll» [1]. Low-Tech und konventionelle Ansätze sind nicht klar abgegrenzt. Auch konventionelle Konzepte können Low-Tech-Elemente enthalten.

Low-Tech-Konzepte gewährleisten Behaglichkeit und Raumluftqualität vorwiegend durch bauphysikalische Massnahmen [1]. Der Einsatz von Gebäudetechnik wird auf das notwendige Minimum reduziert. Typische Merkmale sind:

- Nutzung thermischer Speichermasse von Wänden, Böden und Decken zur Dämpfung von Temperaturspitzen.
- Natürliche/Hybride Lüftung durch Öffnungen der Gebäudehülle ermöglichen Frischluftzufuhr und nächtliche Regeneration der Speichermasse.
- Bewegliche, aussenliegende Verschattung – gegebenenfalls ergänzt durch feststehende Elemente – begrenzt die solaren Wärmeeinträge. Systemtrennung zwischen Primärsystem (Tragwerk), Sekundärsystem (Hülle und Ausbau) und Tertiärsystem (Technik), um unterschiedliche Lebenszyklen zu entkoppeln und die Anpassungsfähigkeit zu erhöhen.

Die technischen Komponenten sind einfach und robust ausgelegt; Wartungs- und Unterhaltskosten bleiben gering. Low-Tech schliesst eine Automatisierung nicht aus. Es werden einfache Steuerungen für natürliche Auskühlung, wettergeführte Sonnenschutzsteuerung oder CO_2-Ampeln als Feedback-Instrumente eingesetzt, sofern sie robust und lokal übersteuerbar sind. Low-Tech-Konzepte setzen auf aktive Mitwirkung der Nutzenden und können eine erhöhte Temperaturtoleranz an Hitzetagen erfordern.

Konventionelle Systeme setzen auf leistungsfähige Gebäudetechnik, um normative Anforderungen unabhängig von baulichen Randbedingungen zu erfüllen. Charakteristisch sind:

- Mechanische Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung zur Einhaltung der Luftqualitätsanforderungen.
- Zunehmend aktive Kühlung (z.B. Kältemaschinen, reversible Wärmepumpen) zur Temperaturbegrenzung im Sommer.
- Bewegliche Aussenverschattung, zentral gesteuert über Gebäudeleittechnik.

Die Lebensdauer der technischen Anlagen ist deutlich kürzer als die Nutzungsdauer der Tragstruktur, was zu wiederkehrenden Ersatzinvestitionen im Lebenszyklus des Gebäudes führt.

Die Unterschiede zwischen konventionellen Systemen und Low-Tech-Ansätzen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Konventionelle Systeme sind breit einsetzbar, verursachen jedoch einen höheren Betriebsenergiebedarf, Wartungsaufwände und Ersatzinvestitionen. Low-Tech-Konzepte können Betriebsenergie und Wartung reduzieren, erfordern aber optimierte bauliche Voraussetzungen sowie aktive und gut geschulte Nutzende. Low-Tech-Konzepte stossen bei ungünstigen Randbedingungen an physikalische und organisatorische Grenzen. Diese Grenzen werden in den APs 3 bis 7 untersucht.

Tabelle 1: Vergleich von konventionellen Systemen und Low-Tech-Konzepten

Kriterium	Konventionelle Systeme	Low-Tech-Konzepte
Komfortanforderungen	Enge Toleranzbänder, technisch garantiert	Erweiterte Toleranz, abhängig von Nutzerakzeptanz
Abhängigkeit von Randbedingungen	Gering, breit einsetzbar	Hoch (Raumgeometrie, Speichermasse, Lärmsituation, Ausrichtung)
Lüftung	Mechanische Lüftung mit WRG, teilweise Vollklimatisierung	Manuelle Lüftung, automatisierte Lüftungsöffnungen, Hybride Systeme, natürliche Schachtlüftung
Kühlung	Aktive Systeme (Kühldecken, Kühlung über Bodenheizung, Kältemaschinen), schnelle Reaktionszeit	Passive Nutzung thermischer Masse, natürliche Auskühlung, hohe Trägheit
Steuerung	Vollautomatisiert, zentrale Gebäudeleittechnik, prädiktive Regelung	Reduzierte Automation, aktive Nutzermitwirkung, lokal übersteuerbar
Energiekonzept	Maximierung der Effizienz durch Technik	Minimierung des Bedarfs durch bauphysikalische und nutzungsseitige Optimierung
Systemarchitektur	Integration und Verstecken von Installationen in Bauteilen	Systemtrennung, sichtbare oder zugängliche Installationen
Wartungsintensität	Hoch (Filterwechsel, Hygieneinspektionen, Software-Updates)	Niedrig bis mittel (Stellmotoren, Sensoren)
Fehlertoleranz Technikausfall	Gering (Komplexität, Abhängigkeit von Steuerung und Wartung)	Hoch (wenige störungsanfällige Komponenten)
Fehlertoleranz Nutzerverhalten	Hoch (automatisiert, nutzerunabhängig)	Gering (aktive Mitwirkung erforderlich)
Lebenszyklus Technik	15-25 Jahre, wiederholte Ersatzinvestitionen erforderlich	40-60 Jahre, minimale Ersatzinvestitionen, 15-25 Jahre für Komponenten Teilautomatisierung
Planungsaufwand	Standardisiert, konventionelle Auslegung	Hoch, dynamische Simulationen und integrale Planung erforderlich

2.1.2.Neubau und Bestandssanierung

Es werden Konzepte für Neubauten und Sanierungen bestehender Schulgebäude untersucht. Neubauten ermöglichen optimale Raumgeometrie, Speichermasse, Ausrichtung und Lüftungsöffnungen. Bestandsbauten unterliegen fixen Raumhöhen, Orientierungen und begrenzter Speichermasse.

Der Schweizer Schulbaubestand weist eine heterogene Altersstruktur auf. Im Projekt werden sechs Bauepochen unterschieden, die durch je ein Fallbeispiel repräsentiert werden (vgl. Kapitel 2.8). Typische Gebäude dieser Epochen sind in Abbildung 1 dargestellt.

- vor 1919: Gründerzeitbauten mit massiven Mauerwerkskonstruktionen, hohen Raumhöhen (oft > 4 m), grossen öffenbaren Fensterflügeln und guter thermischer Speichermasse. Häufig denkmalgeschützt.
- 1919-1945: Massive Bauweise, oft reduzierte Raumhöhen gegenüber der Gründerzeit, aussenliegende Sonnenschutzsysteme (Ausstellmarkisen).
- 1946-1960: Nachkriegsmoderne mit Stahlbetonkonstruktionen, grossen Fensterflächen, Fensteranteile ca. 30 % der Fassadenfläche, teils bereits Flachdächer.
- 1961-1980: Zunehmende Wärmedämmung, häufig abgehängte Akustikdecken, wodurch Speichermasse entkoppelt wird. Teilweise innenliegende Sonnenschutz- bzw. Blendschutzsysteme.
- 1981-2000: Hohe Fensteranteile (z.T. > 50 %), aussenliegende Rafflamellen verbreitet, manuelle Fensterlüftung weiterhin Standard.
- ab 2001: gute bis sehr gute Wärmedämmung, teilweise mit mechanischer Lüftung, aussenliegende Stoffstoren oder Rafflamellen, z.T. Lüftungsflügel für natürliche Auskühlung.

Die Übertragbarkeit von Low-Tech-Konzepten auf den Bestand variiert je nach Bauepoche. Die Eingriffstiefen werden in Kapitel 2.6.4 behandelt.



Abbildung 1: Typische Bauweisen von Schulen als Vertreter für verschiedene Bauepochen
Quellen:
www.ausserdorf.ch/unsere-schule/,
www.stadt-zuerich.ch/schulen/de/manegg/ueberuns/portrait/geschichte.html,
www.schule-muenchenstein.ch/primar/4105, www.schule-ilef.ch/schulhaeuser/4012,
de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schul-_und_Gemeindehaus_Mastrils_S%C3%BCdseite4.jpg,
www.tamaratschopp.ch/dropdown/nov-18-schulhaus-birch-z%C3%BCrich

2.1.3. Charakterisierung nach Schulstufen

Die Anforderungen an Low-Tech-Konzepte variieren je nach Schulstufe, bedingt durch die unterschiedliche physiologische Wärmeabgabe der Nutzenden und die Organisationsstrukturen (Tabelle 2).

- Primarschulen stellen aufgrund der geringeren metabolischen Wärmeleistung der Kinder und der auf den Vormittag konzentrierten Nutzungszeiten die geringsten thermischen Anforderungen.
- In Sekundarschulen steigt die Wärmelast pro Person auf Erwachsenenniveau, während sich die Nutzungszeiten bis in die thermisch kritischen späten Nachmittagsstunden ausdehnen.
- Gymnasien und Berufsschulen weisen die höchsten internen Lasten und längsten Nutzungszeiten auf. Eine spezifische Herausforderung sind hier 90-minütige Doppellektionen, die bei rein manueller Fensterlüftung Lüftungspausen während der Unterrichtszeit erfordern.

Lösungen, die für Sekundarschulen und Gymnasien funktionieren, decken die Anforderungen von Primarschulen automatisch mit ab. Der Fokus der Low-Tech-Entwicklung liegt daher auf den thermisch anspruchsvolleren Sekundarstufen.

Tabelle 2: Charakteristika nach Schulstufen

Parameter	**Primarstufe**	**Sekundarstufe**	**Gymnasium**
Alter [Jahre]	6-12	12-16	15-20
Klassengrösse [Personen]	16-25	16-25	16-25
Metabolische Last [W/P]	60-90	80-120	85-140
Nutzungszeiten	08:00-16:00	08:00-17:30	08:00-18:00
Lektionenlänge [min]	45	45	90 (Doppel)
Thermische Anforderung	moderat	erhöht	hoch

Die metabolische Last in der Simulation liegt am oberen Rand des hier angegebenen Bereichs für die Sekundarstufe und stellt eine konservative Annahme dar.

Die Angabe der Richtgrösse der Klassengrössen basiert auf einer Kantonsumfrage der Konferenz der kantonalen Erziehungsdirektorinnen und -direktoren (EDK) [2]. Die metabolischen Leistungswerte in Klassenzimmern sind abgeleitet aus [3][4]. Für Kinder im Primarschulalter ist zu berücksichtigen, dass die metabolische Leistung im Verhältnis zur Körperoberfläche überproportional hoch sein kann

2.2 Klimatische und normative Rahmenbedingungen

Low-Tech-Konzepte müssen normative Anforderungen erfüllen. Die folgenden Abschnitte fassen relevante Anforderungen zusammen und leiten die Auswirkungen für passive Lüftungs- und Kühlstrategien ab.

2.2.1. Thermischer Komfort

SIA 180:2014 [5] definiert die Anforderungen an den thermischen Komfort in Aufenthaltsräumen. Die Bewertung erfolgt anhand der empfundenen Temperatur (operative Temperatur als Mittelwert aus Luft- und Strahlungstemperatur) während der gesamten Nutzungszeit. Die Norm unterscheidet zwischen Räumen mit natürlicher Lüftung und Räumen mit aktiver Kühlung oder mechanischer Belüftung, da

unterschiedliche physiologische Anpassungsmechanismen der Nutzenden zu unterschiedlichen Komforterwartungen führen.

Für Räume mit natürlicher Lüftung definiert die SIA 180:2014 einen adaptiven Komfortbereich. Der zulässige Temperaturbereich ist an den gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über die vorangegangenen 48 Stunden gekoppelt und ermöglicht damit höhere Raumtemperaturen im Sommer als bei maschinell gekühlten Räumen (Abbildung 2 und Abbildung 3). Diese erweiterte Toleranzbandbreite bildet die Voraussetzung für den Verzicht auf aktive Kühlung in Low-Tech-Konzepten. Für die Simulationen werden die Grenzkurven der SIA 180:2014 in Abhängigkeit des Kühlkonzepts verwendet. Der Nachweis gilt als erbracht, wenn die Stundenmittelwerte der operativen Temperatur während der Nutzungszeiten die obere Grenzkurve nur innerhalb der in SIA 380/2:2022 [6] definierten Toleranz für die Bedarfsabklärung (100 h/a Neubau, 400 h/a Bestand) überschreiten. Für Low-Tech-Konzepte im Neubau bildet die 100-Stunden-Grenze nach SIA 380/2:2022 das Kriterium für die Bedarfsabklärung aktiver Kühlung. Wird diese Grenze eingehalten, ist gemäss Norm keine vertiefte Abklärung des Kühlbedarfs erforderlich.

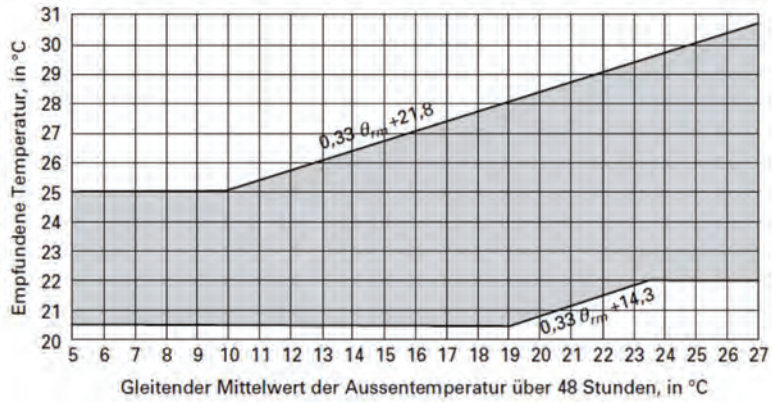


Abbildung 2: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Räumen ohne maschinelle Kühlung, je nach dem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur. Quelle: SIA 180:2014 (Korrigenda C2, 2020)

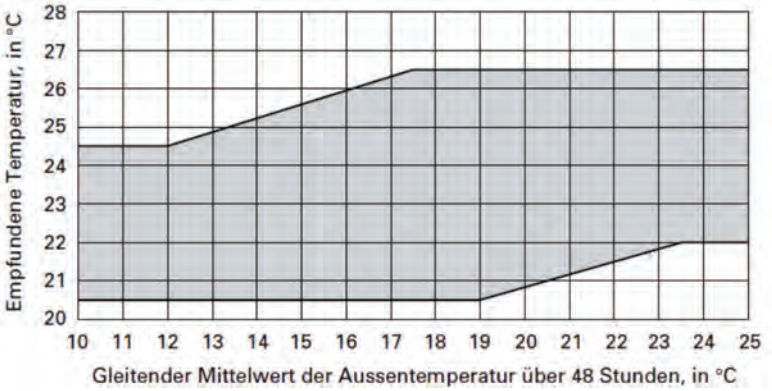


Abbildung 3: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen mit natürlicher oder mechanischer Lüftung, während diese beheizt oder maschinell gekühlt sind, je nach gleitendem Mittelwert der Aussentemperatur. Quelle: SIA 180:2014 (Korrigenda C2, 2020)

2.2.2.Raumluftqualität und CO_2-Pegel

Die Raumluftqualität wird primär über die CO_2-Konzentration bewertet, die mit Personenbelegung, Gerüchen und Aerosolen korreliert. Grundlage bilden die in Tabelle 3 zusammengefassten Anforderungs- und Empfehlungswerte.

Die SIA 180:2014 definiert hierfür absolute Grenzwerte, während die SIA 382/1:2025 [7] für mechanisch belüftete Räume Qualitätsstufen (IDA) unterscheidet. Für Schulräume ist IDA 3 als Mindeststandard, bei erhöhten Anforderungen IDA 2 anzustreben. Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) differenziert zwischen der Bewertung bestehender Schulbauten mit natürlicher Lüftung und Empfehlungen für Neubauten und sanierte Schulhäuser [8].

Tabelle 3: Übersicht der normativen Anforderungen und Empfehlungen zur CO_2-Konzentration

Normen und Empfehlungen	**Kategorie**	**Raumluftqualität**	**Bereich der CO_2-Konzentration in der Raumluft ppm**	
SIA 180:2014		sehr gut bis gut	< 1’000	Momentanwert
		hygienisch auffällig	1’000 – 2’000	Momentanwert
		inakzeptabel	> 2’000	Momentanwert
SIA 382/1:2025*	IDA 1 (CO_2)	hoch	> 400 - 950	
	IDA 2 (CO_2)	mittel	950 - 1’200	
	IDA 3 (CO_2)	mässig	1'200 - 1’750	
	IDA 4 (CO_2)	niedrig	> 1’750	
BAG	Bestandsgebäude	hervorragend	< 1’000	Momentanwert
		gut	1’000 – 1’400	Momentanwert
		genügend	1’400 – 2’000	Momentanwert
		inakzeptabel	> 2’000	Momentanwert so weit wie möglich vermeiden
BAG	Zielwert für Neubau und Sanierung		< 1’400	Momentanwert nicht überschreiten

*Annahme 400 ppm CO_2-Konzentration der Aussenluft

Die schweizerischen Empfehlungen ordnen sich im internationalen Vergleich im Mittelfeld ein. Das deutschen Leitwertkonzept des Umweltbundesamtes [9] stuft Werte bis 1'000 ppm als hygienisch unbedenklich ein (als Mittelwert über eine Unterrichtseinheit). EN 16798-1:2019 [10] legt Auslegungswerte für mechanische Lüftungssysteme als Δ-CO_2 über dem Aussenniveau fest. Kategorie I (empfohlen für Kinder) erlaubt 550 ppm über Aussen (ca. 950 ppm absolut), Kategorie II 800 ppm (ca. 1'200 ppm). Die ASHRAE 62.1 [11] nennt ebenfalls als Auslegungswert für mechanische Lüftung 700 ppm über Aussen (ca. 1'100 ppm).

