



Zwischenbericht vom 13. März 2026

PassiveClimateSchool

Klimaangepasster Schulraum für morgen –
Einfluss auf Treibhausgasemissionen, Behag-
lichkeit und Architektur



Quelle: Microsoft 365



 | Kanton Basel-Stadt

n | w Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

HSLU Hochschule
Luzern

WALDHAUSER ENERGIE +
+ **HERMANN** HAUSTECHNIK
INGENIEURE

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 CO₂-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 CO₂-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 offenbaren 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.



vor 1919



1919-1945



1946-1960



1961-1980



1981-2000



ab 2001

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%BCseite4.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 Doppelkationen, 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 Komfortexpectationen 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.

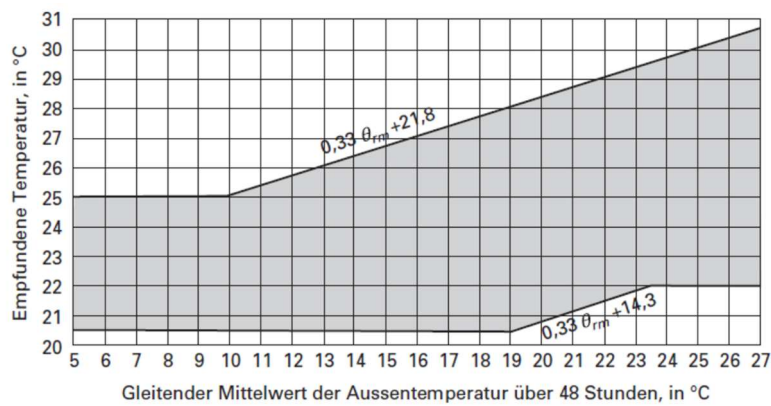


Abbildung 2: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Räumen ohne maschinelle Kühlung, je nach dem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur. Quelle: SIA 180:2014 (Korrigenda C2, 2020)

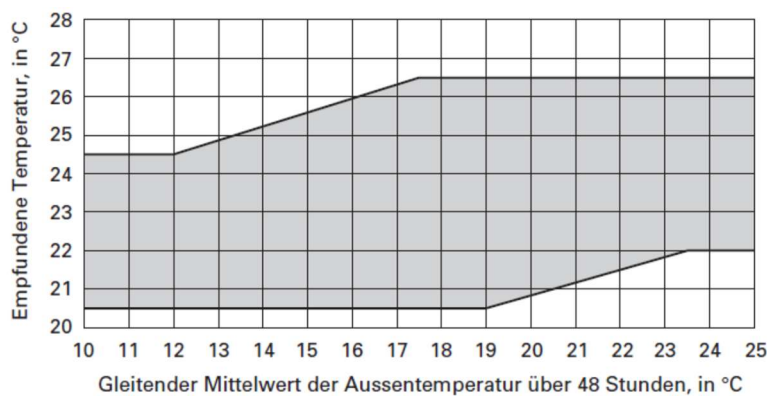


Abbildung 3: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen mit natürlicher oder mechanischer Lüftung, während diese beheizt oder maschinell gekühlt sind, je nach gleitendem Mittelwert der Aussentemperatur. Quelle: SIA 180:2014 (Korrigenda C2, 2020)



2.2.2. Raumlufthqualität und CO₂-Pegel

Die Raumlufthqualität wird primär über die CO₂-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 CO₂-Konzentration

Normen und Empfehlungen	Kategorie	Raumlufthqualität	Bereich der CO ₂ -Konzentration in der Raumlufth 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 CO₂-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 -CO₂ 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).

CO₂-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].