CO_2-Konzentrationen von 1'500–3'000 ppm mindern die kognitive Leistung um 15–20 % [12], [13]. BAG-Feldmessungen in 100 Schulzimmern zeigen, dass manuelle Lüftung diese Werte oft verfehlt [14]. In

zwei Dritteln der untersuchten Räume wird der Grenzwert von 2’000 ppm mehr als 10 % der Unterrichtszeit überschritten. Undichte Altbauten weisen tendenziell bessere Luftqualität auf als energetisch sanierte, dichte Gebäude. Daher ist die Erstellung eines funktionierenden Lüftungskonzepts bei energetischen Ertüchtigungen zwingend notwendig. Charakteristisch ist die zunehmende Verschlechterung im Verlauf des Schultags (Abbildung 4). Hauptursachen sind zu kurze oder vergessene Lüftungsintervalle oder vermiedene Fensteröffnung aufgrund von Lärm und zu kalten bzw. zu warmen Aussenlufttemperaturen oder Kälte. Die anschliessende Interventionsstudie belegt jedoch, dass strategisches Pausenlüften den Anteil guter Luftqualität von 40 auf 70 % der Unterrichtszeit steigern kann [14]. Bei unzureichender Luftqualität treten neben einer reduzierten Leistungsfähigkeit auch Schleimhautreizungen, Kopfschmerzen, Müdigkeit und Konzentrationsstörungen auf [15].

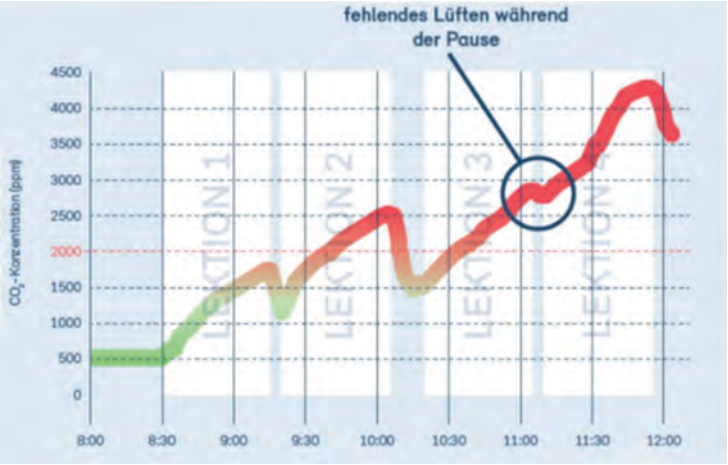


Abbildung 4: CO_2-Verlauf in einem Schulzimmer bei manueller natürlicher Fensterlüftung während eines Schulvormittags bei unzureichender Pausenlüftung. Dies führt zu Werten über 2000 ppm. Quelle: BAG

Der Unterschied zwischen den Anforderungen und realem Nutzerverhalten ist eine Herausforderung für Low-Tech-Konzepte. Ob organisatorische Massnahmen und Feedbacksysteme (CO_2-Ampeln) ausreichen, um die Lufthygiene zu sichern, oder ob hybride und konventionelle Konzepte erforderlich sind, wird in AP 3 anhand der Messdaten validiert und in den Parameterstudien AP 4 untersucht.

2.2.3.Lüftungsöffnungen und Volumenströme für natürliche und mechanische Lüftung

Die normativen Anforderungen an freie Strömungsflächen natürlicher Lüftungsöffnungen sowie an Aussenluftvolumenströme für mechanische und natürliche Lüftungssysteme werden in den Normen SIA 180:2014 und SIA 382/1:2025 definiert. Tabelle 4 fasst die für Schulräume relevanten Grenz- und Richtwerte zusammen, die als Grundlage für die Auslegung und Bewertung der Varianten in den AP 3 und 4 dienen.

Tabelle 4: Zusammenfassung Lüftungsanforderungen

Parameter	**Wert**	**Anwendung**	**Norm**
Aussenluftstrom IDA 1	36 m³/(h·P)	Hohe Raumluftqualität	SIA 382/1:2025
Aussenluftstrom IDA 2	25 m³/(h·P)	Mittlere Raumluftqualität	SIA 382/1:2025
Aussenluftstrom IDA 3	15 m³/(h·P)	Mässige Raumluftqualität	SIA 382/1:2025
Aussenluftstrom Schulräume	29 m³/(h·P)	Lüftung	SIA 2024:2021 [16]
Freie Strömungsfläche	5 % NGF	Natürliche Lüftung	SIA 180:2014
Volumenstrom natürliche Auskühlung	10 m³/(h·m² NGF)	Passive Kühlung	SIA 180:2014
Durchflussbeiwert Drehflügel	0.60–0.70	Öffnungsauslegung	EN 16798-7:2017:
Durchflussbeiwert Kippfenster	0.10–0.20	Öffnungsauslegung	EN 16798-7:2017:

Anforderungen an die freie Strömungsfläche natürlicher Lüftungsöffnungen nach SIA 180:2014 bezieht sich auf die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche unter Berücksichtigung der Durchflussbeiwerte nach Öffnungstyp. Die deutlich geringere Wirksamkeit von Kippfenstern macht diese für die Stosslüftung in Schulpausen ungeeignet.

2.2.4. Treibhausgasemissionen und Lebenszyklusbetrachtung

Die SIA 390/1:2025 [17] definiert Anforderungen an die Treibhausgasemissionen von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus von 60 Jahren. Die Bilanzierung umfasst sämtliche Emissionen aus Erstellung, Erneuerung und Entsorgung der Bauteile sowie aus dem Gebäudebetrieb. Für Schulneubauten legt die Norm zwei Richtwerte fest, die unterschiedliche Ambitionsniveaus abbilden und als Planungsvorgaben dienen (Tabelle 5). Richtwert B bildet die Basisanforderung, der ambitionierte Richtwert A orientiert sich an den Netto-Null-Zielen bis 2050.

Tabelle 5: Anforderungen SIA 390/1:2025 für die Gebäudekategorie Volksschule, bezogen auf ein Jahr und die Energiebezugsfläche A_E. Die Richtwerte sind informativ. [17]

VOLKS-SCHULE	Richtwerte jährliche Treibhausgasemissionen kg/m²			Anforderungen jährliche Treibhausgasemissionen kg/m²	
Basis	Erstellung	Betrieb	Mobilität	Zielwert B	Zusatzanforderung B
Umbau	5,0	4,0	3,0	12,0	9,0
Neubau	9,0	2,0	3,0	14,0	11,0
Ambitioniert	Erstellung	Betrieb	Mobilität	Zielwert A	Zusatzanforderung A
Umbau	4,0	3,0	2,0	9,0	7,0
Neubau	6,0	3,0 1,0	2,0		

Die Bilanzierung der Erstellung erfasst die grauen Emissionen aus der Herstellung sämtlicher Baumaterialien, den wiederkehrenden Ersatzinvestitionen über 60 Jahre entsprechend den technischen Nutzungsdauern der Komponenten sowie der Entsorgung am Ende der Lebensdauer. Die Bilanzierung der Betriebsphase erfasst die Emissionen aus dem Energiebedarf für Heizung, Lüftung, Kühlung, Hilfsenergie sowie die Warmwasseraufbereitung über die gesamte Nutzungsdauer.

Die KBOB-Ökobilanzdaten im Baubereich [18] bilden die Datengrundlage mit Datensätzen für Baumaterialien, Bauteile und Energieträger. Die Bilanzierungsmethodik folgt SIA 2032:2020 [19] und SIA 390/1:2025. Für spezifische Low-Tech-Komponenten wie automatisierte Lüftungsflügel mit motorisierten Antrieben sowie feststehende Verschattungssysteme weist die Datenbank Lücken auf. Die Erstellung entsprechender Datensätze erfolgt in AP 6.

Die vergleichende Bewertung von Low-Tech-Konzepten und konventionellen Referenzsystemen basiert auf dem direkten Vergleich der summierten Emissionen aus Erstellung und Betrieb über 60 Jahre. Die Arbeitshypothese lautet, dass Low-Tech-Ansätze durch reduzierte graue Emissionen und geringere Betriebsenergiebedarfe zu tieferen Gesamtemissionen führen. Mit fortschreitender Dekarbonisierung des Strommixes rücken die grauen Emissionen der wiederkehrenden Ersatzinvestitionen bei konventionellen Systemen in den Fokus.

2.2.5. Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung von Low-Tech-Konzepten im Vergleich zu konventionellen Systemen erfolgt über eine Lebenszykluskostenanalyse gemäss SIA 480:2016 über einen Betrachtungszeitraum von 60 Jahren unter Anwendung der Barwertmethode. Der gewählte Diskontierungssatz hat massgeblichen Einfluss auf das Ergebnis, da Low-Tech-Konzepte typischerweise höhere Anfangsinvestitionen in die Gebäudestruktur zugunsten niedrigerer Betriebs- und Ersatzkosten aufweisen. Für öffentliche Bauten begünstigen niedrige Diskontierungssätze von 1.5 bis 2.5 % langlebige Strategien.

Die detaillierte Kostenanalyse sowie Sensitivitätsanalysen zu Energiepreisen, Diskontierungssätzen und Nutzungsdauern erfolgen in AP 7. Die Ergebnisse fliessen gemeinsam mit der THGE-Bilanzierung aus AP 6 in die ganzheitliche Bewertung der Entscheidungshilfe ein.

2.2.6. Akustik, Lärmschutz und weitere Anforderungen

Raumakustische Anforderungen an Unterrichtsräume erfordern niedrige Nachhallzeiten zur Sicherstellung der Sprachverständlichkeit. Die künftige Norm SIA 181/1 (prSIA 181/1:2024-04), definiert für Unterrichtsräume (Nutzungsart 1c) volumenabhängige Soll-Nachhallzeiten; für ein typisches Klassenzimmer von 200 m³ ergibt sich ein Zielwert von ca. 0.5 s. Dies erfordert schallabsorbierende Oberflächen, was einen Zielkonflikt mit der thermischen Aktivierung massiver Bauteile darstellen kann. Abgehängte Akustikdecken oder grossflächige Wandabsorber reduzieren die für passive Kühlstrategien nutzbare Speichermasse. Die Planung erfordert daher eine Berücksichtigung akustischer und thermischer Anforderungen.

Die Lärmschutzverordnung (LSV) regelt zulässige Lärmbelastungen in Abhängigkeit von Lärmquelle, Empfindlichkeitsstufe sowie Tag-/Nachtperiode. Bei geöffneten Fenstern kann der Innenpegel je nach Öffnungsgrad und Aussenlärmbelastung um 15 bis 25 dB ansteigen, was natürliche Lüftungsstrategien an lärmbelasteten Standorten einschränkt (vgl. Kapitel 2.6.1).

Die Brandschutzvorschriften nach der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) regulieren die Anforderungen an Bauteile, Rauch- und Wärmeabzug sowie die Brandbeständigkeit von Lüftungsöffnungen. Automatisierte Lüftungsöffnungen in brandabschnittsbildenden Bauteilen müssen die erforderliche Feuerwiderstandsdauer aufweisen oder durch selbstschliessende Brandschutzklappen ergänzt werden. Der Einbruchschutz bei Öffnungen für die natürliche Auskühlung erfordert einbruchhemmende Gitter oder die Anordnung der Öffnungen in unzugänglicher Höhe oberhalb von 3.5 Metern.

2.2.7. Zusammenfassung normative Werte und Empfehlungen

Die Auswirkungen dieser Anforderungen für Low-Tech-Konzepte, insbesondere der Zielkonflikt zwischen raumakustischen Anforderungen und der thermischen Aktivierung von Speichermassen sowie die Einschränkungen natürlicher Lüftung an lärmbelasteten Standorten, werden in den Abschnitten 2.4.5 und 2.6.1 behandelt. Die projektspezifischen Planungsrichtwerte für die Simulationen, die aus den normativen Grundlagen abgeleitet wurden, sind im Anhang (Tabelle 12) zusammengestellt.

2.3 Klimaszenarien CH2018 und Auswirkungen auf passive Kühlkonzepte

Die Wirksamkeit passiver Kühlkonzepte hängt von nächtlichen Temperaturdifferenzen ab, da natürliche Auskühlung auf der Regeneration der Speichermasse basiert. Im Folgenden werden die relevanten Klimaszenarien und deren Auswirkungen auf passive Konzepte dargestellt.

Die Klimaszenarien CH2018 von MeteoSchweiz [16] bilden die Grundlage für die Bewertung zukünftiger Klimabedingungen. Für die Nordschweiz projizieren sie unter dem Emissionsszenario RCP8.5 für die Periode 2045–2074 (im Folgenden vereinfacht als «Zukunftsklima 2060» bezeichnet) einen Anstieg der mittleren Jahrestemperatur um 2.0 bis 3.5 K gegenüber der Referenzperiode 1981–2010, mit einem Medianwert von etwa 2.5 K. Für den sommerlichen Wärmeschutz sind insbesondere die Veränderungen der Extremwerte relevant: Die Anzahl der Hitzetage (T_{max} > 30 °C) und der Tropennächte (T_{min} > 20 °C) nimmt deutlich zu (Abbildung 5).

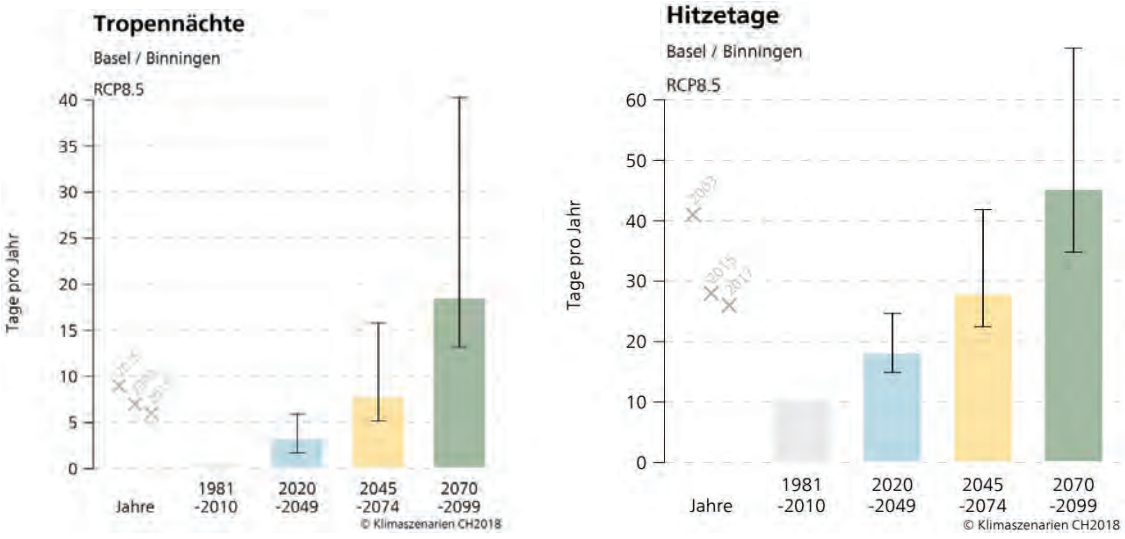


Abbildung 5: Projektion der Tropennächte T_{min} > 20 °C (links) und Hitzetage T_{max} > 30 °C (rechts) für Basel/Binningen gemäss Klimaszenarien CH2018 (RCP8.5). Vertikale Linien: Modellunsicherheit. Quelle: [20]

Kritisch für passive Kühlkonzepte ist die Zunahme der Tropennächte. In der Referenzperiode traten in Basel durchschnittlich ein bis zwei Tropennächte pro Jahr auf. Für das Zukunftsklima 2060 werden unter RCP8.5 im Median acht Tropennächte projiziert, wobei die Bandbreite je nach Klimamodell von drei bis über zwanzig Nächten reicht. An diesen Nächten sinkt die Aussentemperatur nicht unter 20 °C, wodurch die für die natürliche Auskühlung erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Aussenluft deutlich reduziert wird.

Die mittlere Tagesamplitude – die Differenz zwischen Tagesmaximum und -minimum – sinkt im Sommer von heute 10–12 K auf etwa 8–10 K. Diese Reduktion begrenzt das Potenzial der Nachtauskühlung direkt, da weniger Wärme aus der Speichermasse abgeführt werden kann (vgl. Kapitel 2.5.2). Besonders kritisch sind mehrtägige Hitzeperioden mit aufeinanderfolgenden Tropennächten, während derer sich die Speichermasse kumulativ auflädt und ihre dämpfende Wirkung verliert.

Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass die Klimaprojektionen auf Daten der Messstation Basel/Binningen basieren, die ausserhalb des urbanen Kerns liegt. Der städtische Hitzeinseleffekt, der in dicht bebauten Quartieren zu Temperaturerhöhungen von 2 bis 5 K gegenüber dem Umland führen kann, ist in diesen Daten nicht abgebildet. Für innerstädtische Schulstandorte unterschätzen die projizierten Werte daher sowohl die Tagesmaxima als auch die nächtlichen Minima. Die Frage, inwieweit alternative Messstationen wie Basel Klingenberg den urbanen Effekt besser repräsentieren, wird im weiteren Projektverlauf geprüft.

Eine zentrale Forschungsfrage des Projekts lautet, ob erhöhte Speichermassen, optimierte Verschattung und ergänzende Komfortmassnahmen wie Deckenventilatoren diese Extrembedingungen ausreichend kompensieren können oder ob hybride Systeme mit minimaler aktiver Kühlung erforderlich werden. Die dynamischen Simulationen in AP 4 untersuchen die Leistungsfähigkeit der Low-Tech-Varianten sowohl unter heutigen Klimabedingungen als auch unter dem Zukunftsklima 2060, wobei typische Hitzewellen mit aufeinanderfolgenden Tropennächten abgebildet werden.

Für die weiteren Simulationen ist vorgesehen, die aktualisierten Klimaszenarien CH2025 zu integrieren, sobald stündliche Datensätze für dynamische Gebäudesimulation verfügbar sind.

2.4 Bauphysikalische und architektonische Einflussfaktoren

Durch Low-Tech-Konzepte sollen die normativen Zielgrössen aus Kapitel 2.2 durch bauphysikalische und architektonische Massnahmen anstelle konventioneller Gebäudetechnik erreicht werden. Die Wirksamkeit basiert auf drei Grundprinzipien des sommerlichen Wärmeschutzes: Reduktion der Wärmelasten durch moderate Glasflächen, effektiven Sonnenschutz und Minimierung interner Quellen, Zwischenspeicherung in der thermischen Masse zur Dämpfung von Temperaturspitzen sowie effiziente Wärmeabfuhr durch konsequente Nacht- und Morgenlüftung. Die folgenden Abschnitte behandeln diese Einflussfaktoren.

2.4.1. Gebäudeausrichtung und solare Einstrahlung

Solare Wärmeeinträge hängen von Orientierung und Sonnenstand ab. Dies beeinflusst Wärmelasten und Lüftungseffektivität durch unterschiedlich erwärmte Aussenluft (Tabelle 6). Die Analyse der Orientierungen zeigt, dass südorientierte Klassenzimmer mit beweglichem Sonnenschutz robuste thermische Eigenschaften aufweisen [1], während westorientierte Räume auch mit optimierter Verschattung kritische Überhitzungsstunden erreichen, was auch die Anforderungen nach SIA 180:2014 widerspiegelt [5]. Nordorientierte Klassenzimmer weisen minimale Kühllasten auf [21], können jedoch CO_2-Monitoring zur Sicherstellung ausreichender Lüftung erfordern.

Unter Klimaszenarien 2060 wird die Orientierung wichtiger als die Bauweise. Die unterschiedlich erwärmte Aussenluft gewinnt unter Extrembedingungen an Bedeutung. Lüftung über Nordfassaden bleibt auch bei Hitzewellen wirksamer als über Süd- oder Westfassaden. Die Bewertung in Tabelle 6 bezieht sich auf Belegungszeiten bis 18 Uhr (vgl. Tabelle 2, Gymnasium). Bei kürzeren Belegungszeiten bis 17 Uhr verschiebt sich das Bild: Die nachmittägliche Westeinstrahlung fällt dann teilweise ausserhalb der Nutzungszeit, während die morgendliche Osteinstrahlung voll in die Belegung fällt. Die Simulationsergebnisse differenzieren diesen Effekt.

Tabelle 6: Bewertung der Himmelsrichtungen für Low-Tech-Schulbauten

Orientierung	Einfallswinkel	Verschattung	Thermisches Risiko	Aussenlufttemperatur bei Lüftung	Eignung
Nord	Diffus, Direkte Sonne früh/spät im Hochsommer	Empfohlen je nach Umgebung (Reflektion) und für Hochsommer	Sehr gering	Kühlste Aussenluft	Klassenzimmer, Empfehlung
Süd	Steil mittags (65°), Flach vormittags/nachmittags, Flach im Winter (20°)	beweglicher Sonnenschutz, Feststehende Auskragung alleine nicht ausreichend	Mittel	Mässig erwärmt	Klassenzimmer, Empfehlung
Ost	Flach am Morgen	Vertikale bewegliche Storen zwingend	Mittel bis hoch	Kühle Morgenluft	Klassenzimmer bedingt geeignet, bevorzugt Nebenräume
West	Flach nachmittags, 15:00–18:00 Uhr	Vertikale bewegliche Storen zwingend	sehr hoch	Wärmste Aussenluft	Klassenzimmer vermeiden, möglichst nur Erschliessung, WC

2.4.2.Fensterflächenanteil

Für den Fenster- bzw. Glasflächenanteil existieren unterschiedliche Bezugsgrössen. Die SIA 180:2014 (Ziffer 1.1.6.2) definiert den Glasanteil f_g als Verhältnis der lichtdurchlässigen Glasfläche (ohne Rahmen) zur Fassadenfläche des Raumes. In der internationalen Literatur ist die Window-to-Wall-Ratio (WWR) gebräuchlich, die die gesamte Fensterfläche (inkl. Rahmen) auf die Fassadenfläche bezieht. Beide Kenngrössen sind fassadenbezogen, unterscheiden sich aber durch den Rahmenanteil (typisch 20–30 %).

Die SIA 180:2014 definiert in Verfahren 1 maximale Glasanteile f_g für einen vereinfachten Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes. Für die Kategorie «Büro, Versammlungsraum, Schule» betragen diese bei mittlerer Wärmespeicherfähigkeit 30 % (f_g, Fassadenbezug) und bei hoher Wärmespeicherfähigkeit 40 % an einer Fassade bzw. 30 % an mehreren Fassaden. Voraussetzung ist ein Sonnenschutz mit g_{tot} ≤ 0.10 und Windwiderstandsklasse 6 sowie eine wirksame Nachtauskühlung. In Verfahren 2 wird kein starrer Glasanteil-Grenzwert definiert, sondern die Anforderung an g_{tot} steigt mit zunehmendem Glasanteil und ungünstigerer Orientierung. Die Literaturanalyse identifiziert für natürlich belüftete Schulräume einen optimalen Bereich von 15–30 % WWR [21] [22]. Fensterflächenanteile über 40 % WWR korrelieren in natürlich belüfteten Gebäuden ohne aktive Kühlung mit signifikant erhöhten Überhitzungsstunden [22].

Der Zielkonflikt zwischen den Tageslichtanforderungen nach SN EN 17037 [23] und dem sommerlichen Wärmeschutz erfordert differenzierte Lösungen. Ein moderater Fensterflächenanteil WWR von 20 bis 30 % erfüllt bei niedrigen Sturzhöhen und heller Raumgestaltung die Tageslichtanforderungen, wobei für Nordfassaden >35 % WWR notwendig sein können [21]. Die Gliederung der Fassade in Sichtfenster für Tageslicht und visuelle Verbindung sowie Oberlichter für tiefe Tageslichtlenkung optimiert die Lichtverteilung bei begrenztem Gesamtflächenanteil.

Die Auswirkung verschiedener Fensterflächenanteile hängt von der Orientierung, der Verschattungsstrategie und der verfügbaren Speichermasse ab. Südorientierte Räume tolerieren höhere

Fensterflächenanteile als westorientierte Räume bei gleicher Verschattung. Massive Konstruktionen mit hoher Speichermasse dämpfen die Auswirkungen erhöhter solarer Einträge stärker als Leichtbaukonstruktionen. Die Untersuchung dieser Wechselwirkungen durch Parameterstudien in AP 4 ermittelt das Optimum für verschiedene Kombinationen von Orientierung, Fensterflächenanteil, Verschattung und Konstruktionstyp.

2.4.3.Verschattung

Aussenliegender beweglicher Sonnenschutz stellt die effektivste Massnahme zur Reduktion solarer Lasten durch Glasflächen dar. Aussenliegende Systeme fangen die Solarstrahlung vor der Verglasung ab und leiten die Wärme durch Konvektion nach aussen ab. Abbildung 6 zeigt verschiedene Aussenverschattungssysteme.

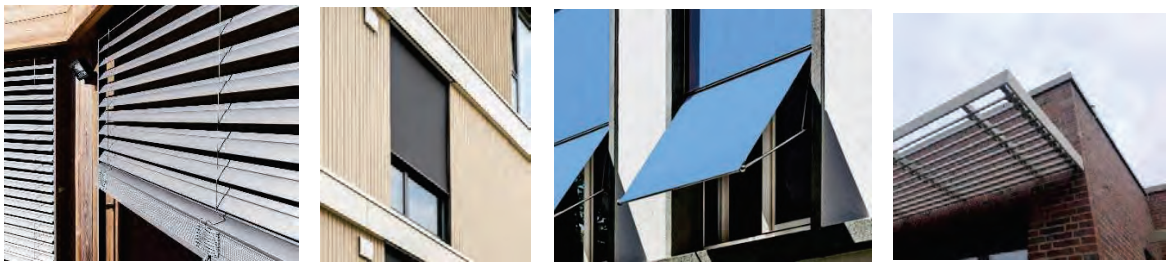


Abbildung 6: Lamellenstoren, textile Zip-Screen, Ausstellmarkise, Brise Soleil.
Quelle: Storen.ch, stolma.de, meiervilliger.ch, rotec-blog.de

Innenliegende Systeme erzeugen erhöhte Lufttemperaturen zwischen Verglasung und Behang. Der Abminderungsfaktor F_c quantifiziert den Anteil der verbleibenden Solarenergie im Vergleich zu unverschatteten Fenstern. Die Wahl des Verschattungssystems (Tabelle 7) bestimmt den thermischen und visuellen Komfort sowie die Lüftungsmöglichkeiten:

- Lamellenstoren ermöglichen durch verstellbare Winkel eine optimale Tageslichtlenkung bei gleichzeitigem Hitzeschutz.
- Textile Zip-Screens bieten durch die Reissverschlussführung die höchste Windstabilität und können auch bei Sturm geschlossen bleiben.
- Ausstellmarkisen erzeugen durch den ausgestellten unteren Bereich einen thermischen Kamineffekt und ermöglichen ungehinderte Lüftung.
- Feststehende Auskragungen bilden als wartungsfreie Basisstrategie einen robusten Schutz gegen die hochstehende Sommersonne (Südfassade), müssen jedoch für tiefstehende Sonnenstände durch bewegliche Systeme ergänzt werden.

Tabelle 7: Aussenliegende Verschattung

Kriterium	Lamellenstoren	Zip-Textilscreens	Ausstellmarkisen	Feststehende Auskragung
F_c-Wert [24], [25]	0.20-0.30	0.30	0.43–0.50	0.55
g_{tot} [26]	0.07–0.19	0.1–0.25	0.20–0.30	geometrieabhängig
Windwiderstands-klasse [24]	5–6	5–6	3–4	–
Tageslichtlenkung	Sehr gut	Eingeschränkt	Keine	Gering
Lüftung tagsüber	Möglich bei horizontaler Lamellenstellung	Blockiert	Ungehindert	Ungehindert
Natürliche Auskühlung	Horizontalstellung oder Hochfahren erforderlich	Hochfahren erforderlich	Ungehindert	Ungehindert
Wartungsintensität	Mittel bis hoch	Mittel	Mittel	Minimal
Low-Tech-Eignung	Gut mit natürlicher Lüftung	Bedingt wegen Lüftungskonflikt	Gut mit natürlicher Lüftung	Südfassade als Basis, nur zusammen mit beweglichem Sonnenschutz

Steuerung und Nutzerverhalten

Die Effektivität beweglicher Systeme hängt massgeblich von der Steuerung ab [22]. Die Diskrepanz zwischen Planungsannahmen und realem Nutzerverhalten wird in Kapitel 2.6.2 behandelt. Eine automatische Steuerung muss verschiedene Anforderungen berücksichtigen. Hitzeschutz erfordert geschlossene Verschattung, Tageslichtnutzung bevorzugt Lichtlenkung, natürliche Lüftung benötigt durchlässige Lamellenstellungen oder freie Fensteröffnungen. Für Schulbauten hat sich eine hybride Steuerung bewährt:.

- **Zentrale Steuerung:** Ausserhalb des Unterrichts fährt die zentrale Automation die Verschattung in die optimale Schutzposition.
- **Lokale Übersteuerung mit Reset:** Während des Unterrichts können Lehrpersonen die Verschattung durch lokale Übersteuerbarkeit situativ anpassen. Ein automatischer Reset in Intervallen von etwa 45–90 Minuten stellt die optimale Grundeinstellung wieder her und verhindert dauerhafte Fehlstellungen.
- **Natürliche Auskühlung:** Eine Automatisierung ist erforderlich, um Zip-Textilscreens hochzufahren oder Lamellen horizontal zu stellen, damit der freie Luftquerschnitt für die nächtliche Auskühlung gesichert ist.

Systemwahl und Low-Tech-Planungsstrategie

Die Low-Tech-Strategie priorisiert feststehende bauliche Verschattung zur Maximierung wartungsfreier Komponenten. Horizontale Vordächer, Loggien oder Laubengänge können Südfassaden während der Hochsommerperioden verschatten und bilden die thermische Basisstrategie. Feststehende Elemente allein reichen jedoch nicht aus. Bewegliche Systeme sind für einen wirksamen sommerlichen Wärmeschutz zusätzlich erforderlich.

Die Wahl des beweglichen Sonnenschutzsystems hängt von Orientierung, Windlast und Lüftungskonzept ab. An Westfassaden mit dem höchsten thermischen Risiko sind windstabile Systeme wie Zip-Screens oder hochwertige Lamellenstoren mit Windwiderstandsklasse 5 bis 6 zu bevorzugen. An Südfassaden ermöglichen Lamellenstoren durch die verstellbaren Lamellen eine optimale Tageslichtlenkung, gegebenenfalls in Kombination mit feststehender Basisverschattung.

Bei ausschliesslich natürlicher Lüftung über Fenster sind Lamellenstoren und Ausstellmarkisen vorzuziehen, da sie in geöffneter oder horizontaler Lamellenstellung den Luftaustausch ermöglichen. Bei mechanischer Lüftung ohne Fensteröffnung während der Nutzungszeit bieten windstabile Zip-Screens die höchste Betriebssicherheit. In beiden Fällen muss der Sonnenschutz auf das Konzept der nächtlichen Auskühlung abgestimmt werden, um ausreichenden Luftwechsel sicherzustellen (vgl. Kapitel 2.5.2).

2.4.4. Raumgeometrie

Für Klassenzimmer werden eine Mindestgrösse von 60 m² und eine lichte Raumhöhe von mindestens 3.00 m gefordert. Die Raumhöhe beeinflusst die Raumluftqualität und thermische Eigenschaften. Raumhöhen über 3.00 m vergrössern das Luftvolumen pro Person und verlängern so die Zeitspanne bis zum Erreichen kritischer CO_2-Konzentrationen bei gleicher Belegung. Zudem sammelt sich durch die Temperaturschichtung warme Luft oberhalb der Aufenthaltszone. Hochliegende Lüftungsöffnungen ermöglichen die gezielte Abfuhr durch thermischen Auftrieb. Die Effektivität der natürlichen Auskühlung steigt mit zunehmender Höhendifferenz zwischen Zu- und Abluftöffnungen.

Die Raumtiefe bei einseitiger Lüftung sollte gemäss SIA 180:2014 das 2.0- bis 2.5-fache der Raumhöhe nicht überschreiten. Bei 3.50 m Raumhöhe resultiert eine maximale Raumtiefe von 7.0 bis 8.75 m. Tiefere Räume erfordern Querlüftung. Das Volumen pro Person erweist sich als relevantere Kenngrösse als die Fläche. Die Empfehlung liegt bei 8 bis 10 m^3 pro Person. Ein Klassenzimmer mit 60 m^2 erreicht bei 3.50 m Höhe und 25 Personen 8.4 m^3 Raumluftvolumen pro Person.