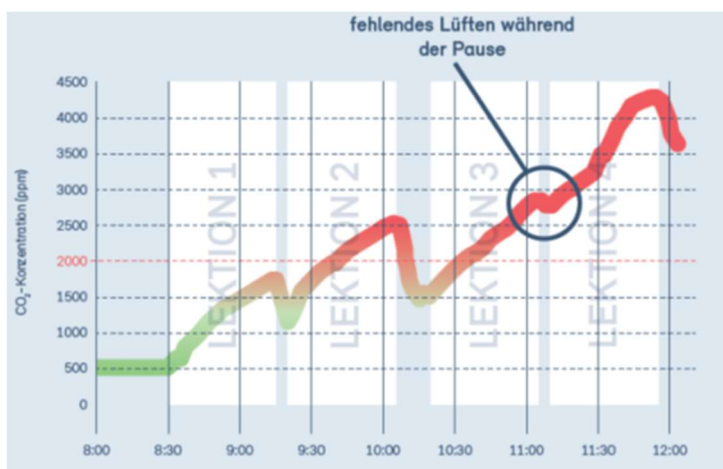


Abbildung 4: CO₂-Verlauf in einem Schulzimmer bei manueller natürlicher Fensterlüftung während eines Schulvormittags bei unzureichender Pausenlüftung. Dies führt zu Werten über 2000 ppm. Quelle: BAG

Der Unterschied zwischen den Anforderungen und realem Nutzerverhalten ist eine Herausforderung für Low-Tech-Konzepte. Ob organisatorische Massnahmen und Feedbacksysteme (CO₂-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 m ³ /(h·P)	Hohe Raumlufqualität	SIA 382/1:2025
Aussenluftstrom IDA 2	25 m ³ /(h·P)	Mittlere Raumlufqualität	SIA 382/1:2025
Aussenluftstrom IDA 3	15 m ³ /(h·P)	Mässige Raumlufqualität	SIA 382/1:2025
Aussenluftstrom Schulräume	29 m ³ /(h·P)	Lüftung	SIA 2024:2021 [16]
Freie Strömungsfläche	5 % NGF	Natürliche Lüftung	SIA 180:2014
Volumenstrom natürliche Auskühlung	10 m ³ /(h·m ² NGF)	Passive Kühlung	SIA 180:2014
Durchflussbeiwert Drehflügel	0.60–0.70	Öffnungsauslegung	EN 16798-7:2017:
Durchflussbeiwert Kipfenster	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 Kipfenstern 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/m ²			Anforderungen jährliche Treibhausgasemissionen kg/m ²	
	Erstellung	Betrieb	Mobilität	Zielwert B	Zusatzanforderung B
Basis					
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 ($T_{\max} > 30\text{ °C}$) und der Tropennächte ($T_{\min} > 20\text{ °C}$) nimmt deutlich zu (Abbildung 5).