2.4.5. Thermische Speichermasse und Zielkonflikt Akustik

Die thermische Speichermasse ist eine Voraussetzung für Low-Tech-Konzepte, da sie Temperaturschwankungen dämpft und Temperaturspitzen zeitlich verschiebt. Als Kenngrösse dient die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_R/A_{NGF} in Wh/(m²·K), deren Berechnung in SIA 180:2014 (Anhang D) definiert ist. Die SIA 180:2014 (Ziffer 5.2.5.2, Verfahren 2) fordert eine auf die Nettogeschossfläche bezogene Wärmespeicherfähigkeit von mindestens 45 Wh/(m²·K). Für passive Kühlkonzepte in Schulbauten sind jedoch deutlich höhere Werte erforderlich, da die Speichermasse tagsüber interne und solare Wärmelasten aufnehmen und die Raumtemperatur stabilisieren muss. Die Wirksamkeit der Speichermasse setzt voraus, dass die gespeicherte Wärme nachts wieder abgeführt wird.

Die SIA 180:2014 unterscheidet in Verfahren 1 (Ziffer 5.2.2.2) qualitativ zwischen niedriger, mittlerer und hoher Wärmespeicherfähigkeit anhand konstruktiver Beschreibungen. Ergänzend klassifiziert die DIN 4108-2 [25] die Bauweisen numerisch in Leichtbau (< 50 Wh/(m²·K)), mittlere Bauweise (50–130 Wh/(m²·K)) und schwere Bauweise (> 130 Wh/(m²·K)). Für Low-Tech-Schulgebäude stellt die schwere Bauweise das funktionale Optimum dar. Gemäss SIA 180 entspricht dies Konstruktionen mit Beton- oder Backsteinbauteilen, deren freie raumseitige Fläche mindestens 80 % der Nettogeschossfläche beträgt (Ziffer 5.2.2.2, «hohe Wärmespeicherfähigkeit»). Massive Baustoffe wie Beton, Backstein und Lehm weisen die erforderliche thermische Trägheit auf. Im Tageszyklus sind nur die ersten 10 cm der

raumseitigen Schichten wirksam. Simulationsstudien für Klassenzimmer zeigen, dass eine wirksame Speicherfähigkeit im Bereich schwerer Bauweise die Übertemperaturgradstunden am effektivsten reduziert [22]. Holz-Beton-Hybridkonstruktionen stellen einen Kompromiss zwischen geringen grauen Emissionen und thermischer Trägheit dar. Leichtbauten mit Holzdecken weisen dagegen unzureichende Speicherkapazitäten auf und sind ohne zusätzliche Massnahmen überhitzungsgefährdet. Voraussetzung für die Wirksamkeit der Speichermasse ist, dass die Bauteile direkten Kontakt zur Raumluft haben.

Die künftige Norm prSIA 181/1:2024-04 definiert für Unterrichtsräume volumenabhängige Soll-Nachhallzeiten (vgl. Kapitel 2.2.6). Für ein typisches Klassenzimmer von ca. 200 m³ resultiert ein Zielwert von ca. 0.5 s. In der Praxis werden hierfür oft abgehängte Akustikdecken eingesetzt. Diese entkoppeln die darüberliegende Betondecke jedoch thermisch vom Raum (Dämmwirkung der Luftschicht). Die Folge ist eine signifikante Reduktion der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit, was die natürliche Auskühlung weitgehend wirkungslos macht.

Um Schallabsorption und thermische Aktivierung zu erfüllen, bieten sich folgende Alternativen zur vollflächigen Abhängung an:

- Vertikale Absorber: Platzierung an Stirn- und Rückwänden zur Freihaltung der Decke.
- Deckensegel: Abdeckung von nur 40 bis 50 % der Deckenfläche (im oberen Drittel), während der Rest thermisch aktiv bleibt.
- Akustikputze: Einsatz poröser Systeme (z. B. Lehm), die Absorption und Speicherung vereinen.

Da im Bestand oft vollflächige Akustikdecken vorhanden sind, wird in den Simulationen untersucht, ob eine Reduktion des Belegungsgrades auf 30 % (z. B. Segel) ausreicht, um die thermischen Eigenschaften zu steigern, ohne den akustischen Komfort zu beeinträchtigen.

2.5 Lüftungsstrategien

Die bauphysikalischen Parameter aus Kapitel 2.4.5 erfordern geeignete Lüftungsstrategien. Die Speichermasse benötigt nächtliche Regeneration, tagsüber muss Wärme abgeführt und die Luftqualität gesichert werden.

2.5.1. Vergleich Lüftungssysteme

Manuelle Fensterlüftung erfordert keine Investition in Gebäudetechnik und verursacht weder Betriebs- noch Wartungskosten. Die Wirksamkeit hängt jedoch von der Lüftungsstrategie und der Nutzerdisziplin ab. Stosslüftung mit vollständig geöffneten Fenstern erzielt Luftwechselraten von 10–20 h^{-1} und ermöglicht eine rasche CO_2-Reduktion in Pausen. Kipplüftung erreicht nur 0.5–2 h^{-1} und ist für die Pausenlüftung ungeeignet. Die in Kapitel 2.2.2 dargestellten BAG-Feldmessungen belegen, dass zwei Drittel der natürlich belüfteten Klassenzimmer die CO_2-Grenzwerte verfehlen. Im weiteren Projektverlauf wird anhand der Messdaten aus den Fallbeispielen (AP 3) überprüft, wie gross die Diskrepanz zwischen geforderter und realer Lüftungsfrequenz im Schulalltag tatsächlich ist.

Automatisierte natürliche Lüftung über motorisierte Lüftungsflügel sichert die nächtliche Auskühlung nutzerunabhängig (vgl. Kapitel 2.5.2). Die Tageslüftung kann manuell oder sensorgesteuert erfolgen. Diese Kategorie bildet den Übergang zwischen rein manuellen und hybriden Konzepten.

Konventionelle **mechanische Lüftung** mit Wärmerückgewinnung garantiert die Lufthygiene durch kontinuierlichen Aussenluftstrom von 25 bis 36 m³/h und Person nach SIA 382/1:2025. Der hygienische 3- bis 4-fache Luftwechsel pro Stunde gewährleistet die Einhaltung der CO_2-Grenzwerte unabhängig vom Nutzerverhalten. Die Wärmerückgewinnung reduziert die Lüftungswärmeverluste um 50 bis 85 % gegenüber Fensterlüftung. Der hygienische Luftwechsel reicht jedoch nicht für die thermische Entlastung im Sommer aus. Die SIA 180:2014 fordert mindestens 10 m³/(h·m² NGF), was bei einem typischen Klassenzimmer einem 3-fachen Luftwechsel entspricht. Für eine vollständige Regeneration bei hohen Aussentemperaturen können 8- bis 12-fache Luftwechsel erforderlich sein, die mechanische Systeme

aus wirtschaftlichen Gründen nicht bereitstellen. Die ausschliesslich mechanische Lüftung benötigt daher entweder zusätzlich natürliche Auskühlung durch Fassadenöffnungen oder aktive Kühlung zur Temperierung im Sommer.

Hybride Konzepte entkoppeln die Funktionen Lufthygiene und thermische Konditionierung und kombinieren beide Ansätze. Eine mechanische Grundlüftung (2- bis 3-facher Luftwechsel) sichert die Mindestanforderung energieeffizient und nutzerunabhängig. Ergänzende Fensterlüftung und automatisierte natürliche Auskühlung über Lüftungsflügel übernehmen die hohen Luftwechselraten zur Wärmeabfuhr.

Die Bewertung der drei Lüftungsstrategien erfolgt in den Parameterstudien von AP 4. Die qualitativen Systemunterschiede sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Vergleich Lüftungsstrategien

Kriterium	Manuelle Lüftung	Mechanische Komfortlüftung	Hybride Konzepte
Lufthygiene	Abhängig von Nutzerdisziplin, oft ungenügend.	Nutzerunabhängig garantiert.	Durch mechanische Grundlüftung gesichert.
Sommerlicher Wärmeschutz	Hängt von konsequenter natürlicher Auskühlung durch Lüftung (Personal) ab.	Luftmenge zu gering für Auskühlung, braucht Nachtlüftungskonzept oder aktive Kühlung.	Durch automatisierte natürliche Auskühlung (Motorflügel) optimiert.
Energie & Kosten	Keine Betriebsenergie, moderate Investition.	Hohe Investition, kontinuierlicher Strombedarf.	Reduzierte Technik senkt Investition und Strombedarf.
Systemgrenzen	Lärm, Kälte, Zugluft.	Platzbedarf Kanäle, Wartung.	Koordinierte Steuerung notwendig.

2.5.2.Natürliche Auskühlung

Die Regeneration der thermischen Speichermasse in den Nacht- und frühen Morgenstunden ist die Grundvoraussetzung für passive Kühlung. Die tagsüber in den massiven Bauteilen akkumulierte Wärme muss durch intensive Belüftung abgeführt werden, um die Aufnahmekapazität für den folgenden Tag wiederherzustellen. Die tiefsten Aussentemperaturen treten typischerweise in den frühen Morgenstunden auf, weshalb eine Lüftung bis Schulbeginn besonders wirksam ist. Ohne konsequente Entladung verliert die Speichermasse ihre dämpfende Wirkung und führt zu einem kumulativen Temperaturanstieg über mehrere aufeinanderfolgende Hitzetage. Der Kanton Basel-Stadt fordert bei Neubauten und Umbauten Systeme für die natürliche Auskühlung [28].

Die erforderlichen Luftwechselraten für wirksame natürliche Auskühlung liegen weit über der hygienischen Tageslüftung. Die SIA 180:2014 (Ziffer 5.2.3.1) fordert als Nachweiswert einen Aussenluft-Volumenstrom von mindestens 10 $m^3/(h \cdot m^2$ NGF) bei einer freien Öffnungsfläche von mindestens 5 % der NGF (Ziffer 5.2.3.4). Für ein typisches Klassenzimmer mit 60 m^2 und 3.50 m Raumhöhe resultiert ein Volumenstrom von 600 m^3/h, entsprechend einem rund 3-fachen Luftwechsel. Dieser SIA-Nachweiswert stellt ein normatives Minimum dar. Für eine vollständige Regeneration der Speichermasse bei Hitzeperioden – insbesondere nach aufeinanderfolgenden Tagen mit hohen internen und solaren Lasten – können deutlich höhere Luftwechselraten von 8 bis 12 h^{-1} erforderlich sein, die nur durch grossflächige Querlüftung erreichbar sind.

Bauliche Umsetzung - Trennung von Lüftung und Belichtung

Die Integration mehrerer Funktionen in ein Fensterelement führt oft zu Zielkonflikten (z. B. Hitzeschutz vs. Lüftung). Die bauliche Trennung auf separate Fassadenelemente löst dieses Problem und ermöglicht die Optimierung jeder Teilfunktion:

- Fenster dienen primär der Versorgung mit Tageslicht und dem visuellen Kontakt. Sie können als Festverglasung oder als Putzflügel ausgeführt werden, die nur zur Reinigung geöffnet werden, sofern separate Lüftungsöffnungen vorhanden sind.
- Lüftungsflügel werden als eigenständige, opake oder transluzente Elemente dimensioniert. Ihre Positionierung folgt aerodynamischen Anforderungen. Die Ausführung integriert Wetter-, Insekten- und Einbruchschutz.
- Oberlichter als hochliegende Abluftöffnungen nutzen den thermischen Auftrieb und erhöhen die Effektivität der natürlichen Auskühlung.

Diese Trennung ermöglicht eine unabhängige Steuerung. Der Sonnenschutz an den Sichtfenstern kann bei Einstrahlung geschlossen werden, während die Lüftungsflügel gleichzeitig für den Luftwechsel geöffnet bleiben.



Abbildung 7: Lüftungsflügel mit Wetter-, Insekten- und Einbruchschutz. Bild: Renson

Variante Automatisierte Lüftungsöffnungen

Motorisierte Antriebe an den Lüftungsflügel ermöglichen in Verbindung mit Wettersensoren die automatisierte natürliche Auskühlung und hygienisch notwendige Lüftung ohne manuelle Bedienung.

- Die temperaturgeführte Steuerung öffnet, sobald die Raumtemperatur einen Schwellenwert überschreitet (z.B. >23 °C) und gleichzeitig die Aussentemperatur niedriger ist.
- Bei automatisierter Bedienung während der Nutzungszeit ist ein Klemmschutz zwingend erforderlich. Um Störungen des Unterrichts zu vermeiden, kann die Automatik tagsüber deaktiviert und durch Tasterbedienung ersetzt werden. Dienen die automatisierten Lüftungsflügel nur der Nachtlüftung, müssen ergänzend manuell bedienbare Fenster für die nutzergesteuerte Tageslüftung vorhanden sein.

Variante Manuelle Bedienung Lüftungsöffnungen

Alternativ können Lüftungsöffnungen rein manuell bedient werden. Dies ermöglicht bei Festverglasung der Sichtfenster eine kostengünstige Low-Tech-Lösung, birgt jedoch organisatorische Risiken. Diese Strategie erfordert daher zwingend ein robustes Betriebskonzept (z. B. Hauswart öffnet abends, schliesst morgens).

In Bestandsgebäuden ist die Nachrüstung automatisierter Systeme oft anspruchsvoll, aber für die Funktion passiver Konzepte entscheidend. Folgende Lösungsansätze bieten sich an:

- Bestehende Fensterflügel können motorisiert werden. Dies minimiert Eingriffe in die Fassadenstruktur.
- Einbruchschutz wird durch die Nachrüstung von Gittern oder festen Arretierungen sichergestellt und ermöglicht das sichere Offenlassen bestehender Fensterflügel über Nacht.
- Oberlichter können automatisiert werden und nutzen den thermischen Auftrieb (Kamineffekt).

Die Grenzen der natürlichen Auskühlung durch die steigende Anzahl der Tropennächte unter den Klimaszenarien CH2018 wurde in Kapitel 2.3 dargestellt. Im heutigen Klima erlauben mittlere nächtliche Temperaturdifferenzen von etwa 8–10 K eine weitgehende Regeneration der Speichermasse innerhalb einer Sommernacht. In Tropennächten (T_{min} > 20 °C), deren Häufigkeit unter den Klimaszenarien 2060 deutlich zunimmt, sinken die nutzbaren Differenzen zwischen Raum- und Aussenluft auf etwa 3–5 K, wodurch sich die abführbare Wärmemenge deutlich reduziert und die Speichermasse über mehrere aufeinanderfolgende Nächte nicht mehr vollständig entladen werden kann.

2.5.3.Ergänzende Komfortmassnahmen durch Deckenventilatoren

Wenn passive Massnahmen an ihre Grenzen stossen (z. B. Tropennächte), können Deckenventilatoren den Komfortbereich erweitert. Durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit (0.6-0.8 m/s) im Aufenthaltsbereich sinkt die empfundene Temperatur gemäss adaptivem Komfortmodell (SIA 180:2014) um zwei bis drei Kelvin. Dies ermöglicht die Akzeptanz höherer operativer Raumtemperaturen bis ca. 31 °C. Im Vergleich zur aktiven Kühlung ist der Energiebedarf gering:

- Deckenventilatoren: elektrische Leistung von ca. 0.8 - 1.3 W/m² (bei 1 Gerät pro 30 m²)

Aktive Kühlung: spezifische Kühlleistung ca. 30–80 W/m², elektrische Leistungsaufnahme bei COP 3–4 ca. 8–25 W/m²Deckenventilatoren führen keine Wärme ab, sondern erhöhen die Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich und senken so die empfundene Temperatur. Der Vergleich bezieht sich daher auf die elektrische Leistungsaufnahme, nicht auf die thermische Wirkung.

Die SIA 181:2020 stuft Schulzimmer in die mittlere Lärmempfindlichkeit ein und fordert für Dauergeräusche gebäudetechnischer Anlagen einen Anforderungswert L_H von 28 dB (Tabelle 6). Deckenventilatoren fallen als Dauergeräuschquelle in diese Kategorie. Bei erhöhten Anforderungen reduziert sich der Wert auf 25 dB (Kleinstwert). Zur Einhaltung dieser Anforderungen sind hochwertige bürstenlose Gleichstrommotoren erforderlich, deren Schallleistungspegel im Betrieb deutlich unter 28 dB liegen muss, da der Schalldruckpegel am Empfangsort (Aufenthaltsbereich) massgebend ist.

Bei Neubauten kann die Integration von Deckenventilatoren in Low-Tech-Konzepte zur optionalen Nachrüstung vorgesehen werden. Dies erfolgt durch Installation der elektrischen Zuleitungen und Montageplatten in der Rohdecke während der Bauphase. Die Ventilatoren können bei Bedarf nachgerüstet werden, wenn sich unter den Klimaszenarien 2035 oder 2060 zeigt, dass die rein passiven Massnahmen nicht ausreichen.