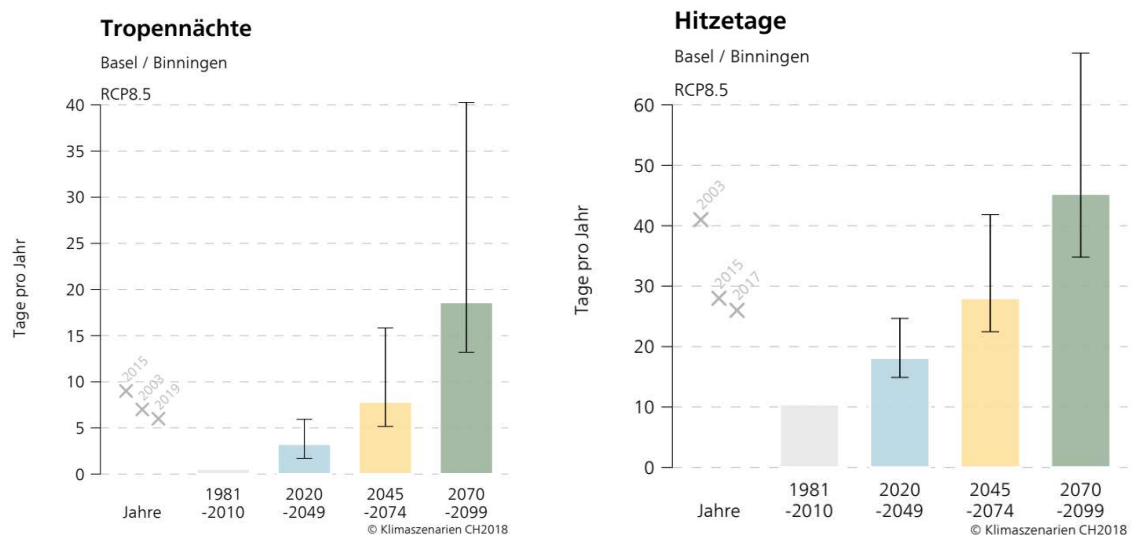


Abbildung 5: Projektion der Tropennächte $T_{\min} > 20\text{ °C}$ (links) und Hitzetage $T_{\max} > 30\text{ °C}$ (rechts) für Basel/Binningen gemäss Klimaszenarien CH2018 (RCP8.5). Vertikale Linien: Modellunsicherheit. Quelle: [20]

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 Aussentemperatur 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 CO₂-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 Er-schliessung, 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 $g_{tot} \leq 0.10$ 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.

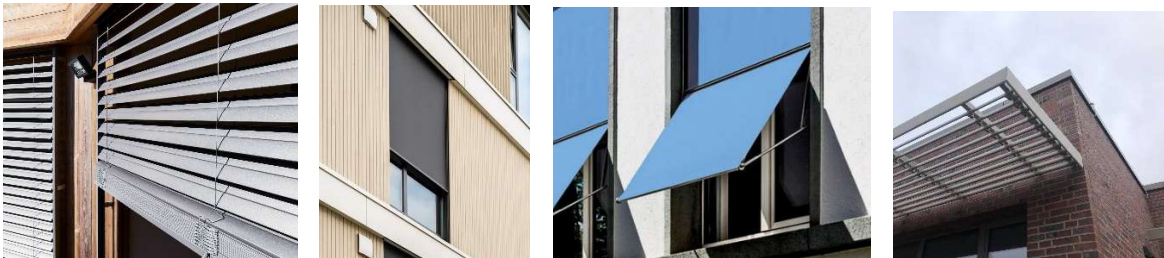


Abbildung 6: Lamellenstoren, textile Zip-Screen, Ausstellmarkise, Brise Soleil.
Quelle: Storen.ch, stolma.de, meivilliger.ch, rotec-blog.de

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 CO₂-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. Tieferer Räume erfordern Querlüftung. Das Volumen pro Person erweist sich als relevantere Kenngrösse als die Fläche. Die Empfehlung liegt bei 8 bis 10 m³ pro Person. Ein Klassenzimmer mit 60 m² erreicht bei 3.50 m Höhe und 25 Personen 8.4 m³ 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 Lüfthygiene 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 $10 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \text{ NGF})$ 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 $600 \text{ m}^3/\text{h}$, 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. $>23\text{ °C}$) 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 ($T_{\min} > 20 \text{ °C}$), 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/m². Deckenventilatoren 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 Schalleistungspegel 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 CO₂-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 windanfälligen 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 offenbar. Die Nachrüstung von Feststellanlagen erfordert Abstimmung mit der Feuerpolizei. Inmanchen Gebäuden fehlen zudem offenbare Fenster im Erschliessungsbereich vollständig.

Speichermasse

Bauten in Leichtbauweise oder mit grossflächig abgehängten Decken unterschreiten häufig die in Kapitel 2.6.3 definierte Systemgrenze von $80 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ A}_E)$ 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 CO₂-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 öffnbare 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.