2.6 Systemgrenzen und Einschränkungen

Die in den Kapiteln 2.4 und 2.5 beschriebenen Low-Tech-Konzepte setzen günstige Randbedingungen voraus. Die nachfolgenden Abschnitte erläutern Faktoren, die deren Anwendbarkeit einschränken und hybride oder konventionelle Lösungen erforderlich machen können.

2.6.1.Lärmschutz

Die Lärmschutzverordnung (LSV) fordert für Schulräume Immissionsgrenzwerte von 35 dB bei geschlossenen Fenstern. Da das Öffnen der Fenster den Innenpegel um 15 bis 25 dB erhöht, entsteht an lärmbelasteten Standorten ein Zielkonflikt: Feldstudien zeigen, dass Lehrpersonen bei Aussenpegeln über 60 dB die Fensterlüftung vermeiden, was zu CO_2-Konzentrationen bis 3'000 ppm führt.

Für die Anwendung natürlicher Lüftung an lärmbelasteten Standorten stehen folgende Massnahmen zur Verfügung:

- **Kastenfenster:** Eine schallgedämmte Lüftungsebene (15–25 cm Zwischenraum) ermöglicht eine Einfügungsdämpfung von 20 bis 25 dB gegenüber dem offenen Fenster bei gleichzeitiger Lüftung.
- **Schallgedämmte Lüftungsflügel:** Diese eigenständigen Fassadenelemente erreichen Dämmwerte von 20 bis 30 dB. Erhöhte Strömungsverluste erfordern 30 bis 50 % grössere Querschnittsflächen.
- **Architektonische Abschirmung:** Loggien oder Laubengänge (Tiefe > 2.5 m) reduzieren die Lärmbelastung um 5 bis 10 dB rein baulich.

Standorte mit Aussenpegeln über 70 dB (z.B. Hauptverkehrsachsen, Bahntrassen) markieren die Grenze für reine Low-Tech-Konzepte. Hier ist eine mechanische Lüftung zur Entkopplung von Hygiene und Lärmschutz erforderlich und natürliche Lüftung beschränkt sich auf die natürliche Auskühlung ausserhalb der Nutzungszeit.

2.6.2.Nutzerverhalten und Performance Gap

Die in Kapitel 2.2.2 dokumentierte Diskrepanz zwischen normativen Anforderungen und realem Nutzerverhalten bei der Lufthygiene besteht auch für die thermische Konditionierung. Im Schulbetrieb wird der Sonnenschutz typischerweise erst zu Unterrichtsbeginn aktiviert, obwohl die solare Einstrahlung bereits früher einsetzt [21]. Seltene oder verzögerte Nutzung führt zu einem starken Anstieg der Übertemperaturgradstunden. Das Nutzerverhalten hat einen dominanten Einfluss auf die tatsächlich auftretenden Raumtemperaturen [2]. Die Ursachen sind sowohl physikalischer als auch psychologischer Natur:

- Die thermische Trägheit massiver Bauteile verzögert den Temperaturanstieg nach solarer Einstrahlung um mehrere Stunden. Nach dem Schliessen des Sonnenschutzes steigt die Raumlufttemperatur daher zunächst weiter an, da die bereits in der Speichermasse akkumulierte Wärme zeitversetzt abgegeben wird. Nutzende nehmen die Verschattung als wirkungslos wahr und öffnen sie wieder.
- Vollautomatische Systeme ohne Eingriffsmöglichkeit erzeugen Frustration. Systeme mit transparenter Logik und einfacher manueller Übersteuerung weisen hingegen hohe Akzeptanzraten auf.

Low-Tech-Konzepte müssen Robustheit gegenüber suboptimaler Bedienung gewährleisten. Eine mögliche Strategie ist die teilweise Automatisierung. Prozesse wie die natürliche Auskühlung und der präventive Hitzeschutz durch Verschattung bei Abwesenheit werden automatisiert, um die thermische Grundperformance nutzerunabhängig zu sichern. Die Funktionsfähigkeit der Konzepte auch unter ungünstigen Bedienungsbedingungen wird in den dynamischen Simulationen (AP 4) untersucht.

2.6.3. Grenzen der Anwendbarkeit

Folgende Randbedingungen zeigen die physikalischen und organisatorischen Grenzen von Low-Tech-Konzepten und können hybride oder konventionelle Lösungen erforderlich machen:

- **Lärmbelastung:** Aussenpegel über 70 dB verhindern eine ausreichende natürliche Lüftung zur Sicherstellung der Lufthygiene.
- **Raumgeometrie:** Räume mit einer Tiefe über dem 2.5-fachen der Raumhöhe ohne Querlüftungsmöglichkeit bieten unzureichende Voraussetzungen für den thermischen Auftrieb
- **Speichermasse:** Bestandsbauten mit einer Speichermasse unter 80 Wh/(m² A_E) (z.B. Leichtbau, abgehängte Decken) können Wärmelasten tagsüber nicht ausreichend puffern.
- **Orientierung:** Ausschliessliche Westorientierung der Klassenzimmer führt in Kombination mit den zunehmenden Tropennächten auch bei optimaler Verschattung zu kritischen Überhitzungsstunden.

Diese Kriterien fliessen in die Entscheidungshilfe (AP 8) ein, die anhand eines Entscheidungsbaums die Anwendbarkeit von Low-Tech-Konzepten für konkrete Projekte prüft. Für Bestandsgebäude gelten diese Systemgrenzen gleichermassen. Die spezifischen Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Nachrüstung werden in Kapitel 2.6.4 behandelt.

2.6.4. Implementierung und Nachrüstung im Bestand

Die Übertragung von Low-Tech-Konzepten auf Bestandsgebäude unterliegt zusätzlichen Einschränkungen durch fixe Randbedingungen wie Raumgeometrie, Fassadenöffnungen und Denkmalschutz. Die Nachrüstungspotenziale variieren je nach Bauepoche und lassen sich in drei Eingriffstiefen gliedern:

- **Organisatorische Massnahmen** erfordern keine baulichen Eingriffe und können kurzfristig umgesetzt werden: Optimierung von Lüftungsregeln und Schulung der Nutzenden, Anpassung von Belegungszeiten, Optimierung der GLT-Parameter für Sonnenschutz und automatisierte Öffnungen.
- **Einfache bauliche Massnahmen** erfordern moderate Investitionen bei begrenzten Eingriffen in die Bausubstanz: Nachrüstung aussenliegender Verschattung, Automatisierung bestehender Fenster, Feststellanlagen für Querlüftung, partielle Freilegung von Speichermasse.
- **Umfassende bauliche Eingriffe** betreffen die Gebäudesubstanz und sind nur bei von Gesamtsanierungen wirtschaftlich vertretbar: Vergrösserung von Lüftungsöffnungen, Erhöhung der Speichermasse, Einbau mechanischer oder hybrider Lüftungssysteme.

Die nachfolgenden Abschnitte erläutern die Herausforderungen bei der Bestandsertüchtigung.

Nachrüstung des Sonnenschutzes

Viele Schulbauten der 1950er bis 1980er Jahre weisen grosse Fensterflächen mit unzureichendem oder windanfälligem Sonnenschutz auf. Vor jeder Optimierung der Lüftung muss ein wirksamer aussenliegender Sonnenschutz sichergestellt werden (vgl. Kapitel 2.4.3), da ohne Lastreduktion eine reine Lüftungsstrategie wirkungslos bleibt. Bei denkmalgeschützten Fassaden sind die Möglichkeiten für aussenliegende Systeme eingeschränkt; hier können innenliegende Systeme mit niedrigem g-Wert oder Sonnenschutzverglasungen geprüft werden.

Sicherstellung der natürlichen Auskühlung

Die in Kapitel 2.5.2 definierten Anforderungen an die freie Strömungsfläche sind bei älteren Schulbauten oft baulich erfüllt, scheitern aber betrieblich an Sicherheitsbedenken und fehlendem Witterungsschutz. Lösungsansätze umfassen einbruchhemmende Gitter, Lamellenstoren in Horizontalstellung sowie die Nutzung hochliegender Oberlichter.

Automatisierung

Die Nachrüstung von Fensterantrieben zur Vermeidung des Performance Gap (vgl. Kapitel 2.6.2) kann bei denkmalgeschützten Fassaden mit ästhetischen Anforderungen kollidieren. Verdeckte Antriebe sind aufwendig und nicht bei allen Fenstertypen möglich. Eine Alternative bildet die Automatisierung von Oberlichtern in Kombination Querlüftungsmöglichkeit über die Erschliessung.

Querlüftung

Einseitig orientierte Klassenzimmer sind auf Querlüftung über die Korridore angewiesen. Aus Brandschutzgründen können oft Klassenzimmertüren nicht geöffnet bleiben und bestehende Oberlichter über den Türen sind nicht öffenbar. Die Nachrüstung von Feststellanlagen erfordert Abstimmung mit der Feuerpolizei. Inmanchen Gebäuden fehlen zudem öffenbare Fenster im Erschliessungsbereich vollständig.

Speichermasse

Bauten in Leichtbauweise oder mit grossflächig abgehängten Decken unterschreiten häufig die in Kapitel 2.6.3 definierte Systemgrenze von 80 Wh/(m² A_E) wirksamer Speichermasse. Ein Rückbau ist aus akustischen oder installationstechnischen Gründen oft nicht möglich. Die Reduktion des Belegungsgrads auf 30 bis 50 % der Deckenfläche durch Deckensegel kann einen Kompromiss darstellen, sofern die akustischen Anforderungen nach SIA 181:2020 weiterhin erfüllt werden.

Eine Low-Tech-Ertüchtigung ist nicht zielführend, wenn mehrere der genannten Herausforderungen zutreffen oder die in Kapitel 2.6.3 definierten Systemgrenzen unterschritten werden.

2.7 Planungsrichtwerte für Low-Tech-Konzepte

Die aus den vorangegangenen Kapiteln abgeleiteten Planungsrichtwerte sind im Anhang (Tabelle 12) zusammengestellt. Diese bilden die Eingangsgrössen für die Simulationen (AP 3 und AP 4) und sollen die Funktionsfähigkeit der Konzepte auch unter ungünstigen Bedingungen und zukünftigen Klimaszenarien sicherstellen.

2.8 Fallbeispiele und Sofortmassnahmen sommerlicher Wärmeschutz

Dieses Kapitel fasst Sofortmassnahmen zusammen, die ohne oder mit geringen baulichen Eingriffen umsetzbar sind. Sie adressieren insbesondere die in Abschnitt 2.3 und 2.6 beschriebenen Überhitzungsrisiken in Bestandsbauten und bilden eine praxisorientierte Ergänzung zu den in den AP 3 und 4 zu untersuchenden Low-Tech-Konzepten.

Im Rahmen einer Messkampagne des Kantons Basel-Stadt werden seit Sommer 2024 Raumlufttemperaturen, relative Feuchten und CO_2-Konzentrationen in sieben Schulgebäuden erfasst. Die Gebäude repräsentieren die in Kapitel 2.1.2 definierten Bauepochen. Pro Schule sind ca. 10 Messgeräte in Klassenzimmern, Erschliessungsbereichen und im Aussenbereich installiert.

Eine siebte Schule wird in das Projekt zusätzlich aufgenommen, da bei dieser der sommerliche Wärmeschutz basierend auf natürlicher Auskühlung bereits in der Planung berücksichtigt wurde und lt. Nutzenden auch im Sommer angenehme Raumlufttemperaturen aufweist. Die Werte dieser Schule werden unabhängig von oben genannter Messkampagne erfasst und vergleichend hinzugezogen.

Die Messdaten stehen seit Sommer 2024 zur Verfügung. Die Messungen zeigen, dass in vielen Klassenzimmern im Sommer Raumlufttemperaturen von 26 °C bereits am Vormittag überschritten werden.Die Auswertungen und Analysen der sieben Schulen stehen derzeit nur dem Kanton Basel-Stadt zur Verfügung und sind nicht öffentlich.

Die Analyse der Messdaten und die Schulbegehungen zeigen einen Handlungsbedarf zur Reduktion der sommerlichen Überhitzung. Sofortmassnahmen sind schnell und kosteneffizient umsetzbar. Sie gliedern sich in organisatorische, verhaltensbasierte und gering-investive Massnahmen. Es werden Massnahmen aus AP2 sowie aus Erkenntnissen aus den Schulbegehungen zusammengetragen. Die Sofortmassnahmen adressieren die in Kapitel 2.4 dargestellten Wirkprinzipien des sommerlichen Wärmeschutzes.

2.8.1.Spezifische Erkenntnisse aus den Schulbegehungen

- Bei den Begehungen wurden konkrete Defizite identifiziert, die passive Kühlstrategien in der Praxis einschränken.**Natürliche Auskühlung:** Die Anforderungen nach Kapitel 2.5.2 werden häufig nicht erfüllt. Hauptursachen sind geschlossene Lamellenstellungen des Sonnenschutzes oder geschlossene Stoffstoren (Reduktion der lichten Öffnungsfläche auf unter 5 %), zugestellte Fensterbänke sowie fehlende Zuständigkeitsregelungen für das abendliche Öffnen und morgendliche Schliessen der Fenster. Zusätzlich gibt es versicherungstechnische Einschränkungen aufgrund fehlendem Wetter-/Einbruchschutz.
- **Querlüftung:** Die Möglichkeit zur Querlüftung über Klassenzimmer und Erschliessungsbereich ist baulich oft vorhanden (Abbildung 8), wird jedoch aus Gründen des Brandschutzes, der Sicherheit oder Zuständigkeiten nicht genutzt. Klassenzimmertüren oder Oberlichter könnten mit brandmeldergestützten Feststellanlagen eine sichere Offenhaltung während der Nachtlüftung ermöglichen. In mehreren Gebäuden fehlen öffenbare Fenster im Erschliessungsbereich vollständig.
- **Sonnenschutzsteuerung:** Die Gebäudeleittechnik-Parameter sind häufig nicht auf den sommerlichen Wärmeschutz optimiert. Typische Defizite umfassen zu spätes automatisches Schliessen bei Sonneneinstrahlung, fehlendes Öffnen oder Horizontalstellen der Lamellen über Nacht sowie deaktivierte oder fehlerhafte Sensorik. Bei manueller Steuerung kann es auch dazu führen, dass der Sonnenschutz zu spät geschlossen wird.

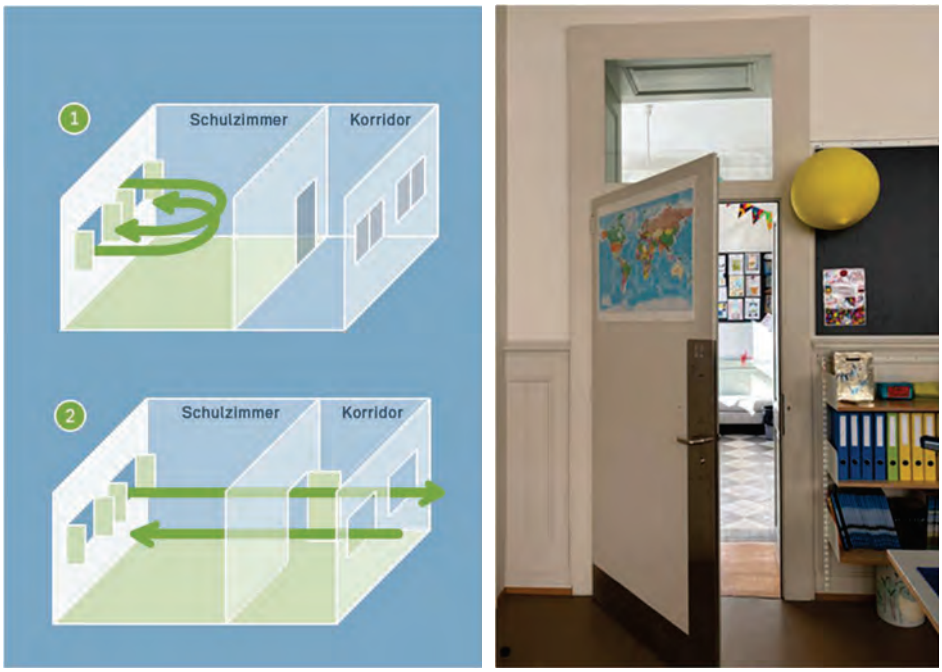


Abbildung 8: Einseitige Lüftung und Querlüftung (links). Bild: schulen-lueften.ch
Klassenzimmertüre mit Oberlicht (rechts). Bild: FHNW

Die Wirksamkeit der Massnahmen hängt zum einen von den gegebenen Möglichkeiten und zum anderen von organisatorischen Rahmenbedingungen ab. Es müssen entsprechende Möglichkeiten baulich/, organisatorisch oder betrieblich den Nutzenden zur Verfügung gestellt werden, bevor sie überhaupt genutzt werden können. Die Sensibilisierung von Hausdienst und Lehrpersonen für die Bedeutung konsequenter Nachtlüftung und korrekter Sonnenschutzbedienung ist Voraussetzung für die Umsetzung. Die in Kapitel 2.6.2 beschriebene Diskrepanz zwischen Planungsannahmen und realem Nutzerverhalten zeigt sich auch in den Basler Fallbeispielen.