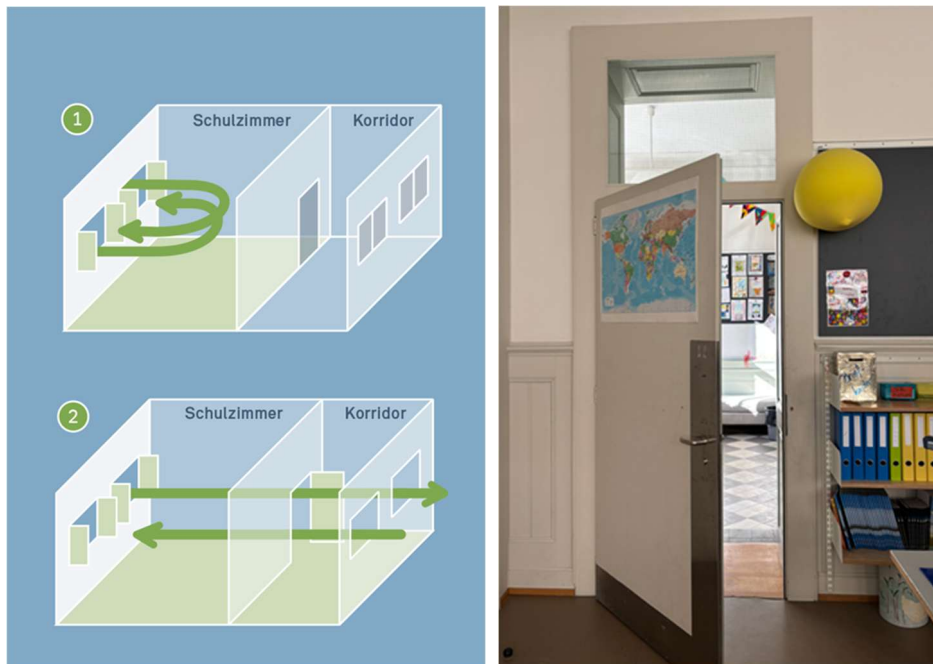


Abbildung 8: Einseitige Lüftung und Querlüftung (links). Bild: schulen-lueften.ch
Klassenzimmertüre mit Oberlicht (rechts). Bild: FHNW

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 langsames Abkühlen in der Nacht und reduzieren das Auskühlpotenzial der Fassaden. Eine Entsigelung 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			
Nachlüftungskonzept 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
Nachlüftung 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/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 19 Personen anwesend. Es ist ein Klassenzimmer einer Sekundarschule. Weitere Angaben sind im Anhang Kap. 6 zu finden.

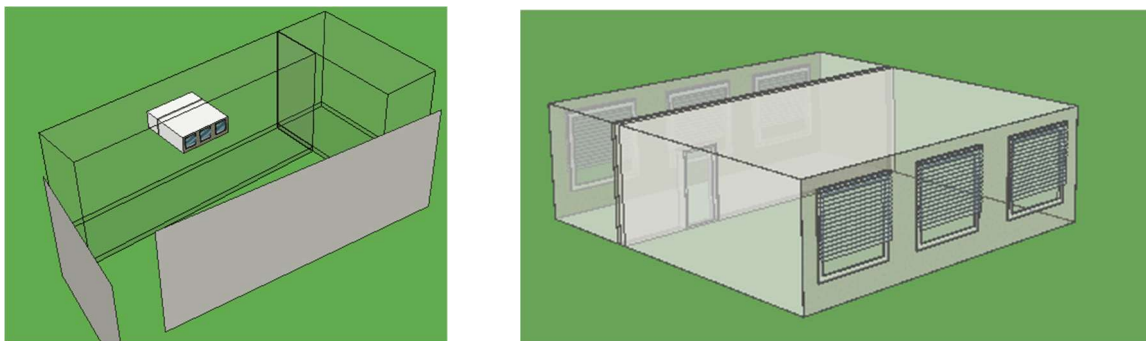


Abbildung 9: Ansicht des Basismodelles in IDA ICE. Das Klassenzimmer ist Südost ausgerichtet.

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 ($> 200 \text{ W/m}^2$) 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	Massnahmen
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 Nachtlüftung
	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/m ²)	33.1	176	62	238	92	bauliche Massnahmen
3	Zielwert Geräte (8 -> 4 W/m ²)	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	
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 waagrecht 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 Raumlufthöhen 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 Raumlufthöhe, 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 Raumlufthöhen führen. Die Reduktion der internen und solaren Lasten sowie die Vergrößerung der thermisch aktivierbaren Decke senken ebenfalls die Raumlufthöhen, 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 wird 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 offenbare Flächen zwar vielfach erfüllt, die nächtliche Nutzung zur Auskühlung scheitert aber an Einbruchschutz, Witterungsschutz und Brandschutzaufgaben. 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Pe-gels,” Bern, 2019.
- [9] Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG, “Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innen-raumluft,” *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 envi-ronment, 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.build-env.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] *Merckblatt 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/(m ² 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 CO₂-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 m ³ /(h·m ² 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/(m ² 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 öffnenbar (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	<ul style="list-style-type: none">- 19 Personen (115 W, 18.7 l/h CO₂, Sekundarschule)- Belegungszeit: 7 – 17 Uhr an Schultagen- Geräte, Beleuchtung: Leistung gemäss SIA 2024:2021 Standard, Profil leicht angepasst
Sonnenschutz	<ul style="list-style-type: none">- Steuerung nach Einstrahlung (> 200 W/m²)- Geschlossener Sonnenschutz: Lamellenwinkel: 65 °- Sonnenschutz ist generell nachts, am Wochenende und in den Ferien geschlossen (Lamellenstellung 65°)
Lüftung „manuelle Fensterlüftung“	<ul style="list-style-type: none">- 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	<ul style="list-style-type: none">- 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

The image displays four screenshots of a software interface for defining building construction details. Each screenshot shows a specific component with its description, U-value, thickness, and a list of layers.

- External wall (Aussenwand Beton):** U-value: 0.2522 W/(m²K), Thickness: 0.4 m. Layers include: Innenputz für normale Berechnungen (0.015 m), Beton armiert (mit 1% Stahl) (0.25 m), goEPS goPlan G blau 033 (0.12 m), and Aussenputz für normale Berechnungen (0.015 m).
- Innenwand (Innenwand nicht tragend Grenz SIA 380/2:2022):** U-Wert: 0.3177 W/(m²K), Dicke: 0.13 m. Layers include: Gipskartonplatten [900 kg/m³] (0.015 m), Glaswolle / Metallständer (0.1 m), and Gipskartonplatten [900 kg/m³] (0.015 m).
- Internal slab (Zwischendecke Grenz SIA 380/2:2022):** U-value: 0.6389 W/(m²K), Thickness: 0.375 m. Layers include: Fußbodenbelag, Linoleum (0.01 m), Zementmörtel (0.06 m), goEPS goPlan G blau 033 (0.02 m), FT A 036 (0.02 m), Beton armiert (mit 2% Stahl) (0.25 m), and Innenputz für normale Berechnungen (0.015 m).
- Interne Platte (Zwischendecke Grenz SIA 380/2 + Akustik):** U-Wert: 0.4524 W/(m²K), Dicke: 0.395 m. Layers include: Zementmörtel (0.06 m), goEPS goPlan G blau 033 (0.02 m), FT A 036 (0.02 m), Beton armiert (mit 2% Stahl) (0.25 m), Innenputz für normale Berechnungen (0.015 m), and Akustic EP 1 (0.02 m).

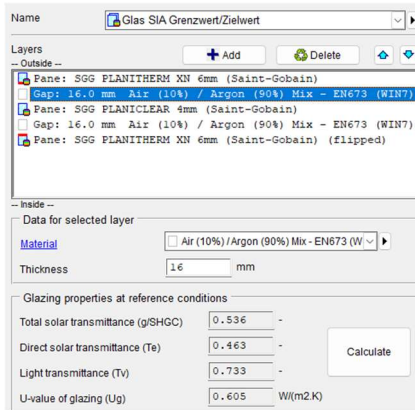


Bild 1 Konstruktionen des Basismodelles in IDA ICE.