Zwei weitere Faktoren beeinflussen die passive Kühlung auf Gebäudeebene. Zum einen ist es die Nutzung nordseitiger Räume an Hitzetagen, da diese auf Grund der Orientierung generell niedrigere Raumlufttemperaturen, wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben, aufweisen. Zum anderen erhöhen versiegelte Pausenhöfe und Flachdächer die Umgebungstemperatur tagsüber durch starkes Aufheizen und langsameres Abkühlen in der Nacht und reduzieren das Auskühlpotenzial der Fassaden. Eine Entsiegelung und Begrünung des unmittelbaren Gebäudeumfelds verbessert das Mikroklima und unterstützt die natürliche Auskühlung.

2.8.2. Massnahmenübersicht und Priorisierung

Tabelle 9 fasst die identifizierten Sofortmassnahmen zusammen und bewertet diese nach Umsetzungsaufwand und erwarteter Wirksamkeit.

Tabelle 9: Sofortmassnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz im Bestand

Massnahme	Aufwand	Wirksamkeit	Erläuterung
Organisatorisch			
Nachtlüftungskonzept mit definierten Verantwortlichkeiten	Gering	Sehr hoch	Zuständigkeiten festlegen (z.B. Hausdienst), Öffnungszeiten z.B. 17–7 Uhr
Fensterbänke freiräumen	Gering	hoch	Ermöglicht vollständiges Öffnen der Fensterflügel
GLT-Optimierung			
Lamellen horizontal stellen über Nacht	Gering	Hoch	Erhöht lichte Öffnungsfläche von <10 % auf ca. 80 %
Sonnenschutz-Steuerungsparameter anpassen	Gering	Hoch	Früheres Schliessen bei Einstrahlung, Öffnung/Horizontalstellung nachts, vgl. Kap. 2.4.3
Nachtlüftung vor Schulstart aktivieren	Gering	Mittel	Bei Hitzeperioden bereits in letzter Ferienwoche starten
Gering-investive bauliche Massnahmen			
Reparatur defekter Sonnenschutzsysteme	Mittel	Hoch	Funktionsfähigkeit ist Voraussetzung für alle weiteren Massnahmen
Reduktion Akustikdeckenanteil auf 30–50 %	Mittel	Hoch	Freigelegte Speichermasse aktivieren, vgl. Kap. 2.4.5
Querlüftung über Brandschutztüren ermöglichen	Mittel	Mittel	Feststellanlagen mit Rauchmelder nachrüsten
Sonnenschutzfolien (Testinstallation)	Mittel	Mittel	Temporäre Notlösung bei fehlendem Aussensonnenschutz; Zielkonflikt Heizwärmebedarf und Tageslicht beachten
Deckenventilatoren (Testinstallation)	Mittel	Mittel	Komforterweiterung um 2–3 K bei geringem Energiebedarf, vgl. Kap. 2.5.3
Flankierend			
Interne Lasten minimieren	Gering	Gering	Geräte und Beleuchtung konsequent ausschalten, vgl. Kap. 2.4, Klassen nach Möglichkeit in Halbklassen unterteilen
Aussenraum: Entsiegelung, Beschattung, Bepflanzung	Mittel–Hoch	Mittel	Reduktion Umgebungstemperatur, Verbesserung Mikroklima für natürliche Auskühlung, z.B. durch Entsiegelung und Begrünung (Bäume/Büsche) sowie temporäre/fixe Verschattungsmöglichkeiten

2.9 Simulation eines Klassenzimmers

2.9.1.Basismodell

Das Basismodell besteht aus einem Klassenzimmer und dem Zugangsbereich. Das Klassenzimmer hat eine Nettogrundfläche von 60.3 m^2 und eine lichte Raumhöhe von 3 m. Die Raumhöhe liegt unterhalb des in Tabelle 12 empfohlenen Richtwerts von 3.5 m für Neubauten und bildet damit konservative Bestandsverhältnisse ab. Die Simulationsergebnisse liegen bezüglich dieses Parameters auf der sicheren Seite, da höhere Räume die thermischen Bedingungen tendenziell verbessern. Das Modell ist ein Massivbau mit 3-fach verglasten Fenstern. Im Klassenzimmer ist die Decke komplett mit Akustikpanelen ausgestattet. Der Lamellensonnenschutz wird geschlossen (Lamellenstellung 65°), wenn die Einstrahlung auf die Fassade 200 W/m² überschreitet. Nachts bleibt der Sonnenschutz in der gleichen geschlossenen Stellung (65°). Dieses Verhalten bildet den in den Schulbegehungen dokumentierten Fall ab, bei dem die Lamellen über Nacht nicht geöffnet oder horizontal gestellt werden. Die Lüftung erfolgt manuell über die Fenster. Es kann je Fenster ein Drittel der Fläche als Dreh-/Kippflügel geöffnet werden. Während der Lektionen sind 19 Personen anwesend. Es ist ein Klassenzimmer einer Sekundarschule. Weitere Angaben sind im Anhang Kap. 6 zu finden.

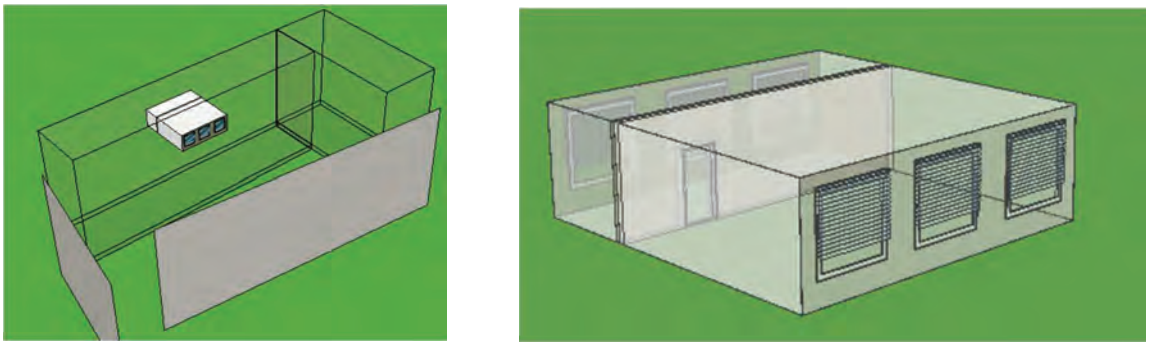


Abbildung 9: Ansicht des Basismodelles in IDA ICE. Das Klassenzimmer ist Südost ausgerichtet.

2.9.2.Varianten

Um den Einfluss verschiedener Massnahmen auf das Basismodell des Klassenzimmers zu untersuchen, werden 16 verschiedene Varianten betrachtet (Tabelle 10). Die Varianten sind aufgeteilt in verschiedene Massnahmenpakete:

- **Betrieb der natürlichen Auskühlung:** Verschiedene Vorgehensweise bei der natürlichen Auskühlung werden betrachtet. Dies sind Massnahmen, die z.T. recht schnell auch im Bestand umgesetzt werden können.
- **Bauliche Massnahmen:** Diese Massnahmen betreffen die Wärmeabgabe von Beleuchtung und Geräten sowie den Anteil Speichermasse (Akustikdecke!) bzw. den g-Wert von Fenstern mit Verschattung. Dies sind Massnahmen, die auch im Bestand umgesetzt werden können, jedoch bauliche Anpassungen bedingen.
- **Belegung:** Die Belegung hängt zum einen vom Schultyp und zum anderen von der Anzahl der Personen im Klassenzimmer ab. Hier wurde der Schultyp von Sekundar- auf Primarschule geändert. Die Wärmeabgabe einer Primarschülerschaft ist geringere als die einer Sekundarschülerschaft. Diese Reduktion der Wärmeabgabe entspricht gleichzeitig einer Reduktion der Sekundarschülerschaft um ca. 33 %. Dies könnte mit einer zeitweisen Aufteilung in Teil-/Halbklassen umgesetzt werden.
- **Neubau:** Die lichte Raumhöhe und Ausrichtung der Klassenzimmer können nur bei einem Neubau optimiert werden

Tabelle 10 Beschreibung der untersuchten Varianten

Nr.	Variante	Beschreibung	Massnahme
0	Basismodell Sekundarschule (18 + 1 Pers.)	Taglüftung: Pausen- und temperaturabhängige Lüftung Nachtlüftung: 17-7 Uhr, 01.-28.06./12.08.-06.09., nur während der Schultage, Lamellen 65° geschlossen Während der Lüftung sind Drehflügel immer komplett geöffnet, der Sonnenschutz ist geschlossen, wenn dies aufgrund der Einstrahlung (> 200 W/m^2) gefordert ist	----
1	1 Nachtlüftung (NL): Lamellen horizontal	Während der Nachtlüftung (17 - 7 Uhr) werden die Lamellen des herabgefahrenen Sonnenschutzes auf horizontal gestellt	Betrieb der Nachtlüftung
	1.1 wie Nr. 1 + NL: 23-7 Uhr	Wie Nr. 1 plus Nachtlüftung (23 - 7 Uhr). Eine Person öffnet die Fenster erst am späten Abend.	
	1.2 wie Nr. 1 + NL: 6-7 Uhr	Wie Nr. 1 plus Nachtlüftung (6 - 7 Uhr). Eine Person öffnet die Fenster erst am Morgen, kurz bevor der Unterricht beginnt.	
	1.3 wie Nr. 1 + Türe bei NL komplett offen (Querlüftung)	Wie Nr. 1 plus geöffnete Klassentüre während der Nachtlüftung (17 - 7 Uhr). Die letzte Lehrperson öffnet die Fenster und die Türe. Querlüftung über die Erschliessung ist möglich.	
	1.4 wie Nr. 1 + NL: Start in letzter SoFeWoche	Wie Nr. 1 plus Beginn der Nachtlüftung (17 - 7 Uhr) schon in der letzten Sommerferienwoche.	
2	Zielwerte Licht (11 -> 7.2 W/m^2)	Die spezifische Leistung wird vom Standard- auf den Zielwert gesenkt (Norm SIA 2024:2021).	Bauliche Massnahmen
3	Zielwerte Geräte (8 -> 4 W/m^2)	Die spezifische Leistung wird vom Standard- auf den Zielwert gesenkt (Norm SIA 2024:2021).	
4	Akustikdecke (100% -> 30%)	Der Anteil der Akustikdecke an der Deckenfläche wird von 100 % auf 30 % gesenkt.	
5	Reduktion g-Wert (0.54 -> 0.26)	Der g-Wert des Fensterglases wird reduziert (z.B. Austausch der Gläser, Sonnenschutzfolien)	
6	Primar (115 W -> 73 W)	Die Sekundarschülerschaft wird durch eine Primarschülerschaft ersetzt. Betrachtung eines anderen Schultyps.	Belegung
7	Raumhöhe (3 m -> 4 m)	Die lichte Raumhöhe wird um einen Meter erhöht.	Neubau
8	Orientierung (SO -> NW)	Die Orientierung des Klassenzimmers wird von Südost auf Nordwest verändert.	
9	Orientierung (SO -> O)	Die Orientierung des Klassenzimmers wird von Südost auf West verändert.	
10	Orientierung (SO -> W)	Die Orientierung des Klassenzimmers wird von Südost auf Ost verändert.	
11	Orientierung (SO -> S)	Die Orientierung des Klassenzimmers wird von Südost auf Süd verändert.	
12	Orientierung (SO -> N)	Die Orientierung des Klassenzimmers wird von Südost auf Nord verändert.	

Die Varianten untersuchen Einzelmassnahmen. In der Praxis wirken Massnahmen meist kombiniert – beispielsweise Querlüftung (V1.3) zusammen mit reduziertem Akustikdeckenanteil (V4) und Nordorientierung (V12). Die systematische Kombination der wirksamsten Massnahmen zu einem optimierten

Referenzklassenzimmer erfolgt im nächsten Arbeitsschritt (AP 4). Die additiven und ggf. nicht-linearen Effekte der Kombination lassen sich aus den Einzelergebnissen nicht direkt ableiten.

2.9.3.Analyse

Für das Klassenzimmer werden die maximalen Raumlufttemperaturen und die Gesamtanzahl der Stunden, in denen die Raumlufttemperatur zwischen 26-30 °C bzw. über 30 °C liegen, bestimmt (Tabelle 11). Zusätzlich wird die Anzahl der Stunden als Gesamtsumme über 26 °C, sowie die Anzahl der Stunden, die oberhalb des Grenzwertes gemäss Norm SIA 180:2014 für Räume ohne mechanische Kühlung liegen, dargestellt. Die Ergebnisse basieren auf einer Jahressimulation. Die Werte gelten für die Belegungszeit von 7-17 Uhr an Schultagen. Die farbliche Markierung kennzeichnet die jeweils tiefsten Werte je Rubrik in Grün und die jeweils höchsten Werte in Rot.

Tabelle 11 Anzahl der Stunden der Raumlufttemperatur (Topr.) für verschiedene Bereiche und Anzahl der Stunden oberhalb des Grenzwerts aus SIA 180:2014 für Gebäude ohne mechanische Kühlung während der Belegungszeit für verschiedene Varianten (Belegungszeit 1'504 h, Jahresbetrachtung).

Nr.	Variante	max. Topr. °C	Topr. > 26 - ≤ 30 °C h	Topr. > 30 °C h	Topr. > 26 °C h	> SIA 180 oberer GW h	Mass-nahmen
0	Basismodell: Sekundar (18+1 Pers.)	33.4	180	70	249	102	---
1	1 Nachtlüftung NL: Lamellen horizontal	32.8	146	30	176	34	Betrieb der Nacht-lüftung
	1.1: Nr. 1 + NL: 23-7 Uhr	32.8	158	31	189	38	
	1.2: Nr. 1 + NL: 6-7 Uhr	33.6	175	82	258	120	
	1.3: Nr. 1 + Türe bei NL komplett offen	32.9	142	30	171	32	
	1.4: Nr. 1 + NL Start in letzter SoFeWoche	31.6	147	25	172	20	
2	Zielwert Licht (11 -> 7.2 W/m2)	33.1	176	62	238	92	bauliche Mass-nahmen
3	Zielwert Geräte (8 -> 4 W/m2)	33.0	176	60	235	88	
4	Akustikdecke (100 % -> 30 %)	32.9	177	60	237	90	
5	Reduktion g-Wert (0.54 -> 0.26)	32.7	176	55	231	83	
6	Primar (115 W -> 73 W)	33.6	154	57	211	74	Belegung
7	Raumhöhe (3 m -> 4 m)	33.0	178	63	241	93	Neubau
8	Orientierung (SO -> NW)	32.4	134	30	164	36	
9	Orientierung (SO -> O)	33.4	175	65	240	94	
10	Orientierung (SO -> W)	33.2	144	39	183	57	
11	Orientierung (SO -> S)	33.1	169	58	227	91	
12	Orientierung (SO -> N)	32.2	133	28	161	32	

Das Basismodell weist in 180 Stunden, was rund 12 % der Belegungszeit (1'504 h) entspricht, erhöhte Raumlufttemperaturen zwischen 26-30 °C auf. Während 70 Stunden ist die Raumlufttemperatur höher als 30 °C. Insgesamt sind die Temperaturen in 249 Stunden (knapp 17 % der Belegungszeit) höher als 26 °C.

Mit 102 Stunden ist in 7 % der gesamten Belegungszeit der obere Grenzwert der SIA 180:2014 für Räume ohne mechanische Kühlung überschritten. Die Überschreitungen treten nur in der Woche vor und in den vier Wochen nach den Sommerferien auf. Bei einer Belegungszeit von 198 h in diesen fünf Wochen entspricht dies 51 % der Belegungszeit.