Personen, Geräte und Beleuchtung

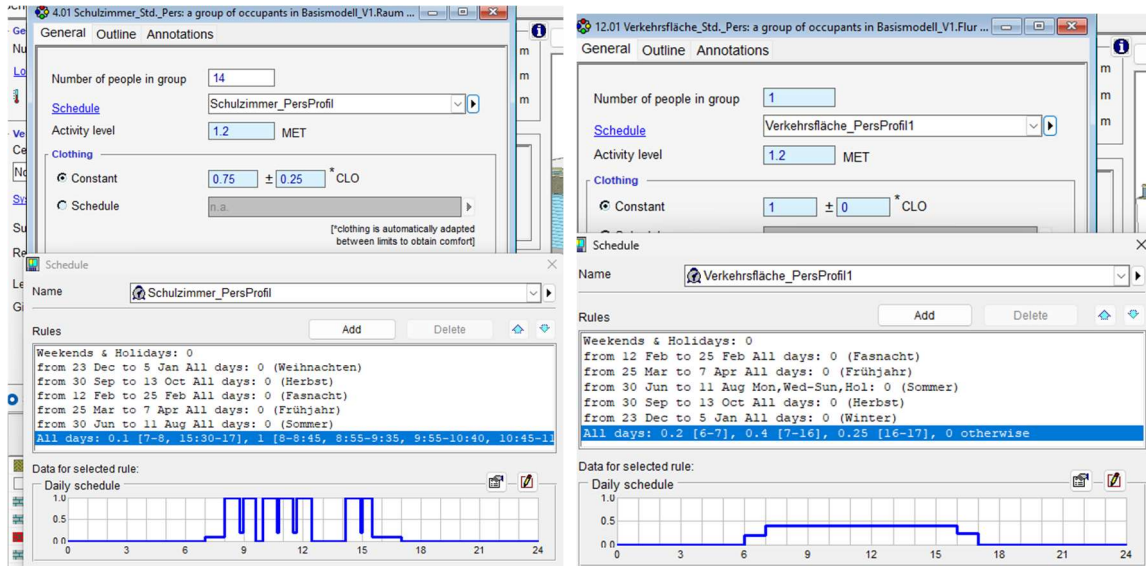


Bild 5 Personenanwesenheit Klassenzimmer (links), Flur (rechts).

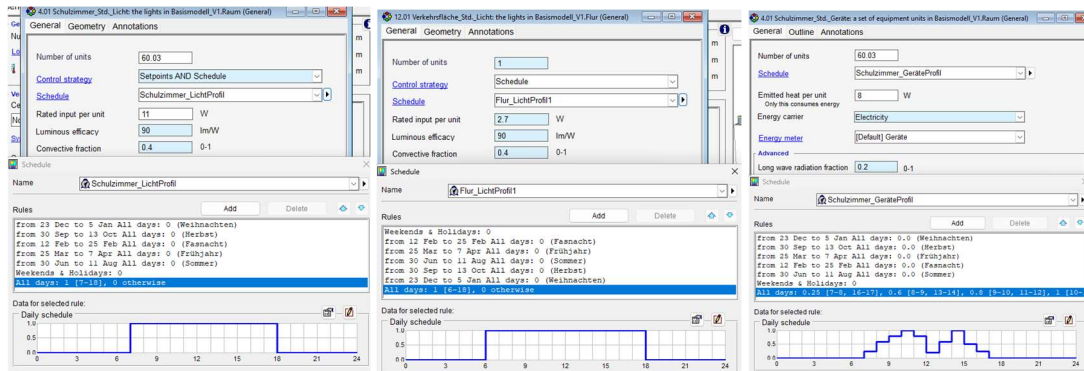


Bild 6 Lichtprofil im Klassenzimmer (links) und Flur (mitte), Geräteprofil Klassenzimmer (rechts).