Gemäss Tabelle 11 können folgende Aussagen für die einzelnen Massnahmepakete getroffen werden:

Nachtlüftung

- Einen grossen Einfluss auf die Raumlufttemperaturen hat die Stellung der Lamellen. Werden diese während der Nachtlüftung waagerecht gestellt, sinkt die Stundenanzahl an hohen Raumlufttemperaturen deutlich. Die Konstruktion kann besser auskühlen und somit die Temperaturspitzen besser abfedern (V1). Die maximale Raumlufttemperatur sinkt zwar nur um ca. 0.7 K, aber die Anzahl der Stunden über 26 bzw. 30 °C sinkt mit -29 % bzw. -57 % deutlich.
- Wird die Lüftungsdauer der Nachtlüftung leicht verkürzt, hat dies Auswirkungen auf die Temperatur (V1.1). Die Anzahl von Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen steigt leicht gegenüber V1 an.
- Eine kurze Morgenlüftung führt trotz horizontaler Lamellen zu einer Erhöhung der Anzahl von Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen (V1.2) gegenüber dem Basisfall. Bei einer Lüftungsdauer von einer Stunde kann die Konstruktion nicht ausgekühlt werden.
- Erfolgt eine Querlüftung über die gesamte Nachtlüftungsdauer, ergibt sich die geringste Anzahl an Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen in allen Bereichen (V1.3).
- Die tiefste maximale Raumlufttemperatur weist V1.4 auf. Wird in der letzten Sommerferienwoche (sehr hohen Aussenlufttemperaturen im verwendeten Klimadatensatz) schon mit der Nachtlüftung begonnen, ist der Klassenraum bei Schulstart auf einem deutlich tieferen Temperaturniveau.

Fazit: Grosse lichte Lüftungsöffnungsflächen, Querlüftung und lange Lüftungszeiten führen zu einer geringeren Anzahl an Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen. Sind die Aussenlufttemperaturen in der letzten Sommerferienwoche hoch, sollte in dieser Woche schon mit der Nachtlüftung gestartet werden, um bei einem tieferen Temperaturniveau die Schule zu starten.

Bauliche Massnahmen

- Alle dargestellten baulichen Massnahmen reduzieren leicht die Anzahl der Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen gegenüber dem Basisfall.
- Die Massnahme mit dem reduzierten g-Wert der Fenster führt zu der geringsten Stundenanzahl mit hohen Raumlufttemperaturen. Insbesondere die Stunden mit über 30 °C werden gegenüber der Basisvariante um -21 % reduziert, während bei V2-V4 nur eine Reduktion von -11 % bis -14 % auftritt.

Fazit: Eine Reduktion der internen Lasten (Beleuchtung/Geräte), dem Anteil der Akustikdecken (sofern diese nicht frei abgehängt sind, und somit die thermische Speichermasse nicht entkoppeln) sowie des g-Wertes der Fenster führt jeweils zu einer leicht verringerten Anzahl an Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen.

Belegung

- Eine Primarschülerschaft hat eine geringere Wärmeabgabe als eine Sekundarschülerschaft, was zu einer reduzierten Anzahl der Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen gegenüber dem Basisfall führt.

Fazit: Der Schultyp bzw. die Anzahl der Nutzenden hat einen Einfluss auf die Raumlufttemperaturen.

Neubau

- Eine Erhöhung der lichten Raumhöhe von 3 m auf 4 m führt nur zu einer leichten Reduktion der Stundenanzahl mit hohen Raumlufttemperaturen. Hierbei ist die Temperaturschichtung im Raum jedoch nicht berücksichtigt. Dazu sind weitergehende Untersuchungen notwendig.

- Bei der Orientierung des Klassenzimmers zeigt sich für die angenommene Belegungszeit von 7–17 Uhr, dass die Nord- und die Westausrichtung die geringsten Überhitzungsstunden aufweisen. Für die Westausrichtung ist dieses Ergebnis auf die Belegungszeit zurückzuführen. Die maximale solare Einstrahlung auf Westfassaden tritt zwischen 15 und 18 Uhr auf, sodass ein wesentlicher Teil der thermischen Belastung erst nach Belegungsende wirksam wird. Bei längeren Nutzungszeiten (Gymnasium bis 18 Uhr) verschlechtert sich die Westorientierung. Hierzu sind weitergehende Untersuchungen notwendig.
- Von den vier Hauptorientierungen N-S-O-W schneidet die Ostausrichtung bei Belegungsbeginn 7 Uhr am schlechtesten ab. Die flache Morgensonne trifft ab Belegungsbeginn direkt auf die Fassade und heizt den Raum früh im Tagesverlauf auf, bevor die Speichermasse regeneriert ist.Werden Klassenzimmer in zwei gegenüberliegenden Himmelsrichtungen geplant, ist S/N die beste Ausrichtung, gefolgt von SO/NW und O/W.

Fazit: Um den Vorteil einer hohen Raumhöhe zu quantifizieren, muss die Temperaturschichtung mitbetrachtet werden. Ostorientierte Klassenzimmer weisen für die betrachteten Orientierungen bei der angenommenen Belegungszeit die höchste Anzahl an Stunden mit hohen Raumlufttemperaturen auf.

2.9.4.Fazit

Aus den betrachteten Varianten lässt sich ableiten, dass eine lange Nachtlüftung, die nach der letzten Schulstunde startet, am effektivsten ist. Je nach Tagesprofil der Aussenlufttemperatur ist die Aussenlufttemperatur schon vor 23 Uhr niedriger als die Raumlufttemperatur, so dass ein früherer Start der Nachtlüftung sinnvoll ist. Die solare Einstrahlung nach 17 Uhr wird von der bereits aufgeheizten Konstruktion kaum noch aufgenommen. Der Temperaturvorteil eines früheren Lüftungsbeginns überwiegt den geringfügigen zusätzlichen Wärmeeintrag am späten Nachmittag.

Die Simulationen untermauern, dass grosse, lichte Lüftungsöffnungsflächen und Querlüftung zu den tiefsten Raumlufttemperaturen führen. Die Reduktion der internen und solaren Lasten sowie die Vergrösserung der thermisch aktivierbaren Decke senken ebenfalls die Raumlufttemperaturen, haben aber nicht einen so grossen Einfluss wie die lichten Lüftungsöffnungsflächen. Für die Planung von Neubauten ist die Nordorientierung als robusteste Variante zu bevorzugen. Die Süd/Nord-Kombination gegenüberliegender Klassenzimmer erweist sich als beste Doppelbelegung. Die in der Simulation günstige Bewertung der Westorientierung gilt nur für die hier untersuchte Belegungszeit bis 17 Uhr und ist nicht verallgemeinerbar.

Je nach Länge der Belegungszeit in die Abendstunden, kann die optimale Ausrichtung von Klassenräumen sich ändern. Hierzu sind noch weitere Untersuchungen notwendig. Ebenso muss die Temperaturschichtung von Raumhöhen mit 3 m und 4 m detaillierter betrachtet werden.

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Einzelvarianten gegenüber dem Basismodell. Die Kombination der wirksamsten Massnahmen (Querlüftung, reduzierte Akustikdecke, optimierte Orientierung, frühzeitiger Nachtlüftungsstart) wird voraussichtlich eine deutlich grössere Gesamtwirkung erzielen. Die kombinierte Wirkung wir in der nächsten Projektphase untersucht.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

3.1 Zentrale Erkenntnisse

Die Simulationen bestätigen, dass organisatorische Massnahmen das grösste unmittelbare Reduktionspotenzial bieten. Die horizontale Stellung der Sonnenschutzlamellen während der Nachtlüftung reduziert die Überhitzungsstunden um rund 30 %, ergänzt durch Querlüftung resultieren die niedrigsten Werte aller untersuchten Varianten. Das Betriebskonzept sollte daher vor kostenintensiven baulichen Eingriffen optimiert werden. Grundvoraussetzung für jedes passive Kühlkonzept bleibt die konsequente nächtliche Regeneration der Speichermasse – ohne sie steigt das Temperaturniveau kumulativ an. Die Begehungen der Basler Schulgebäude zeigen jedoch, dass diese Voraussetzung im realen Betrieb häufig nicht gegeben ist. Geschlossene Lamellen blockieren die Auskühlung, Verantwortlichkeiten für die Nachtlüftung fehlen, zugestellte Fensterbänke verhindern das vollständige Öffnen der Fenster.

Im Gebäudebestand sind die normativen Anforderungen an öffenbare Flächen zwar vielfach erfüllt, die nächtliche Nutzung zur Auskühlung scheitert aber an Einbruchschutz, Witterungsschutz und Brandschutzauflagen. Praxistaugliche Nachrüstungsstrategien zu entwickeln, ist eine zentrale Aufgabe der weiteren Arbeitspakete. Gleichzeitig begrenzt der Klimawandel das Potenzial passiver Konzepte. Die Klimaszenarien CH2018 projizieren unter RCP8.5 eine Zunahme der Tropennächte in Basel von heute ein bis drei auf durchschnittlich sieben pro Jahr in der Periode 2045–2074. Ob erhöhte Speichermassen und ergänzende Massnahmen wie Deckenventilatoren diese Einschränkung kompensieren können oder hybride Systeme erforderlich werden, wird in den Simulationen unter dem Klimaszenario 2060 geprüft.

Physikalische und organisatorische Grenzen von Low-Tech-Konzepten zeichnen sich bei Aussenlärmpegeln über 70 dB, wirksamer Speichermasse unter 80 Wh/(m² AE) und ausschliesslicher Westorientierung ohne Kompensationsmöglichkeiten ab. Diese Kriterien fliessen in den Entscheidungsbaum der Planungshilfe (AP 8) ein.

3.2 Projektfortschritt

Die Literaturrecherche (AP 2) ist weitgehend abgeschlossen; die Erkenntnisse sind in die Grundlagenkapitel eingeflossen und bilden die Basis für die weiteren Arbeitspakete. Die Sammlung von Best-Practice-Beispielen ist erfolgt, deren systematische Auswertung steht noch aus. Die Experteninterviews befinden sich in Vorbereitung und werden im kommenden Berichtszeitraum durchgeführt.

Die Messkampagne des Kantons Basel-Stadt (AP 3) liefert seit Sommer 2024 Daten aus sieben Schulgebäuden. Die Begehungen wurden abgeschlossen und in schulspezifischen Berichten dokumentiert. Das Simulationsmodell für das Referenzklassenzimmer ist aufgebaut und erste Variantenstudien wurden durchgeführt. Die Ergebnisse informieren bereits die Ableitung von Sofortmassnahmen für den Kanton Basel-Stadt.

3.3 Ausblick

Im kommenden Projektjahr werden folgende Arbeiten durchgeführt:

AP 2 Durchführung der Experteninterviews zum Thema sommerlicher Wärmeschutz in Schulen sowie systematische Auswertung der gesammelten Best-Practice-Beispiele.

AP 3 Weiterführung der Messdatenanalyse mit Fokus auf CO_2-Konzentrationen im Winter. Das Vorgehen bei der Anonymisierung der Messdaten für die öffentliche Berichterstattung wird geklärt.

AP 4 Untersuchung weiterer Parameter im Simulationsmodell. Schwerpunkte bilden die Temperaturschichtung bei unterschiedlichen Raumhöhen (3 m und 4 m), der Einfluss verschiedener Verschattungssysteme mit feststehenden Konstruktionen sowie die Auswirkungen verlängerter Belegungszeiten. Neben der Raumlufttemperatur werden auch die CO_2-Konzentrationen analysiert. Die Simulationen werden unter dem Klimaszenario CH2025 2060 für Basel-Stadt durchgeführt, um die Robustheit der Konzepte unter zukünftigen Klimabedingungen zu prüfen. Aus den Variantenstudien wird ein optimiertes Referenzklassenzimmer abgeleitet, das die wirksamsten Massnahmen kombiniert. Zudem erfolgt ein Vergleich mit konventionellen Systemen (Komfortlüftung mit WRG, mechanische Kühlung) zur Quantifizierung der Energiebedarfsunterschiede.

AP 5–7 Analyse des Einflusses auf Gestaltung und Materialisierung (AP 5), Erstellung der THGE-Bilanzen (AP 6) sowie Durchführung der Kostenanalyse (AP 7). Die Lebenszyklusbetrachtung vergleicht Low-Tech-Konzepte und konventionelle Referenzsysteme hinsichtlich Treibhausgasemissionen und Kosten über 60 Jahre.

4 Publikationen und andere Kommunikation

- Es wurden acht interne Berichte für Basel-Stadt verfasst. Es gibt je Schule einen Bericht, in dem die Schule durch einen ausführlichen Steckbrief vorgestellt wird, die Erkenntnisse aus der Begehung zusammengestellt sowie die Messwerte analysiert werden. Die sieben einzelnen Berichte werden in einem Übersichtsbericht zusammengefasst. Alle acht Berichte sind nicht öffentlich.
- Es fanden zwei Begleitgruppentreffen statt, bei denen der Projektstand vorgestellt wurde.
- Das Projekt wurde im Oktober 2025 beim D-A-CH-Treffen in Lustenau (A) von Claudia Hauri (HSLU) und im November 2025 beim Erfahrungsaustausch Gebäudetechnikverantwortlicher öffentlicher Bauherren in Muttenz von Gregor Steinke (FHNW) vorgestellt.

5 Literaturverzeichnis

[1] Energieinstitut Vorarlberg (Hrsg.), *Konzepte für energieeffiziente, klimaverträgliche „LOW TECH"-Gebäude im Bodenseeraum*. Dornbirn: Energieinstitut Vorarlberg, Energieagentur Ravensburg gGmbH, Energie- & Umweltzentrum Allgäu gGmbH, Energieagentur St. Gallen GmbH, Universität Liechtenstein, 2021.

[2] EDK/IDES, "Klassengrösse: Richtgrösse – Gymnasiale Maturitätsschulen. EDK/IDES-Kantonsumfrage," Bern, 2025. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: https://edudoc.ch/record/212382/files/178.pdf

[3] G. Havenith and G. Havenith, "Metabolic rate and clothing insulation data of children and adolescents during various school activities," 2007.

[4] Y. Li *et al.*, "Age-related variations in metabolic rates during daily activities in Chinese children and adolescents," *Energy Build.*, vol. 345, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.116055.

[5] *SIA 180:2014 - Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Zürich: SIA, 2015.

[6] *SIA 380/2:2022 - Energetische Berechnungen von Gebäuden – Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf*. Zürich: SIA, 2022.

[7] *SIA 382/1:2025 - Mechanische Lüftung in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: SIA, 2025.

[8] BAG, "Frische Luft für Schulhausneubauten und-sanierungen Informationen und Empfehlungen für Bauherren - B - Bewertung von Raumluftqualität und Lüftung anhand des CO_2-Pegels," Bern, 2019.

[9] Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG, "Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft," *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, vol. 51, no. 11, pp. 1358–1369, Nov. 2008, doi: 10.1007/s00103-008-0707-2.

[10] CEN (European Committee for Standardization), "EN 16798-1:2019 – Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6," Brussels, 2019.

[11] R. and A.-C. E. ASHRAE (American Society of Heating, "ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022 – Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality," Atlanta, GA, 2022.

[12] D. J. Clements-Croome, H. B. Awbi, Z. Bakó-Biró, N. Kochhar, and M. Williams, "Ventilation rates in schools," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 3, pp. 362–367, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.03.018.

[13] P. Wargocki and D. P. Wyon, "Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective," *Build. Environ.*, vol. 59, pp. 581–589, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.10.007.

[14] C. Vassella, *Luftwechsel in Schweizer Schulen Bericht zu Projekt und Datenerhebung*. Bern: BAG, 2022.

[15] J. M. Daisey, W. J. Angell, and M. G. Apte, "Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: An analysis of existing information," 2003, *Blackwell Munksgaard*. doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00153.x.

[16] *Merkblatt SIA 2024:2021 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Zürich: SIA, 2021.

[17] *SIA 390/1:2025 - Klimapfad*. Zürich: SIA, 2025.

[18] *KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich (2009/1:2022, Version 7.0)*. Bern: KBOB, 2025.

[19] *SIA 2032:2020 - Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden*. Zürich: SIA, 2020.

[20] NCCS (Hrsg.), *Klimawandel im Kanton Basel-Stadt Was geschah bisher und was erwartet uns in Zukunft?* Zürich: National Centre for Climate Services, 2021. [Online]. Available: http://www.klimaszenarien.ch

[21] Z. S. Zomorodian and M. Tahsildoost, “Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics,” *Energy Build.*, vol. 134, pp. 80–93, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.10.018.

[22] C. Hutter, A. Eberle, H. Wöhrle, L. Neubert, I. H. C. G. Hausladen, and E. Endres, *Kühle Gebäude im Sommer*. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt Deutschland, 2023.

[23] *SIA 378/4:2023 Elektrizität in Gebäuden – Beleuchtung*. Zürich: SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2023.

[24] M. Ragonesi and et al., *Bautechnik der Gebäudehülle*. Zürich, 2022.

[25] DIN 4108-2:2013-02, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: Beuth Verlag, 2013.

[26] *ÖNORM B 8110-6-1:2019 - Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6-1: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf.* Wien: Austrian Standards International, 2019.

[27] T. Kessler, *Wegleitung Sommerlicher Wärmeschutz bei Bauvorhaben der Stadt Zürich*. Zürich: Stadt Zürich Amt für Hochbauten, 2023.

[28] Erziehungsdepartement Basel-Stadt (Hrsg.), “Raumstandards Sekundarstufe II,” Basel, 2021.

---

6 Anhang

Tabelle 12: Abgeleitete Planungsrichtwerte als Basis für Low-Tech-Konzepte in Schulneubauten

Parameter	Richtwert	Kommentar	Norm/Kapitel
Architektur und Raumgeometrie			
Orientierung Klassenzimmer	Süd oder Nord bevorzugt, West vermeiden	Beherrschbare solare Lasten, effektive natürliche Lüftung mit Aussenluft	Kap. 2.4.1
Raumhöhe	> 3.5 m	CO_2-Pufferung, thermischer Auftrieb für natürliche Auskühlung, Temperaturschichtung	SIA 180:2014, Kap. 2.4.4
Raumtiefe bei einseitiger Lüftung	max. 2.5-fache Raumhöhe	Wirksame Durchlüftung auch in raumseitigen Bereichen ohne Querlüftung	Kap. 2.4.4
Glasanteil f_g	max. 30 %	Begrenzung solarer Wärmeeinträge bei gleichzeitiger Tageslichtversorgung	SIA 180:2014, Kap. 2.4.2,
Bauphysik und Speichermasse			
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit	min. 100-150 Wh/(m² A_E)	Dämpfung Temperaturspitzen, Voraussetzung passive Kühlung, höherer Wert für Klimaszenarien 2060	SIA 180:2014, Kap. 2.4.5
Thermisch aktivierte Deckenfläche	min. 40-60 %	Raumakustik bei gleichzeitiger thermischer Aktivierung, Akustik durch Deckensegel oder Wandabsorber	SIA 181:2020, Kap. 2.4.5
Lüftung und Sommerlicher Wärmeschutz			
Raumluftqualität CO_2-Konzentration	>2'000 ppm	Inakzeptabel, Momentanwert, so weit wie möglich vermeiden	SIA 180:2014, BAG, Kap. 2.2.2
	<1'400 ppm	Zielwert Neubau/Sanierung	BAG, Kap. 2.2.2
Freie Strömungsfläche	min. 5 % NGF	Ausreichende Luftwechselraten für Stosslüftung und Natürliche Auskühlung	SIA 180:2014, Kap. 2.2.3
Volumenstrom natürliche Auskühlung	min. 10 m³/(h·m² NGF)	Regeneration thermischer Speichermasse, 3-4 Luftwechsel pro Stunde	SIA 180:2014, Kap. 2.2.1
Windwiderstandsklasse Sonnenschutz	min. 4-6	Witterungsstabile Verschattung, besonders kritisch an Westfassaden	EN 13659:2015, Kap. 2.4.3
Systemgrenzen			
Aussenlärmpegel Systemgrenze	max. 65-70 dB	Oberhalb 65 dB Sondermassnahmen, oberhalb 70 dB mechanische Lüftung empfohlen	LSV, Kap. 2.6.1
Speichermasse Systemgrenze Bestand	min. 80 Wh/(m² A_E)	Unterhalb dieses Werts wirtschaftlich keine Nachrüstung zu Low-Tech sinnvoll	Kap. 2.4.5

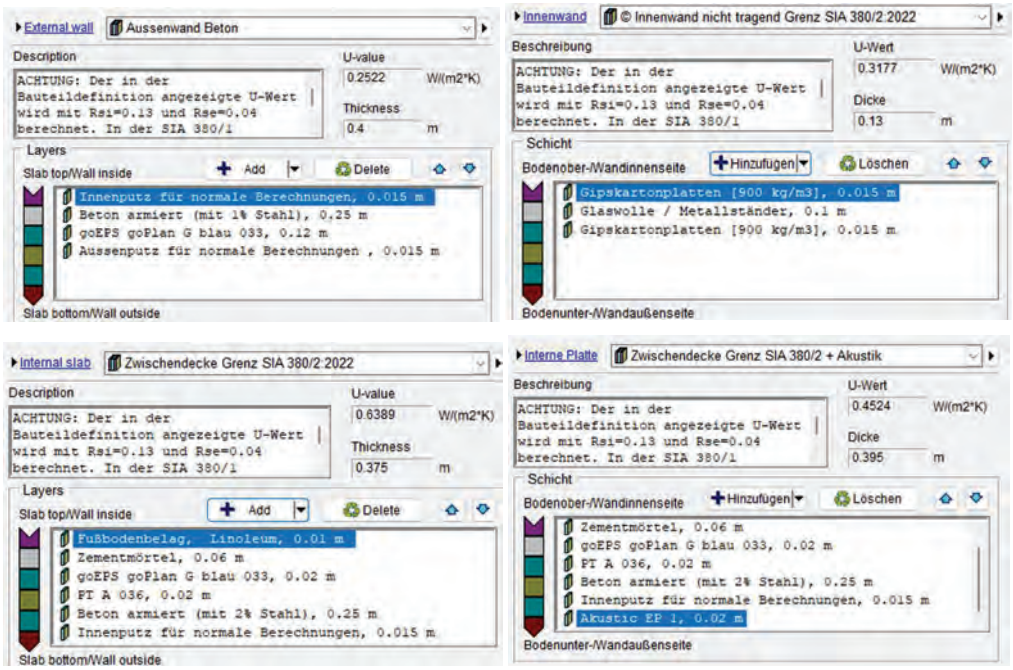
6.1 Grundlagen Simulation

Geometrie	
Nettogrundfläche	60.3 m^2 (Klassenzimmer), 24.9 m^2 (Flur)
Breite	9.0 m
Tiefe	6.7 m (Klassenzimmer), 2.8 m (Flur)
Höhe	3.0 m
Fenstermasse pro Fenster	2.05 m x 2.05 m, nur 1/3 ist öffenbar (Dreh-/Kippflügel)
Bauweise	
Aussenwand	Beton + Dämmung, U-Wert: 0.25 W/(m^2 K)
Innenwände	Leichtbau
Zwischendecke	Beton + Akustikeinsatz 100 %
Fenster	3-fach verglast, Holzrahmen, U_g-Wert: 0.6 W/(m^2 K), g-Wert: 54 %, Rahmenanteil: 25 %, U_f-Wert: 2.6 W/(m^2 K)
Luftdichtheit	q_{50} = 1.2 m^3/(h m^2), geschlossenen Ortschaft
Nutzung	
Raumbelegung	- 19 Personen (115 W, 18.7 l/h CO_2, Sekundarschule) - Belegungszeit: 7 – 17 Uhr an Schultagen - Geräte, Beleuchtung: Leistung gemäss SIA 2024:2021 Standard, Profil leicht angepasst
Sonnenschutz	- Steuerung nach Einstrahlung (> 200 W/m^2) - Geschlossener Sonnenschutz: Lamellenwinkel: 65 ° - Sonnenschutz ist generell nachts, am Wochenende und in den Ferien geschlossen (Lamellenstellung 65°)
Lüftung „manuelle Fensterlüftung“	- Pausenlüftung in den Klassen: 3 Fensterflügel ganz offen (nur Klasse) - Taglüftung in den Klassen/Flur nach Temperatur: je 3 Fensterflügel ganz offen, wenn Aussenlufttemperatur unter Raumlufttemperatur und die Raumlufttemperatur zwischen 21 – 26 °C liegt - Pausenlüftung/Taglüftung bei geschlossenem Sonnenschutz: 30 % der Öffnungsfläche nutzbar - Nachtlüftung: Sonnenschutz geschlossen: 10% der Öffnungsfläche nutzbar (Kippstellung) - Nachtlüftung: 01.-28.06. und 11.08.-06.09. (nur an Schultagen) - „Lamelle horizontal“: Fensterflügel ganz offen: 80 % der Öffnungsfläche nutzbar
Türe	- Geschlossen, ausser bei Varianten mit „Türe offen“
Randbedingungen	
Klima	Basel Klingenberg 2035 RCP 8.5 ergänzt mit Temperaturmesswerten der Klimastation Basel St. Johann (01.05.-31.12.24, hohe Temperaturen in der letzten Sommerferienwoche)
Id. Heizung	21 °C, Heizperiode: Okt - April
Id. Kühlung	keine
Simulationszeitraum	01.01.-31.12.2024

Ferien

	Start	Ende
Fasnacht	10.02.2024	24.02.2024
Frühling	23.03.2024	06.04.2024
Sommer	29.06.2024	10.08.2024
Herbst	28.09.2024	12.10.2024
Weihnachten	21.12.2024	04.01.2025

Konstruktionen



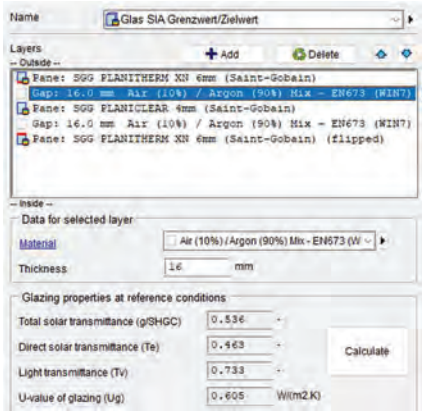


Bild 1 Konstruktionen des Basismodelles in IDA ICE.

Lüftung

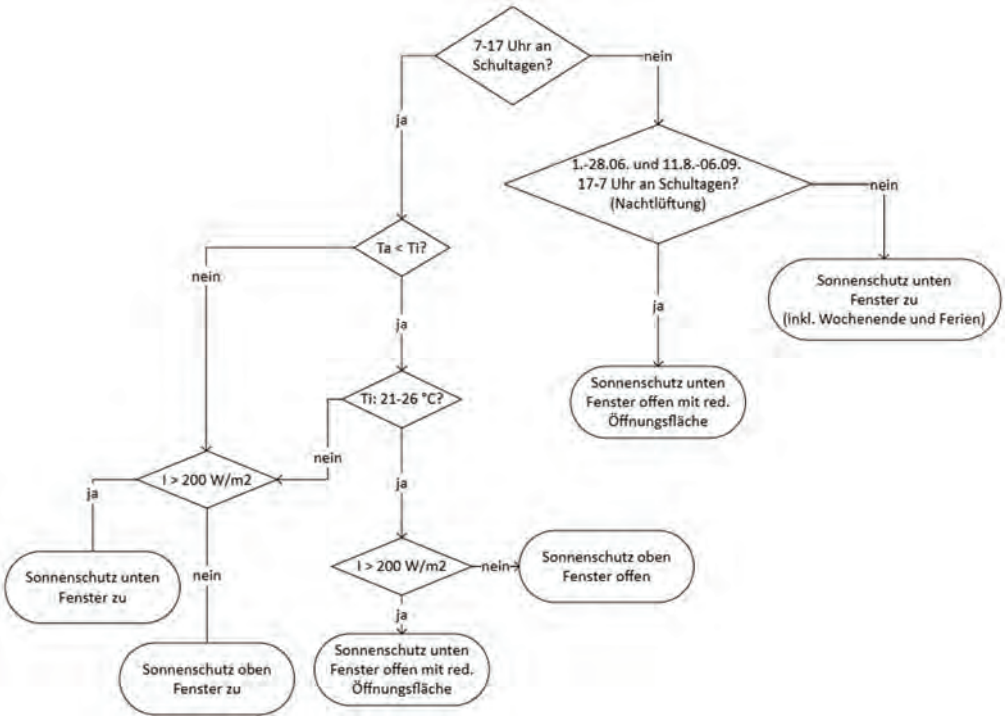


Bild 2 Schema der Lüftungsstrategie gemäss Temperatur (Taglüftung: Fensterlüftung nach «Temperaturempfinden») und Zeitplan für Nachtlüftung (Fenster werden abends geöffnet und sind die gesamte Nacht offen).

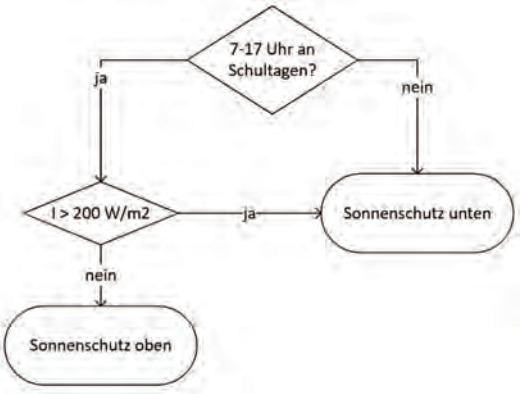


Bild 3 Schema der automatischen Steuerung für den Sonnenschutz (Gebäudeleittechnik).

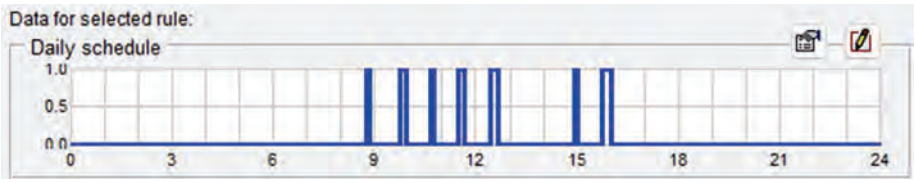


Bild 4 Pausenlüftungsplan während der Schultage. Der letzte Lüftungsblock erfolgt nach dem Unterricht, damit morgens die CO_2-Konzentration der Aussenkonzentration entspricht

Personen, Geräte und Beleuchtung

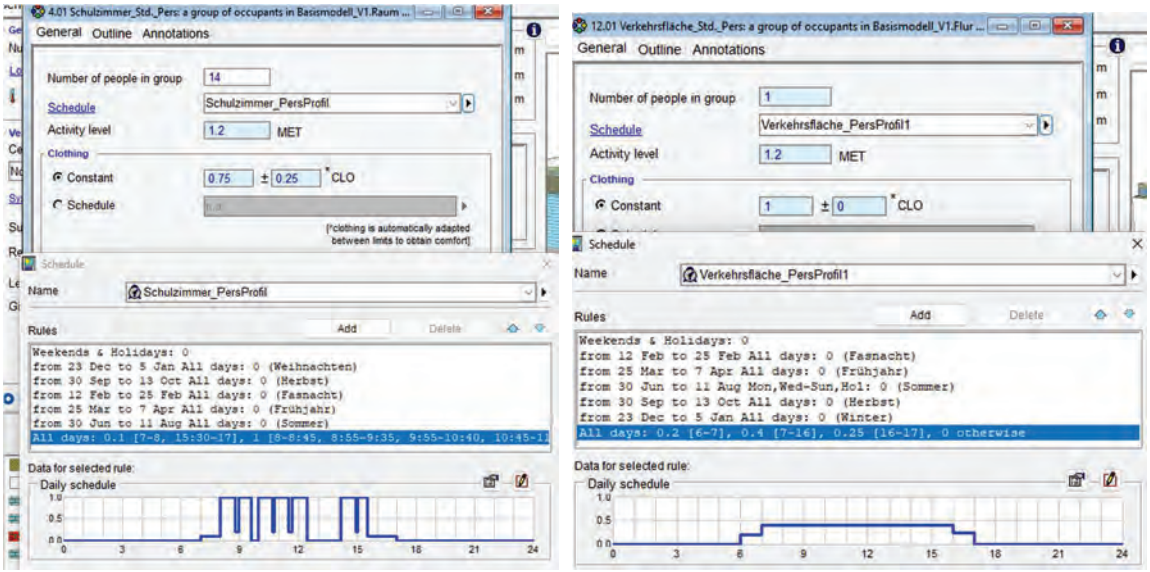


Bild 5 Personenanwesenheit Klassenzimmer (links), Flur (rechts).

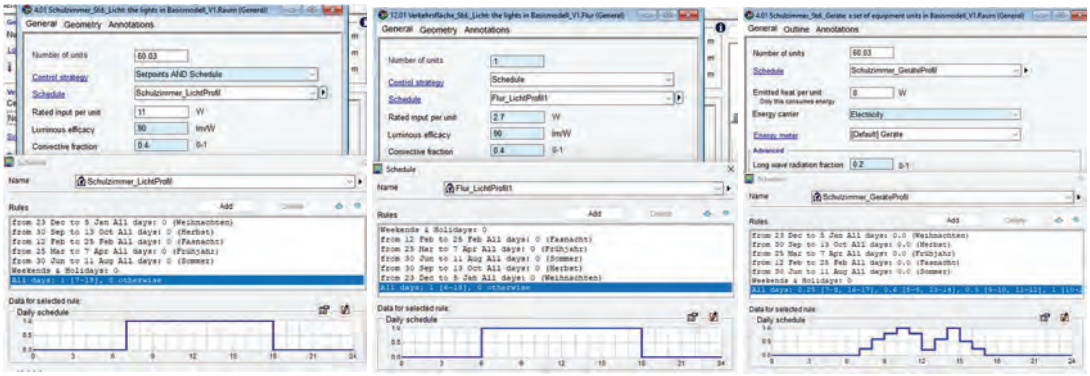


Bild 6 Lichtprofil im Klassenzimmer (links) und Flur (mitte), Geräteprofil Klassenzimmer (rechts).